RMUTP รายงานบทความวิจัย (Conference Proceedings)

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

The 17th Electrical Engineering Network 2025

จัดโดย : สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE PES-THAILAND)
สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) (EEAAT)
เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (RMUTP)

EENET 2025

การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีเพื่อการวิจัย มาพัฒนาท้องถิ่นส่งเสริมเศรษฐกิจชุมชน

Creating innovation technology for research and local development promoting the economy to the community

Conference Topics

- *ไฟฟ้ากำลัง* Electrical Power (PW)
- *อิเล็กทรอนิกส์, วงจร และสื่อสาร* Electronics, Circuit and Communicatiion (EC)
- *อิเล็กทรอนิกส์กำลัง* Power Electronics (PE)
- *คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ* Computer and Information Technology (CP)
- *ระบบควบคุมและการวัด* Control Systems and Instrumentation (CT)
- *ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล* Digital Signal Processing (DS)
- *พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน* Energy and Conservation of Energy (ES)
- *นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์* Innovation and Invention (IN)
- *งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า* General Electrical Engineering (GN)
- *หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า* Special Session on Electrical Engineering (SS1)
- งานวิจัยด้านการบริหาร การจัดการด้วยขบวนการร่วมกับเทคโนโลยีเพื่อเกิดการพัฒนา (SS2)
- หัวข้อวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม ปวช. และ ปวส. (SS3)

https://ee.eng.rmutp.ac.th/

https://eenet2025.rmutp.ac.th/

28 - 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง



สารจาก นางสาวศุภมาส อิศรภักดี

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ในโลกยุคดิจิทัลที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและซับซ้อน เทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน พลังงานอัจฉริยะ การสื่อสารและการประมวลผลข้อมูล การขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรม การแพทย์ และแม้กระทั่งการเปลี่ยนแปลงวิถีชีวิตของผู้คน วิศวกรรมไฟฟ้าจึงเป็นสาขาวิชาที่มีบทบาทในการสนับสนุนประเทศให้สามารถแข่งขันและเติบโตได้อย่างมั่นคง การส่งเสริมงานวิจัยและการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ในสาขานี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในห้วงเวลาที่โลกกำลังเผชิญความท้าทายใหม่ ๆ ทั้งด้านพลังงาน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการปฏิวัติทางเทคโนโลยี ปัญญาประดิษฐ์ และระบบอัตโนมัติอัจฉริยะ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Network: EENET) จึงเป็นเวทีสำคัญที่ช่วยเปิดโอกาสให้นักวิชาการ นักวิจัย และเยาวชนคนรุ่นใหม่ ได้เผยแพร่ผลงานวิชาการ นำเสนอแนวคิดนวัตกรรม แลกเปลี่ยนความคิดเห็นและประสบการณ์ พร้อมทั้งต่อยอดงานวิจัยสู่การนำไปใช้จริงในการสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีเพื่อการวิจัยมาพัฒนาท้องถิ่นส่งเสริมเศรษฐกิจสู่ชุมชน

ดิฉันขอแสดงความยินดีและชื่นชมมายัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสมาคมวิชาชีพ ได้แก่ สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) หรือ IEEE-PES THAILAND และสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) หรือ EEAAT ที่ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพในการจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 หรือ EENET2025 ซึ่งถือว่าเป็นภารกิจที่สำคัญที่ร่วมแสดงพลังถึงความมุ่งมั่นในการพัฒนาวิชาการและขับเคลื่อนการวิจัยสู่ความเป็นเลิศ ในโอกาสนี้ ดิฉันขอขอบคุณ คณะผู้จัดงาน คณะกรรมการดำเนินงาน วิทยากร ผู้ทรงคุณวุฒิ ตลอดจนนักวิจัย นักศึกษา และผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน ที่ร่วมเป็นพลังสำคัญในการสร้างสรรค์เวทีแห่งความรู้และนวัตกรรมนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมครั้งนี้ จะก่อให้เกิดความร่วมมือระหว่างเครือข่ายทั้งในระดับประเทศและนานาชาติ ช่วยส่งเสริมให้เกิดการบูรณาการความรู้ข้ามศาสตร์ และเสริมสร้างศักยภาพของประเทศในการใช้วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมเป็นกลไกขับเคลื่อนการพัฒนาอย่างยั่งยืนในทุกมิติ ดิฉันขออวยพรให้การประชุมวิชาการระดับชาติ EENET2025 ดำเนิน ไปด้วยความเรียบร้อย บรรลุเป้าหมายอย่างงดงาม และเป็นจุดเริ่มต้นของการจุดประกายความคิดใหม่ ๆ ที่จะนำพาประเทศไทยก้าวไปสู่อนาคตที่มั่นคงและยั่งยืน ต่อไป

(นางสาวศุภมาส อิศรภักดี)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม



สารจาก ศาสตราจารย์ศุภชัย ปทุมนากุล

ปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

โลกในศตวรรษที่ 21 เผชิญกับความท้าทายที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทั้งด้านพลังงาน เทคโนโลยีดิจิทัล สภาพภูมิอากาศ และโครงสร้างเศรษฐกิจใหม่ วิศวกรรมไฟฟ้าจึงเป็นกลไกสำคัญที่เชื่อมโยงองค์ความรู้กับการประยุกต์ใช้จริง เพื่อสร้างสังคมแห่งนวัตกรรมที่ยั่งยืน พร้อมทั้งสนับสนุนการเติบโตของประเทศในยุคเศรษฐกิจฐานความรู้ (Knowledge-based Economy) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ให้ความสำคัญกับการบูรณาการทรัพยากรด้านการศึกษา วิจัย และนวัตกรรม เพื่อตอบโจทย์การพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่มีบทบาทหลักในการสร้างกำลังคนคุณภาพและผลักดันเทคโนโลยีขั้นสูงสู่ภาคการผลิต พลังงาน การสื่อสาร และสังคมในภาพรวม

ข้าพเจ้าขอแสดงความยินดีต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) และเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า และผู้สนับสนุนการจัดงานทั้งภาครัฐและเอกชนที่ร่วมกันจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายด้านวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17 (EENET 2025) ซึ่งถือเป็นเวทีสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนางานวิจัยและนวัตกรรมด้านวิศวกรรมไฟฟ้าในระดับชาติและภูมิภาค การประชุม EENET 2025 ถือเป็นเวทีแห่งความหวังในการส่งเสริมความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานวิจัย ภาคอุตสาหกรรม และภาครัฐ เพื่อแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ นำเสนอผลงานวิจัย และต่อยอดนวัตกรรมเชิงประจักษ์ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในชีวิตประจำวันและเชิงเศรษฐกิจ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกภาคส่วนที่มีส่วนร่วมในการจัดการประชุมในครั้งนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุม EENET 2025 จะประสบผลสำเร็จอย่างดียิ่ง เป็นอีกหนึ่งก้าวสำคัญของการพัฒนาระบบวิจัย วิศวกรรม และนวัตกรรมของประเทศไทยอย่างมั่นคงและยั่งยืน

(ศาสตราจารย์ศุภชัย ปทุมนากุล)
ปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม



สารจาก อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ข้าพเจ้ารู้สึกยินดีและเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสเป็นเจ้าภาพในการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 หรือ EENET 2025 ซึ่งจัดขึ้นโดยความร่วมมือของสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE PES-Thailand) สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) (EEAAT) และเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า EENET เป็นเวทีสำคัญระดับชาติที่เปิดโอกาสให้นักวิจัย คณาจารย์ นักศึกษา และผู้ประกอบวิชาชีพในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ได้มีพื้นที่ในการนำเสนอผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการ และร่วมกันขับเคลื่อนการพัฒนาทางเทคโนโลยีให้ก้าวทันการเปลี่ยนแปลงของโลกในยุคดิจิทัล พลังงานสะอาด และเศรษฐกิจสีเขียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ให้ความสำคัญอย่างยิ่งกับการยกระดับคุณภาพงานวิจัยและการพัฒนากำลังคนด้านวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมุ่งหวังให้เกิดการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ตอบสนองต่อภาคอุตสาหกรรมและชุมชนในทุกระดับอย่างแท้จริง และส่งเสริมให้บุคลากรและนักศึกษาได้พัฒนาศักยภาพอย่างรอบด้านบนพื้นฐานของการเรียนรู้ตลอดชีวิต การประชุมในครั้งนี้จึงไม่เพียงแต่เป็นเวทีทางวิชาการเท่านั้น แต่ยังเป็นเวทีแห่งการสร้างแรงบันดาลใจ สานพลังความร่วมมือ และขยายเครือข่ายการพัฒนาในระดับประเทศ เพื่อเตรียมความพร้อมของวิศวกรไทยในอนาคตให้สามารถรับมือกับความท้าทายของยุคพลังงานใหม่อย่างมั่นคง

ในนามคณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ขอขอบพระคุณองค์ปาฐก (Keynote Speakers) ทั้งสามท่านในการบรรยายพิเศษ รวมทั้งผู้ร่วมอภิปรายภาคค่ำ (Dinner Talk) ทุกท่าน และขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากหน่วยงานต่าง ๆ ที่เสียสละเวลาในการพิจารณาผลงานวิจัย และผู้สนับสนุนการจัดงานทั้งภาครัฐและเอกชน โดยเฉพาะคณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร ที่ได้ทุ่มเทแรงกายแรงใจในการประสานงานและเตรียมการอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งขออำนวยพรให้การประชุมวิชาการ EENET 2025 ประสบผลสำเร็จเป็นอย่างดี และก่อให้เกิดองค์ความรู้และเครือข่ายวิจัยใหม่ๆ ที่จะนำพาประเทศไทยก้าวสู่อนาคตอย่างมั่นคงและยั่งยืน

(ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สารจาก

นายกสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE-PES Thailand)

ข้าพเจ้ารู้สึกยินดีเป็นอย่างยิ่งที่ได้มีโอกาสร่วมแสดงความยินดีในวาระสำคัญของการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025) ซึ่งจัดขึ้นโดยความร่วมมือของสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) หรือ EEAAT เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า หรือ EENET และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร รวมทั้งองค์กรพันธมิตรทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง การประชุม EENET นับเป็นเวทีสำคัญในการเปิดพื้นที่ให้นักวิจัย คณาจารย์ นิสิต นักศึกษา ตลอดจนวิศวกรและผู้ประกอบวิชาชีพจากภาคอุตสาหกรรมและภาคนโยบาย ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้ เทคโนโลยี และประสบการณ์ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ครอบคลุมประเด็นสำคัญของยุคสมัย อาทิ การเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานสู่ความยั่งยืน พลังงานหมุนเวียน ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ การจัดการพลังงานดิจิทัล และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานที่ทันสมัย

IEEE PES-Thailand ให้ความสำคัญกับการพัฒนาทางวิชาการควบคู่กับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยมุ่งหวังให้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย และภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีความมั่นคง มีเสถียรภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การประชุมครั้งนี้จึงเป็นโอกาสอันดีที่เราจะได้ร่วมมือ ร่วมคิด และร่วมสร้างเครือข่ายวิชาชีพ เพื่อขับเคลื่อนนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ความท้าทายด้านพลังงานในอนาคต

ในโอกาสนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความชื่นชมต่อคณะผู้จัดงาน คณะกรรมการวิชาการ ผู้ทรงคุณวุฒิ วิทยากร ผู้ส่งผลงาน และผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน ที่มีส่วนผลักดันให้การประชุม EENET 2025 เกิดขึ้น สมกับเจตนารมณ์ของการสร้างสังคมวิศวกรรมแห่งการเรียนรู้และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และขออาราธนาคุณพระศรีรัตนตรัย และสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลาย ได้โปรดอำนวยพรให้การประชุมวิชาการในครั้งนี้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และขอให้ผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่านได้รับทั้งองค์ความรู้ มิตรภาพ และแรงบันดาลใจกลับไปอย่างเต็มเปี่ยม

(นายวิลาศ เฉลยสัตย์)

นายกสมาคม IEEE-PES Thailand



สารจาก นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) หรือ EEAAT

สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) หรือ EEAAT ขอแสดงความยินดีและขอบคุณคณะผู้จัดงาน ที่ได้ร่วมกันขับเคลื่อนการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025) ให้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีพัฒนาการที่เข้มแข็งยิ่งขึ้นในทุกปี ตลอดระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมา การประชุม EENET ได้กลายเป็นเวทีหลักของวงการวิศวกรรมไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งไม่เพียงเปิดโอกาสให้เกิดการนำเสนอผลงานวิจัยและนวัตกรรมทางวิศวกรรมเท่านั้น หากยังเป็นศูนย์กลางในการเชื่อมโยงองค์ความรู้ระหว่างภาคการศึกษา ภาคอุตสาหกรรม และภาครัฐ เพื่อสร้างการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นรูปธรรมในระบบพลังงานและระบบวิศวกรรมของประเทศ สมาคม EEAAT มุ่งมั่นในการส่งเสริมวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้าให้มีความเข้มแข็ง ทันสมัย และสามารถปรับตัวได้กับบริบทโลกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในยุคที่พลังงานหมุนเวียน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ การผลิตไฟฟ้าระดับชุมชน และการบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ กำลังกลายเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมอย่างยั่งยืน การประชุมในครั้งนี้จึงเป็นจุดรวมของแรงบันดาลใจ ความรู้ และเครือข่าย ที่จะช่วยเสริมสร้างศักยภาพของบุคลากรในสายวิศวกรรมไฟฟ้า ทั้งในระดับท้องถิ่นและระดับชาติ อันจะนำไปสู่การผลักดันเทคโนโลยีไทยสู่ระดับสากล

ผมขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ในฐานะเจ้าภาพหลัก ตลอดจนสมาคมพันธมิตร คณะกรรมการวิชาการ วิทยากร ผู้ส่งผลงาน ผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่านและคณะกรรมการดำเนินงานจัดการประชุมทุกฝ่าย ที่ร่วมกันหล่อหลอมความรู้และความร่วมมืออันทรงคุณค่าในครั้งนี้ ขอให้การประชุม EENET 2025 บรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ และเป็นอีกก้าวสำคัญของวงการวิศวกรรมไฟฟ้าไทยในการก้าวสู่อนาคต

(รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร)
นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)



สารจาก ประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET)
และรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ในยุคแห่งการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีและนวัตกรรมอย่างไม่หยุดยั้ง วิศวกรรมไฟฟ้าถือเป็นหนึ่งในสาขาวิชาหลักที่มีบทบาทสำคัญยิ่งในการขับเคลื่อนประเทศสู่อนาคต โดยครอบคลุมทั้งระบบพลังงานอัจฉริยะ การสื่อสารดิจิทัล ระบบควบคุมอัตโนมัติ ยานยนต์ไฟฟ้า ปัญญาประดิษฐ์ ไปจนถึงเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูง การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า หรือ EENET จึงเป็นเวทีที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการพัฒนาองค์ความรู้ และส่งเสริมให้เกิดการแลกเปลี่ยนมุมมองใหม่ทางวิชาการ ระหว่างนักวิจัย อาจารย์ นักศึกษา ทั้งจากสถาบันการศึกษา หน่วยงานวิจัย และภาคอุตสาหกรรมทั่วประเทศ การประชุมในครั้งนี้ไม่เพียงแต่เป็นโอกาสในการเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับชาติ หากยังเป็นพื้นที่แห่งแรงบันดาลใจที่ช่วยขับเคลื่อนการพัฒนาสู่การใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ และการแก้ไขปัญหาทางสังคมอย่างสร้างสรรค์และยั่งยืน

ในฐานะประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า และรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กระผมมีความยินดีและเป็นเกียรติอย่างยิ่งที่ได้มีส่วนร่วมในการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET2025) ซึ่งนับเป็นอีกก้าวสำคัญของความร่วมมือทางวิชาการที่ยืนหยัดมาอย่างต่อเนื่องกว่า 17 ปี แสดงให้เห็นถึงพลังของเครือข่ายวิชาการที่เข้มแข็งและมีเป้าหมายร่วมกันในการพัฒนาศักยภาพทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าให้ทัดเทียมนานาประเทศ

กระผมขอขอบคุณคณะผู้จัดงาน คณะกรรมการทุกฝ่าย ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ให้การสนับสนุน นักวิจัย นักวิชาการ ตลอดจนผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน ที่มีส่วนสำคัญในการทำให้การประชุมในครั้งนี้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าการประชุมครั้งนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นของความร่วมมือใหม่ ๆ และการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้น เพื่อเสริมสร้างเครือข่ายนักวิจัยรุ่นใหม่ เพิ่มศักยภาพของประเทศไทยในเวทีวิชาการโลก และวางรากฐานทางวิชาการที่มั่นคงสำหรับการพัฒนาชาติในระยะยาวต่อไป

(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)
ประธานคณะกรรมการเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET)
และรองอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สารจาก คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีความยินดีอย่างยิ่งในเป็นเจ้าภาพหลักในการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025) ภายใต้หัวข้อ “การสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีเพื่อการวิจัยมาพัฒนาท้องถิ่นส่งเสริมเศรษฐกิจสู่ชุมชน” จัดโดยสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE PES-Thailand) สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) (EEAAT) และเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET) ระหว่างวันที่ 28-30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

การประชุม EENET ได้แสดงให้เห็นถึงพลังแห่งความร่วมมือทางวิชาการที่มั่นคงและต่อเนื่องของเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ ในการส่งเสริมงานวิจัย เทคโนโลยี และนวัตกรรมด้านวิศวกรรมไฟฟ้าให้เจริญก้าวหน้า พร้อมตอบโจทย์ความเปลี่ยนแปลงในระดับโลก ไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด การใช้ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) การบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ หรือการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ที่กำลังเป็นแนวโน้มสำคัญในศตวรรษที่ 21 สำหรับคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การจัดประชุมครั้งนี้นับเป็นโอกาสสำคัญในการแสดงศักยภาพของคณาจารย์ บุคลากร นักศึกษา และเครือข่ายพันธมิตร ที่ร่วมกันเตรียมความพร้อมในการจัดงานอย่างมืออาชีพ ทั้งในด้านวิชาการ การประสานความร่วมมือ การจัดการองค์ความรู้ และการให้การต้อนรับอย่างอบอุ่นแก่ผู้เข้าร่วมประชุมทุกท่าน เรามุ่งหวังให้ EENET 2025 เป็นมากกว่าการประชุมวิชาการทั่วไป แต่เป็นเวทีแห่งแรงบันดาลใจที่จะผลักดันความคิดใหม่ นวัตกรรมใหม่ และความร่วมมือใหม่ระหว่างสถาบันอุดมศึกษา ภาคอุตสาหกรรม และภาครัฐ ให้เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรมในอนาคต ทั้งในระดับชาติและภูมิภาค

ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในความสำเร็จของการประชุมครั้งนี้ ทั้งผู้ทรงคุณวุฒิ คณะกรรมการวิชาการ วิทยากร ผู้ส่งผลงานวิจัย ผู้สนับสนุน และผู้เข้าร่วมงาน ที่ร่วมกันสร้างบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ การแลกเปลี่ยน และการพัฒนาที่เข้มแข็ง และขอให้ทุกท่านได้รับประสบการณ์อันมีค่าในการเข้าร่วมประชุมครั้งนี้ ทั้งในด้านวิชาการ มิตรภาพ และเครือข่ายที่ยั่งยืน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



สารจาก เลขานุการจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET2025)

ในโอกาสอันดียิ่งครั้งนี้ที่บุคลากร ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จะได้พิสูจน์ในประชาคมของวงการอุดมศึกษาให้ได้ทราบว่า บทบาทและภาระหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มีความสามารถที่จะจัดการประชุมวิชาการในระดับชาติ EENET2025 อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งไม่บ่อยครั้งนักที่พวกเราจะได้มีโอกาสสำคัญเช่นนี้ ในนามของคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 หรือ EENET2025 ขอเรียนในทุกท่านทราบว่า การที่คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EENET2025 เลือกมาจัดที่จังหวัดระนองในครั้งนี้ ก็ด้วยเหตุผลที่สำคัญคือจังหวัดระนอง เป็นจังหวัดที่มีมนต์เสน่ห์ในด้านการท่องเที่ยวเชิงธรรมชาติ และเชิงวัฒนธรรมที่สำคัญของประเทศไทย และเป็นประตูสู่ทะเลอันดามัน จึงมีความปรารถนาดีที่จะให้ผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการ EENET2025 ได้มีโอกาสมาสัมผัสอุ่นไอแห่งธรรมชาติที่งดงาม และวัฒนธรรมที่สืบทอดกันมาอย่างยาวนาน อีกทั้งจังหวัดระนองยังไม่เคยเป็นจังหวัดที่จัดการประชุมวิชาการในระดับชาติเช่นนี้ถือเป็นครั้งแรก คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EENET2025 จึงหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกท่านจะได้มีโอกาสเติมเต็มความสุข และได้พักผ่อน ในพื้นที่จังหวัดระนอง หลังจากที่ท่านได้เหนื่อยล้าในการผลิตงานวิจัย และเดินทางมาสู่จังหวัดระนอง จึงคาดหวังว่าท่านที่เข้าร่วมงานทุกท่านได้ใช้เวลานี้ให้คุ้มค่าที่สุดสำหรับการเข้าร่วมงานการประชุมวิชาการระดับชาติ EENET2025 และขอขอบคุณทุกท่านจากใจจริง

ในนามของคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ EENET2025 ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) หรือ IEEE PES - Thailand) และสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) หรือ EEAAT ที่ร่วมเป็นเจ้าภาพจัดงาน ขอขอบคุณหน่วยงาน และบริษัทภาคเอกชนทุกราย ที่ได้ให้การสนับสนุนการจัดงานจนสำเร็จลุล่วงด้วยดีมาตามลำดับ ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิ (Keynote Speakers) ตลอดจนวิทยากรทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาบรรยายพิเศษ และท้ายสุดขอขอบคุณคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมวิชาการ EENET2025 ที่ทำให้งานนี้ถูกบันทึกเป็นหน้าประวัติศาสตร์อีกครั้งสำหรับทีมงานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทุกคน

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว)
เลขานุการจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
(Secretary of EENET2025)





ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อารีย์ : จบปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังจาก University of Manchester Institute Science and Technology ประเทศอังกฤษ ปี พ.ศ. 2539 และปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Glasgow University ประเทศสกอตแลนด์ ในปี พ.ศ. 2543 เริ่มทำงานที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (มธ.) ในปี พ.ศ. 2536 จนถึงปัจจุบัน เคยเป็น Visiting Professor ที่มหาวิทยาลัย University of Alabama at Birmingham, USA ปัจจุบันดำรงตำแหน่งที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ผลงานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง พลวัตและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

รศ.ดร.นพพร ลีปรีชานนท์ : อุปนายกด้านการจัดประชุมวิชาการ สมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) IEEE-PES Thailand. อนุกรรมการเพื่อศึกษาแนวทางการพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ ในคณะกรรมการบริหารนโยบาย พลังงาน กระทรวงพลังงาน ปัจจุบันถูกยืมตัวช่วยราชการกระทรวง อว. ณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ในตำแหน่ง รองผู้อำนวยการ สกสว.

ดร.นฤดม นวลขาว : สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ หัวหนากลุมงานพัฒนาธุรกิจ ฝายนโยบายและยุทธศาสตร ความเชี่ยวชาญ - การวัดอุณหภูมิเชิงแผรังสี (Radiation Thermometry) - Photo Detector - Radiometry - Thermometry

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology : EENET) ได้จัดขึ้นเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2551 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยใช้ชื่อการประชุมเครือข่ายวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชมงคลโดยในปัจจุบันได้เปลี่ยนชื่อการประชุมเป็น “การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Network: EENET)” ซึ่งเป็นการประชุมเพื่อส่งเสริมและพัฒนาให้มีการเผยแพร่ผลงานวิจัย ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องระหว่างนักวิจัยทั่วประเทศ โดยในปัจจุบันมีสถาบันเครือข่ายประกอบด้วย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ทั้ง 9 แห่ง สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย มหาวิทยาลัยนครพนม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 3

การประชุมทางวิชาการนี้เป็นการประชุมที่ตอบสนองต่อยุทธศาสตร์การพัฒนาความเข้มแข็งทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อเป็นการแลกเปลี่ยนความรู้และความคิดเห็นระหว่างนักวิชาการและนักวิจัย ปี พ.ศ. 2568 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพจัดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (Electrical Engineering Network 2025: EENET2025) ระหว่างวันที่ 28 - 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น อำเภอเมือง จังหวัดระนอง

ครั้งที่	สถาบันเจ้าภาพ	ปี พ.ศ.ที่ จัดงาน
1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2551
2	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	2553
3	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2554
4	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	2555
5	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2556
6	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2557
7	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	2558
8	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	2559

ครั้งที่	สถาบันเจ้าภาพ	ปี พ.ศ.ที่ จัดงาน
9	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2560
10	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2561
11	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2562
12	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	2563

ครั้งที่	จัดโดยสมาคมร่วมกับสถาบัน	สถาบันเจ้าภาพ	ปี พ.ศ. ที่จัดงาน
13	IEEE-PES	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	2564
14	IEEE-PES	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	2565
15	IEEE-PES	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	2566
16	IEEE-PES	มหาวิทยาลัยนครพนม	2567
17	IEEE-PES + EEAAT	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2568
18	IEEE-PES + EEAAT	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	2569
19	IEEE-PES + EEAAT	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	2570
20	IEEE-PES + EEAAT	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	2571

ทำเนียบประธานเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (EENET)

(Chairman of the Electrical Engineering Network)

ลำดับที่	รายนาม/มหาวิทยาลัย
1	รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2551-2553) 
2	รองศาสตราจารย์ ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2554-2556) 
3	รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2557-2559) 
4	ศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2560-2562 และรักษาการอีก 1 ปี พ.ศ.2563 (มีการระบาดของ COVID-19)) 
5	รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2564-2566) 
6	รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร (วาระการดำรงตำแหน่งปี พ.ศ.2567-ปัจจุบัน) 

คณะกรรมการสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) IEEE-PES

นายวิลาส เฉลยสัตย์	ประธาน
นายสมชาย หอมกลิ่นแก้ว	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร ลีปรีชานนท์	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ดุลย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมพร สิริสำราญนุกูล	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงษ์ สุวรรณศรี	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล	กรรมการ
ดร.ประดิษฐพงษ์ สุขสิริถาวรกุล	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการ และอนุกรรมการ สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) : EEAAT

รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร	นายกสมาคมฯ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม	ที่ปรึกษาสมาคมฯ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย	ที่ปรึกษาสมาคมฯ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ที่ปรึกษาสมาคมฯ
นายอวยชัย ศิริวจนา	ที่ปรึกษาสมาคมฯ
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร	อุปนายกคนที่ 1
อาจารย์ธนวิชญ์ ชุลิกาวิทย์	อุปนายกคนที่ 2
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.เวคิน ปิยรัตน์	กรรมการ
อาจารย์บุญช่วย ทรัพย์มนชัย	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เดชา วิไลรัตน์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	กรรมการ
ดร.จิรพัฒน์ แสงทอง	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ เทพสาธร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ลือใจ	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.แคทรียา สุวรรณศรี	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาตร แสงเงิน	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพัฒนา นิรัคฆนาภรณ์	อนุกรรมการ
ดร.ซ๊อส อักษรกิตติ์	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ อาชีวะพนิช	อนุกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศุภร แท่นแก้ว	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี	อนุกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ณัฐพงษ์ ประพฤติ	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.กีรติ ชยะกุลคีรี	อนุกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี	อนุกรรมการ

คณะกรรมการที่ปรึกษาเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า

ศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	มทร.ธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์	มทร.ล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.กาณฑ์ เกิดชื่น	มทร.อีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มทร.สุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน	มทร.ล้านนา

คณะกรรมการเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า

รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด กองสุข	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สื่อเฉย	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ วิเชษฐ ทิพย์ประเสริฐ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ นางทิน	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูศักยฐ์ กมลขันติธร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิทย์ หายักวงษ์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ คนแรง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา สารสุข	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ อิศรมงคลรักษ์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สิทธิชัย บุญปิยทัศน์	กรรมการ
อาจารย์ ดร.รุ่งเพชร ก่องนอก	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ดุสิต อุทิศสุนทร	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ประกาศิต ปราบพาล	กรรมการ
ดร.ประภาพงษ์ วางทุกข์	กรรมการ
ดร.สมชาย ทรงศิริ	กรรมการ
นายสมบัติ จันทร์กระจ่าง	กรรมการ

ดร.อนุชิต อุไรรัตน์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำไร จันทร์พรม	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภันตภณ พรหมนิกร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ มงคลเกษตร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี ศรีสงคราม	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด กองสุข	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ณฐภัทร พันธ์คง	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัญญ์ชัย วุฒิธันยาวัฒน์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภพ ใจแข็ง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยัง สิงห์เจริญ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธราธิป ภู่ระหงษ์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปฏิวัติ บุญมา	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กรัณย์ ศิริจันทร์ชื่น	กรรมการ
อาจารย์ ดร.วีระ ธันยาภิรักษ์	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์	กรรมการ
อาจารย์ ดร.กัญจนา ชัยอมฤต	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ไพวรรณ เกิดตรวจ	กรรมการ
อาจารย์ ดร.วีระกุล ประทุมกุล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ลือใจ	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ภูริชญ์ งามคง	กรรมการ
อาจารย์ ณรงค์ นันทกุศล	กรรมการ
อาจารย์ สิษฐ รัตนคำ	กรรมการ
นายเจริญ เทพรังสฤษฎ์	กรรมการ
นายคณาธิป สพันธุพงษ์	กรรมการ
นายภิวัช ทันตานุวัฏฏ์	กรรมการ
ดร.สุธี เสริมสุข	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยงยุทธ นาราษฎร์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สายัณ ละอองโชค	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการอำนวยการ

อาจารย์ ดร.ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กร พวงนาค	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ เจ็ดวรรณะ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิดิ์เดช สุทธิวานิช	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กุลยศ สุวันทโรจน์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025

รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	ประธานกรรมการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์	กรรมการ
คณบดีคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ สุดคนึง	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร เหลืองอำพล	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรีสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะกิจ วัฒกีกำธร	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนา ดุสิตากร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ เดชฟุ้ง	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ สิงห์เสถียร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ คุณรัตนสิริ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรีสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์ วัฒกีกำธร	กรรมการ
อาจารย์ ดร.พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร	กรรมการ
อาจารย์ ดร.วารินี วีระสินธุ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านจัดทำเล่มบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ศักย์ ทับพลี	กรรมการ
อาจารย์ ดร.อัมภาภรณ์ พีรวณิชกุล	กรรมการ
ว่าที่ ร.ท. ณัฏฐกิตติ์ ฤทธิ์ทอง	กรรมการ
นายสมยศ แสงจันทร์	กรรมการ
นายธนพล สวนลำใย	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภควัต เกอะประสิทธิ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านสถานที่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ สิงห์เสถียร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะกิจ วัฒกีกำธร	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์ วัฒกีกำธร	กรรมการ
อาจารย์ ดร.คชพงศ์ สุมานนท์	กรรมการ
นางวรรณรัฐ คงสมบูรณ์	กรรมการ
นางสาวจันทร์เพ็ญ คำภูมี	กรรมการ
นางสาวเลิศลักษณ์ บัวทอง	กรรมการ
นางสาวนนทกาญจ์ อยู่อ่วม	กรรมการ
อาจารย์นเรศ ชลังสุทธิ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านสารสนเทศ

ดร.เชาวลิต สมบูรณ์พัฒนากิจ	ประธานกรรมการ
นายกฤษณ์ จำนงนิตย์	กรรมการ
นายปฐมพงศ์ จำนงค์ลาภ	กรรมการ
นายนพณรรจ์ เนตรสกูลณี	กรรมการ
นายอุเทน พรหมมิ	กรรมการ
นายกิตติ แย้มวิชา	กรรมการ
นายกุลภัทร พลายพลอยรัตน์	กรรมการ
นายศักดิ์เทพ จำนงค์ลาภ	กรรมการ
นายปิยะนนท์ ศุภจริยวิชัย	กรรมการ
นายปาโมกข์ รัตนตรัยาภิบาล	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านประชาสัมพันธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เณริศา ชัยศุภมงคลลาภ	ประธานกรรมการ
นางสาวฉวีวรรณ มะโนปา	กรรมการ
อาจารย์ดุริยางค์ คมขำ	กรรมการ
นายธีรเชษฐ์ แพ่งธีระสุขมัย	กรรมการ
นางสาวจุฑามาศ ฉัตรสุริยาวงศ์	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านจัดหารายได้และผู้สนับสนุน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กร พวงนาค	ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	กรรมการ
อาจารย์เกริก พวงนาค	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านยานพาหนะ

อาจารย์ ดร.ณทพร จินดาประเสริฐ	ประธานกรรมการ
นางสาวกุสุมา กิจสวัสดิ์	กรรมการ
นางสาวสุธาสินี ทับทอง	กรรมการ
นายปิยะพันธ์ บำเรอจิตร	กรรมการ
นายกฤษณะ โคกแพ	กรรมการ
นายไพฑูรย์ อาราเบีย	กรรมการ
นายเสกสรร กันธรส	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านงานทั่วไป

ผศ.ดร.ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย	ประธานกรรมการ
นายธนพล สวนลำใย	กรรมการ
นางสาวศิริกุล ภู่จำนงค์	กรรมการ
นางสาวสุกัญญา พินิจเวชการ	กรรมการ
นางสาวสุภาพร มีสาตร์	กรรมการ
นางธัชมนตร์ พินิจเวชการ	กรรมการ
นางสาววนรัตน์ มุกนนท์	กรรมการ
นางจุไรภรณ์ กิริติยกุลย์	กรรมการ
นางสาวธีร์นานา การุณย์นวสิริ	กรรมการ
นางสาวกมลวรรณ อาชวอาชานกุล	กรรมการ
นางสาวกชรัตน์ ฉิมคล้าย	กรรมการ
นางสาวจิตเกษม ใจแก้ว	กรรมการ
นางสาวอภิญญา ชุมนุมมณี	กรรมการ
นางกัญญ์ชิสา ธัญสิประเสริฐ	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านต้อนรับ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท	ประธานกรรมการ
อาจารย์วิเชียร มหาวัน	กรรมการ
อาจารย์วรัญชลีย์ ทวีชัย	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ฐณพล เวียงทอง	กรรมการ
นางสาวทิพรดา มุ่งดี	กรรมการ
นางสาวปลื้มจิตต์ นราภิรมย์ขวัญ	กรรมการ
นางสาวศศิชานันท์ ฤกษ์เรืองชัย	กรรมการ
นางสาวปิยภรณ์ มีศิริ	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ศักย์ ทับพลี	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านทะเบียน

อาจารย์ ดร.ฐณพล เวียงทอง	ประธานกรรมการ
นางสาวเนตรนภา แสงเงิน	กรรมการ
นางสาวธีร์นานา การุณย์นวสิริ	กรรมการ
นางกัญญ์ชิสา ธัญสิประเสริฐ	กรรมการ
นางสาวสุภาพร มีสาตร์	กรรมการ
นางสาวกมลวรรณ อาชวอาชานกุล	กรรมการ
นางธัชมนตร์ พินิจเวชการ	กรรมการ
นางสาวอรจิรา พานอุป	กรรมการ
นางสาวอภิญญา ชุมนุมมณี	กรรมการ
อาจารย์วรัญชลีย์ ทวีชัย	กรรมการและเลขานุการ

คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ EENET2025 ด้านติดตามและประเมินผล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ ถิ่นพระบาท	ประธานกรรมการ
นางสาวรจนา สร้อยแก้ว	กรรมการ
นางกุสุมา ระงับภัย	กรรมการ
นายเสกสรร กันธรส	กรรมการและเลขานุการ

รายนามผู้อ่านบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุดเจือจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เบียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรินทร์ สุดคนึง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชฎา ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ประสพโชค โห้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วันไชย คำเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิต แก้วดวงตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ดนุพล คำปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ อาชีวะพนิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา สาคะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.ภัควัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ อุดมหรรษากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ระวี ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.ชูธง สัมมัตตะ	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระ รัตนงาม	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปลายเนตร	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาติ โสนะแสง	มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ ดร.กรุง ลือวัฒนา	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รองศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ อิศรมงคลรักษ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
รองศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ พรมที	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเลิศ สื่อเฉย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ มนต์ประภัสสร	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ หวังนิพพานโต	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รองศาสตราจารย์พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์องอาจ แสดใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ ศิระวัฒนานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รายนามผู้อ่านบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันตภณ พรหมนิกร	มหาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัควี หะยะมิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เตียเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรร รัตนสัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทองเพียร พรมบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรากร ปิ่นธุรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ สันติมาลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ ชูพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกรณ์เกียรติ์ เศวตเมธิกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราชญ์ อัศวนรากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร อูปแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุรัสกร อยู่สุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนา ดุสิตากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัส บุญเทียรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระยุทธ คุณรัตนสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ เดชฟุ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ สิงห์เสถียร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎาพร สถานทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา มงคลไวย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา แซ่เฮ้ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิ่งกาญจน์ ปวนสุรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รายนามผู้อ่านบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ ทุนคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุพดี หัตถสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนนท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ สากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรหมพักตร์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพล โรจนประดิษฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษม เนื้อแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ครองกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารักษ์ บุญมาตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันตรี โคมพิทยา	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสรี ขุนไชย	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จีรวรรณ พัชรประกิติ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกานต์ จันทร์เสรีวิทยา	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภพ ใจแข็ง	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ คนแรง	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐที ถึงสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิสิทธิ์ ลุมชะเนาว์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ รักผกาวงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปวัฒวงศ์ บำรุงขันท์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ จันทร์จิระ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฏฐ์ โอธนาทรัพย์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรณิภา บริบูรณ์สุขศรี	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ สิริโปราณานนท์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำไร จันทร์พรม	สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยพล ธงชัยสุรัชต์กูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รายนามผู้อ่านบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาพร สิทธิวงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักยฐ์ กมลขันติธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วินัย เมธาวิทิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกพล อนุสุเรนทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นชิรัตน์ ราชบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กมลทิพย์ วัฒกีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะกิจ วัฒกีกำธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติศักดิ์ ถึงสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์โกวิท พิเภก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไชยยันต์ ทองสองยอด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาพร เสือเทศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิ์ชัย บุญปิยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระศักดิ์ สมศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประกาศิต ศรีทะแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑูรย์ พรมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ครองกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ฤทธิ์ อุปพงษ์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทศพล มานะศรี	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธราธิป ภู่ระหงษ์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ใต้ศรีโคตร	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประสพสุข สร้อยทอง	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชพงศ์ นับถือตรง	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์พัทธ์ มังคละคีรี	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยตรี ภูมินทร์ ฮงมา	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วีรธรรม ไชยยงค์	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิทธิชัย เจริญราช	มหาวิทยาลัยนครพนม

รายนามผู้อ่านบทความ (ต่อ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์หฤษฎ์ คล่องดี	มหาวิทยาลัยนครพนม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษฎา พรหมพินิจ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยวุฒิ วุทธิสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิภาวัลย์ นาคทรัพย์	มหาวิทยาลัยสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภาวดี ชัยวิวัฒน์ตระกูล	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิระศักดิ์ สินสุขอุดมชัย	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปัญญา มาลีวัตร	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย แซ่ลี่	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สาโรจน์ หลั่งน้ำทิพย์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธเนศ ภู่กัน	สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3
ดร.มงคล มีลุน	กรมสอบสวนคดีพิเศษ (DSI)
ดร.ธวัช ชูชิต	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ดร.ณัฐพล ปันมาละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.วัยอาจ สายคง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.สุรพัศ ลาภวิสุทธิสาโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ฐาปนา นามประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ดร.คชพงศ์ สุมานนท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.ณัฐวัฒน์ จันทะเสน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.ยุทธนา สรวลสรรค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ดร.ทศพล ทิพย์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.พาศิกา เตมีประเสริฐกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.วินัย พรพจน์รัตนะกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร.กวีวัชร์ ทัติวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ดร.ขนิษฐา วรรณคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.มาลียา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ศรัณย์ ฉัตรธัญญกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.กัญจนา ชัยอมฤต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

รายนามผู้อ่านบทความ (ต่อ)

ดร.นพณัฐ จิตกรียาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.รุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.วีระ ธันยาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ณรงค์กรณ์ อุทาทิพย์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ดร.ดุสิต อุทิศสุนทร	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ดร.วีรพันธ์ แซ่ด่าน	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ดร.ภานุวัฒน์ แตระกุล	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ดร.ประกาศิต ปราบพาล	สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1
ดร.กนกวรรณ นนทพจน์	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
อาจารย์อภิราช รัตนอุดมพิสทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์นเรศ ชลังสุทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์สุธี รุกขพันธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์วัฒนา มาคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ธีรนนท์ ไชยคุณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
อาจารย์ภูเมศ เดชนาราพัฒน์	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณา

สาขาบทความวิจัย	จำนวนบทความ
1. ไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power) (PW)	36
2. อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร (Electronic, Circuit and Communication) (EC)	17
3. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) (PE)	10
4. คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (Computer and Information Technology) (CP)	17
5. ระบบควบคุมและการวัด (Control Systems and Instrumentation) (CT)	10
6. ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) (DS)	2
7. พลังงานและการอนุรักษณ์พลังงาน (Energy and Conservation of Energy) (ES)	37
8. นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (Innovation and Invention) (IN)	45
9. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (General Electrical Engineering) (GN)	36
10. หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Special Session on Electrical Engineering) (SS1)	1
11. งานวิจัยด้านการบริหาร การจัดการด้วยขบวนการร่วมกับเทคโนโลยีเพื่อเกิดการพัฒนา (SS2)	3
12. หัวข้อวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม ปวช. และ ปวส. (SS3)	2
รวมทั้งหมด	216

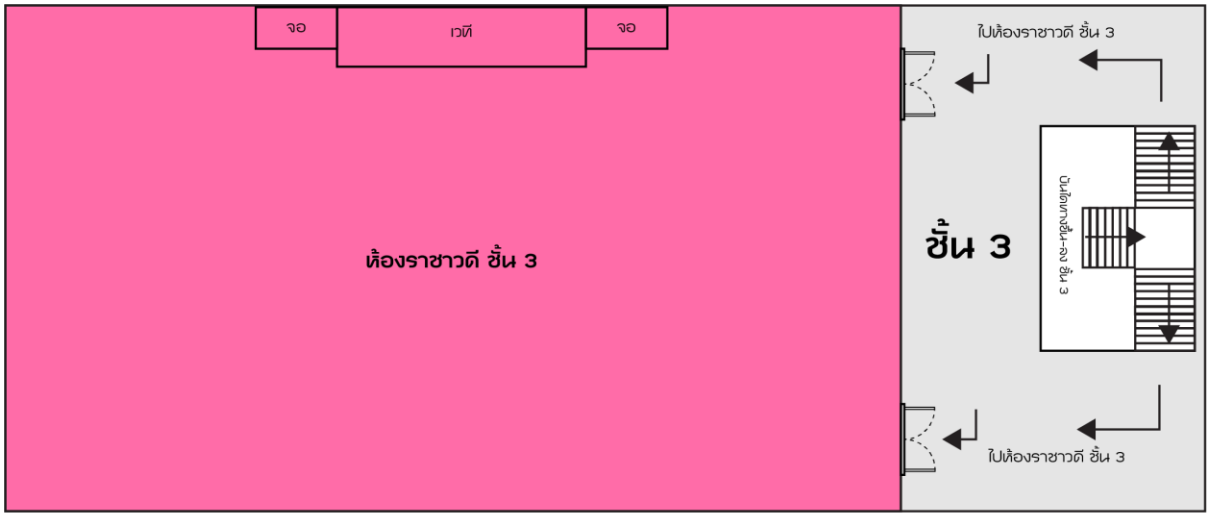
สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน

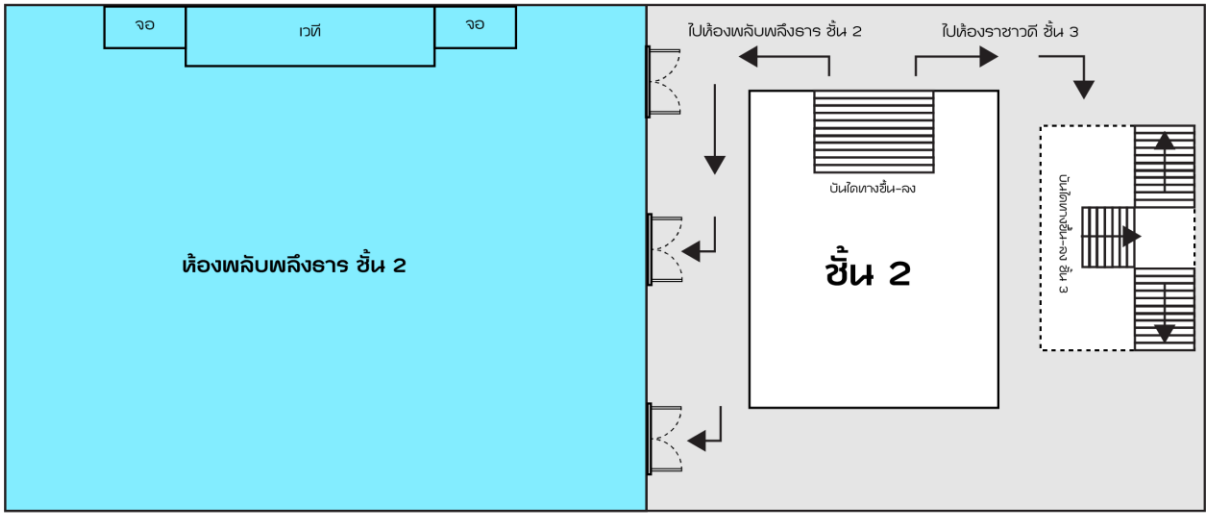
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	24	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	21	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	18	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	17	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	16	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	14	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	13	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	10	บทความ
มหาวิทยาลัยนครพนม	9	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	6	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	5	บทความ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	5	บทความ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	4	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม	4	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	4	บทความ
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	4	บทความ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	3	บทความ
มหาวิทยาลัยศิลปากร	3	บทความ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	3	บทความ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2	บทความ
มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี	2	บทความ
มหาวิทยาลัยทักษิณ	2	บทความ
มหาวิทยาลัยบูรพา	2	บทความ

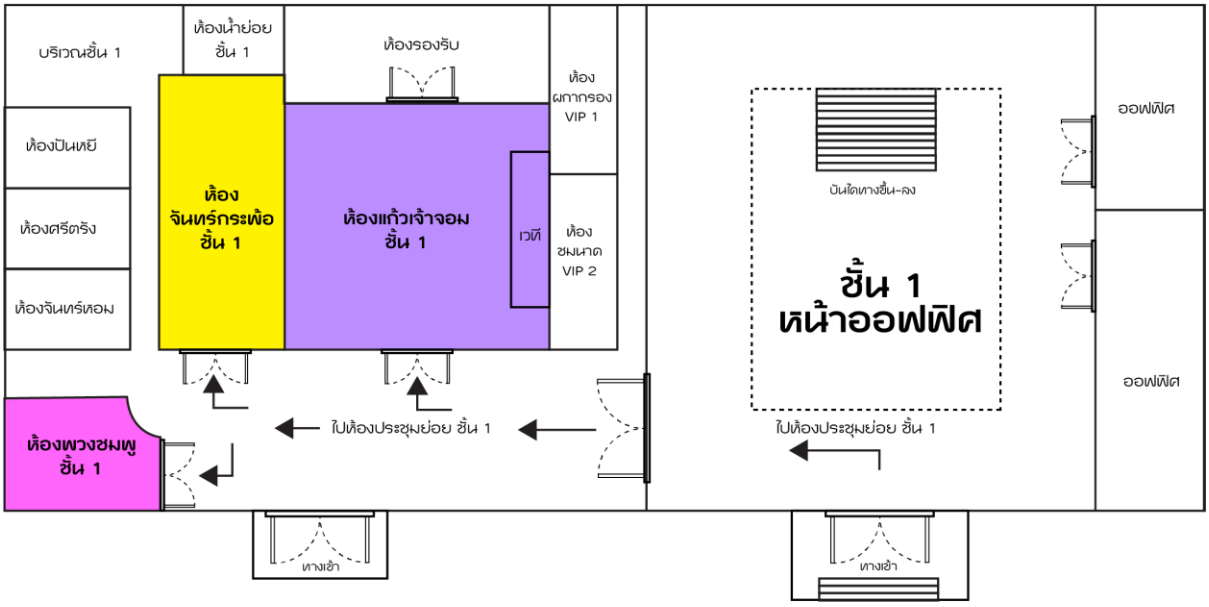
สรุปจำนวนบทความที่ผ่านการพิจารณาแยกตามหน่วยงาน (ต่อ)

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์	2	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี	2	บทความ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1	2	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	2	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต	1	บทความ
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์	1	บทความ
มหาวิทยาลัยรังสิต	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา	1	บทความ
มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด	1	บทความ
โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก	1	บทความ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2	1	บทความ
สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3	1	บทความ
สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา	1	บทความ
รวมบทความ	**216**	**บทความ**
รวมหน่วยงานทั้งหมด	**40**	**หน่วยงาน**

แผนผังห้องประชุมและห้องนำเสนอผลงาน (Floor Plan)









กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันพุธที่ 28 พฤษภาคม 2568	
08.00 - 12.00 น.	ลงทะเบียน
08.30 - 10.00 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
10.00 - 10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.15 - 12.00 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
12.00 - 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
14.30 - 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45 - 16.30 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
18.00 - 19.30 น.	Dinner Talk/ Welcome Party
วันพฤหัสบดีที่ 29 พฤษภาคม 2568	
08.00 - 12.00 น.	ลงทะเบียน
08.30 - 09.45 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
09.45 – 10.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.05 - 10.40 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET2025)
10.40 – 11.10 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 1: ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อารีย์ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หัวข้อบรรยาย การคำนวณหาจุดทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการจำลองสถานการณ์เชิงพลวัต: มีความแม่นยำเพียงพอหรือยัง
11.10 – 11.35 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 2: ดร.นฤดม นวลขาว : สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ หัวข้อบรรยาย มาตรวิทยากับอุตสาหกรรม
11.35 – 12.00 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 3: รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร ลีปรีชานนท์ : รองผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สก.สว.) และกรรมการสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE-PES THAILAND) หัวข้อบรรยาย พลังการร่วมลงทุน: สะพานร่วมงานวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าสู่เศรษฐกิจชุมชน
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
14.30 - 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45 - 16.30 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
17.00 - 18.00 น.	การประชุมคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า EENET
18.00 – 22.00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมการประชุม EENET2025 / มอบรางวัลบทความดีเด่น และ พิธีมอบธงเจ้าภาพ EENET2026 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันศุกร์ที่ 30 พฤษภาคม 2568	
08.00 - 12.00 น.	ลงทะเบียน
08.30 - 10.00 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
10.00 - 10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
10.15 - 12.00 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ Parallel Session
14.30 - 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง
14.45 - 17.30 น.	คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 ประชุมสรุปผลการดำเนินงาน



กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันพุธที่ 28 พฤษภาคม 2568				
08.00 – 12.00 น.	ลงทะเบียน (Registration)			
08.30 - 10.00 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 1-1)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	GN	IN	ES	PW
Paper ID	GN-902 GN-905 GN-907 GN-908 GN-909 GN-910	IN-801 IN-803 IN-805 IN-806 IN-807 IN-808	ES-701 ES-702 ES-703 ES-704 ES-707 ES-708	PW-104 PW-105 PW-107 PW-108 PW-110 PW-111
Session Chairman	ผศ.วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน	ผศ.ดร.กันตภณ พรหมนิกร	ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ	รศ.ดร.จงลักษณ์ พาหะชา
Vice - Chairman	ผศ.ชาคริต วินิจธรรม	ผศ.ประสิทธิ์ มงคลเกษตร	ผศ.สันติ นรากุลนันท์	ดร.พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร
10.00 – 10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
10.15 - 12.00 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 1-2)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	GN	IN	ES	PW
Paper ID	GN-911 GN-913 GN-914 GN-915 GN-916 GN-917 GN-918	IN-809 IN-810 IN-811 IN-812 IN-813 IN-814 IN-815	ES-709 ES-710 ES-711 ES-712 ES-713 ES-714 ES-715	PW-113 PW-114 PW-115 PW-116 PW-117 PW-118 PW-119
Session Chairman	ผศ.สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์	ผศ.ดร.เจษฎา สารสุข	ผศ.ดร.ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	ผศ.พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล
Vice - Chairman	ผศ.ดร.อนนท์ นำอิน	ผศ.ธราธิป ภู่ระหงษ์	ดร.พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร	ดร.ศุภชัย แก้วพวง
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน			



กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันพุธที่ 28 พฤษภาคม 2568				
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 1-3)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	GN	IN	ES	PW
Paper ID	GN-919 GN-920 GN-921 GN-922 GN-923 GN-925	IN-817 IN-818 IN-819 IN-820 IN-821 IN-822	ES-717 ES-718 ES-719 ES-721 ES-722 ES-723	PW-120 PW-122 PW-124 PW-126 PW-128 PW-130
Session Chairman	ผศ.วุฒิชัย ส่างาม	รศ.ดร.อภิชฏา ทองรักษ์	ผศ.ดร.ปภัชกรณ์ อารีย์กุล	รศ.ดร.จงลักษณ์ พาหะชา
Vice - Chairman	ผศ.ดนัย ทองธวัช	ผศ.ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น	ดร.ณัฐวุฒิ สมพงษ์	ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ
14.30 – 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
14.45 – 16.30 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 1-4)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	PE	IN	ES	GN
Paper ID	PE-301 PE-302 PE-303 PE-304 PE-305	IN-824 IN-825 IN-827 IN-828 IN-829 IN-831 IN-849	ES-724 ES-726 ES-728 ES-729 ES-731 ES-733	GN-904 GN-924 GN-926 GN-927 GN-928 GN-933
Session Chairman	รศ.ดร.ประสพโชค โห้ทองคำ	ผศ.ดร.เอกวิทย์ หายักวงษ์	ผศ.ดร.ธีระพงษ์ บุญรักษา	ผศ.สถาพร เสือเทศ
Vice - Chairman	ผศ.ดร.อนุศักดิ์ บิสลาม	ผศ.คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ์	ผศ.ดร.พรหมพักตร์ บุญรักษา	อ.นเรศ ชลังสุทธิ์
18.00 - 19.30 น.	Dinner Talk / Welcome Party			



กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันพฤหัสบดีที่ 29 พฤษภาคม 2568				
08.00 – 12.00 น.	ลงทะเบียน (Registration)			
08.30 – 09.45 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 2-1)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	GN	IN	ES	PW
Paper ID	GN-934 GN-935 GN-936 GN-937 GN-939	IN-832 IN-835 IN-838 IN-840 IN-842	ES-734 ES-735 ES-736 ES-738 ES-739	PW-131 PW-132 PW-133 PW-134 PW-136 PW-142
Session Chairman	ดร.ดุสิต อุทิศสุนทร	ผศ.ดร.กำไร จันทร์พรม	รศ.ดร.สมชาติ โสนะแสง	รศ.ดร.ศุภชัย ปลายเนตร
Vice - Chairman	ดร.ประกาศิต ปราบพาล	อ.สิษฐ รัตนคำ	อ.นิวัทธ์ วรรณวงศ์	ผศ.ธเนศ ภู่กัน
09.45 – 10.00 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
10.05 – 10.40 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)			
10.40 – 11.10 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 1: ศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อารีย์ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หัวข้อบรรยาย การคำนวณหาจุดทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการจำลองสถานการณ์เชิงพลวัต: มีความแม่นยำเพียงพอหรือยัง			
11.10 – 11.35 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 2: ดร.นฤดม นวลขาว : สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ หัวข้อบรรยาย มาตรวิทยากับอุตสาหกรรม			
11.35 – 12.00 น.	การบรรยายพิเศษ (Keynote Speakers) Keynote 3: รองศาสตราจารย์ ดร.นพพร ลีปรีชานนท์ : รองผู้อำนวยการสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สก.สว.) และกรรมการสมาคมไฟฟ้าและพลังงานไอทริปเปิลอี (ประเทศไทย) (IEEE-PES THAILAND) หัวข้อบรรยาย พลังการร่วมลงทุน: สะพานร่วมงานวิจัยวิศวกรรมไฟฟ้าสู่เศรษฐกิจชุมชน			
12.00 – 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน			

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันพฤหัสบดีที่ 29 พฤษภาคม 2568				
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 2-2)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	IN	CP	EC	PW
Paper ID	IN-843 IN-844 IN-846 IN-847 IN-850 IN-851 IN-852	CP-401 CP-402 CP-403 CP-404 CP-405 CP-406	EC-201 EC-202 EC-203 EC-205 EC-206 EC-207	PW-137 PW-138 PW-139 PW-140 PW-141 PW-143
Session Chairman	ผศ.ชูศักยฐ์ กมลขันติธร	รศ.ดร.วรินทร์ สุดคนึง	รศ.ดร.กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี	ดร.ฤทธิชัย ราชแป้น
Vice - Chairman	ดร.ธวัช ชูชิต	ผศ.ดร.เกรียงไกร เหลืองอำพล	ดร.คชพงศ์ สุมานนท์	ผศ.ดร.อานนท์ สิงห์เสถียร
14.30 – 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
14.45 – 16.30 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 2-3)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session		IN	CT	EC
Paper ID	เตรียมห้องประชุม คณะกรรมการ เครือข่าย วิศวกรรมไฟฟ้า EENET 2025	IN-853 IN-854 IN-855 IN-856 IN-857 IN-858 IN-859	CT-501 CT-502 CT-503 CT-504 CT-505 CT-506	EC-208 EC-209 EC-210 EC-211 EC-212 EC-213
Session Chairman	-	ผศ.ดร.วารุณี ศรีสงคราม	รศ.ดร.ดนุพล คำปัญญา	ผศ.ดร.วิชัย ครองกิจศิริ
Vice - Chairman	-	ผศ.ดร.จรัญ คนแรง	ดร.ฐาปนา นามประดิษฐ์	ผศ.ดร.เกรียงไกร เหลืองอำพล
17.00 – 18.00 น.	การประชุมคณะกรรมการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า EENET 2025			
18.00 – 22.00 น.	งานเลี้ยงรับรองผู้เข้าร่วมการประชุม EENET2025 / มอบรางวัลบทความดีเด่น และ พิธีมอบธงเจ้าภาพ EENET2026 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย			

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันศุกร์ที่ 30 พฤษภาคม 2568				
08.00 – 12.00 น.	ลงทะเบียน (Registration)			
08.30 - 10.00 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 3-1)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	EC	CP , DS	PE	GN
Paper ID	EC-214 EC-215 EC-216 EC-219 EC-220	CP-407 CP-408 CP-410 CP-412 CP-414 DS-601 DS-602	PE-306 PE-307 PE-308 PE-309 PE-310	GN-942 GN-944 GN-945 GN-946 GN-947 GN-949
Session Chairman	ดร.มารุต รักษา	ผศ.สัญญา ผาสุก	ดร.สลักจิตร แบลนชาร์ด	รศ.ดร.อภิชฏา ทองรักษ์
Vice - Chairman	ดร.สุนทร รุ่งเรืองใบหยก	ผศ.สายัณ ละอองโชค	ดร.ธวัช ชูชิต	ผศ.ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น
10.00 – 10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
10.15 - 12.00 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 3-2)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session	SS1 , SS2 , SS3	CP	ES	CT
Paper ID	SS1-1001 SS2-2001 SS2-2002 SS2-2003 SS3-3003 SS3-3005	CP-415 CP-416 CP-417 CP-418 CP-419 CP-420	ES-741 ES-742 ES-743 ES-744 ES-745 ES-746 ES-747	CT-507 CT-508 CT-510 CT-511
Session Chairman	ผศ.ดร.ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล	ผศ.สัญญา ผาสุก	ผศ.ดร.พิทักษ์ บุญนุ่น	ผศ.ธีระพงษ์ ฉิมเพชร
Vice - Chairman	ดร.ธวัช ชูชิต	ดร.มารุต รักษา	ดร.นพณัฐ จิตกรียาน	ผศ.ดร.มนัส บุญเทียรทอง
12.00 – 13.00 น.	พักรับประทานอาหารกลางวัน			

กำหนดการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 (EENET 2025)

วันที่ 28 – 30 พฤษภาคม 2568 ณ เฮอริเทจ แกรนด์ คอนเวนชั่น จังหวัดระนอง

วันศุกร์ที่ 30 พฤษภาคม 2568				
13.00 - 14.30 น.	การนำเสนอบทความ (Presentation 3-3)			
Room	ราชาวดี	แก้วเจ้าจอม	จันทร์กระพ้อ	พวงชมพู
Session				PW
Paper ID	-	-	-	PW-101 PW-102 PW-103 PW-109 PW-135
Session Chairman	-	-	-	รศ.ดร.สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์
Vice - Chairman	-	-	-	ผศ.ดร.พูนศรี วรรณการ
14.30 – 14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง			
14.45 - 17.30 น.	คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17 ประชุมสรุปผลการดำเนินงาน			

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า

ครั้งที่ 17

EENET 2025

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-101	ผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีต่อทิศทางที่แตกต่างกัน นเรศ ชลังสุทธิ์, อินทัช ฉันทสัมพันธ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	1
PW-102	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีแบบหมุนตามแสง มนัส บุญเทียรทอง, นเรศ ชลังสุทธิ์, ศศิกา สนธิกัณฑ์, รัตติยา สิงห์สอน, สุรเชษฐ เดชฟุ้ง, พูนศรี วรรณการ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	5
PW-103	การลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวปเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ นเรศ ชลังสุทธิ์, พงศธร นาเวียง, ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร, พนา ดุสิตากร, สุรสิทธ์ ประกอบกิจ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	9
PW-104	โมเดลและการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด กฤติพงษ์ ผลอนันต์[1] ธีรภัทร วงษ์กำภู[1] ชุติพนธ์ วิเศษพันธ์[1] กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[2] ประหยัด กองสุข[1] และวัชรากร ปิ่นธุรัตน์[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	13
PW-105	การจำลองเพื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้า อาทิตย์ ขาวรุ่งเรือง[1] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	17
PW-107	การออกแบบพยากรณ์ไฟด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ ปิยะบุตร แก้วรัชนี, ชัยมงคล เพ็งเต็ม, กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ และ ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	21
PW-108	สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบ V2G ที่ควบคุมด้วยความเฉื่อยเสมือนเพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพความถี่ในระบบที่มีการใช้ทรัพยากรแบบอินเวอร์เตอร์ในสัดส่วนสูง ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล[1] กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1] และ ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1*] [1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	25
PW-109	การจำลองปัจจัยด้านพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, นเรศ ชลังสุทธิ์, นาวิน รอดเรือง, พูนศรี วรรณการ, กฤธพล ธรรมวิรัตน์, สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	29

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-110	การแยกแยะระหว่างการผิดพร่องลงดินกับเพาเวอร์สวิงของรีเลย์ระยะทางด้วยวิธีการอนุพันธ์อันดับสอง สิทธิพันธ์ เธียรชาติอนันต์[1*] ธีรธรรม บุณยะกุล[1] และ นพดล ฉาบแก้ว[1] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	33
PW-111	การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดินที่มีผลต่อค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*] จักรพันธ์ นรเหรียญ[1] วลัญช์ ทรรศนโมไนย[1] วุฒิไกร เกตุบุตร[1] จุฑาศินี พรพุทธศรี[2] และ ธวัช ชูชิต[3] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]สาขาวิชาครุศาสตรอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ	37
PW-113	การวางแผนเพิ่มสมรรถนะโดยลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมตัวเปลี่ยนเฟส กุสุมา เนาว์ประเสริฐ, วีรดา เอ่งฉ้วน, นเรศ ชลังสุทธิ์, สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[*] [*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	41
PW-114	การศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบกราวด์กริดในรูปแบบ L-Shaped ซึ่งมีแท่งหลักดินเป็นแบบกระจายของสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยเป็นผลมาจากแรงดันเกิน กรุง ลือวัฒนา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา	45
PW-115	การออกแบบหาขนาดและตำแหน่งของ DG ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบจำหน่ายของ IEEE 33 Bus system สำหรับ PV หนึ่งจุด และ Wind Turbine สองจุด เสวก ประทุมเมศ, สุรศักดิ์ น้อยทับทิบ, วรรณวินิต วิจิตรเตมีย์, กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ และ บุญยัง ปลั่งกลาง[*] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	49
PW-116	การจัดการพลังงานผสมผสานแบบฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์สำหรับชุมชนพื้นที่ห่างไกลด้วยระบบ PV-HP-BESS ด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค อสิวุฒิ บุญเจียม[1] ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1] พิมพ์นภัส ภูมิกิตติพิชญ์[2] ณัฏฐกิตติ์ เอี่ยมสมบูรณ์[2] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1*] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [2]สาขาสัมคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	53

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-117	การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม Sokban Sek[1] อสิวุฒิ บุญเจียม[1] ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ[1] ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล[1] พิมพ์นภัส ภูมิกิตติพิชญ์[2] ณัฏฐกิตติ์ เอี่ยมสมบูรณ์[2] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [2]สาขาสัมคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	57
PW-118	การตรวจจับความผิดพร่องของแบริ่งและขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบอัตโนมัติ พิทักษ์ บุญนุ่น[1*] คนโท ปานทองคำ[1] ตุลยวัต นวลมุล[1] และอนุวรรตน์ ศิริเพ็ชร[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	61
PW-119	ผลกระทบจากสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV ศิริพงษ์ วัฒนศักดิ์ศิริ[1*] พินิจ ศรีธร[1] มงคล ด่านบำรุงตระกูล[1] ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[1] และ นายณฐพล ชูสกุล[2] [1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา [2]การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จังหวัดนครราชสีมา	65
PW-120	การป้องกันไมโครกริดแบบโครงข่าย: สถาปัตยกรรม ความท้าทาย และแนวโน้มการวิจัยในอนาคต สุรชา พนันชัย[1] บุญเติม อุ่นวิเศษ[2] สิทธเดช หมอกมีชัย[3] ณัฐชนันท์ ปลายเนตร[4] และ ศุภชัย ปลายเนตร[5] [1,3]บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม [4]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม [2,5]สาขาวิชาไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	69
PW-122	Adaptive Successive Over-Relaxation Approach for Unbalanced ZIP Load Power Flow Analysis in Non-Radial Networks Nattavit Piamvilai[1*] Tosapon Intaraumnauy[2] and Touchakorn Loedchayakan[2] [1*]Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok [2] Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok	73
PW-124	แบบจำลองการใช้งานบล็อกเชนกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ภายใต้แนวคิดความเป็นกลางทางคาร์บอน เบญจมาภรณ์ ภูมี[1*] นรุตม์ชัย ทรัพย์เจริญกูล[1] ปุรเชษฐ์ ตราหยก[1] พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[1] และ วรรัตน์ ปัตรประกร[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	77

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-126	การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารพิพิธภัณฑ์ด้วยการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่าง กรณีศึกษา ห้องจัดแสดงในอาคารจัดแสดงเครื่องทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา วิกร วงษ์เสถียร1 วราภรณ์ ลือใจ[1] สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] ตฤณภพ บุญเส็ง[1] และ นิยวดี ศรีสุวรรณ[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	81
PW-128	การศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูงกระแสตรง (DC) ในช่วง 0 kV ถึง 140 kV ประกาศิต ศรีทะแก้ว[1] วิฑูรย์ พรมมี[2] ดนัยกฤต ใจปาละ[3] และ ณัฐภัทร อนุศักดิกุล[4] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย	85
PW-130	การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การประจุยานยนต์ไฟฟ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่โดยใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ด้วยการจำลองมอนติคาร์โล ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ[1] ณตฤณ จันทร์จำรัส[3] กัญญณัช ฤทธานนท์[1] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[2*] [1]สถาบันนวัตกรรมหุ่นยนต์และยานยนต์อัตโนมัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ [2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [3]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	89
PW-131	การลดแรงบิดสั่นสะเทือนขณะสตาร์ทแบบโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงคู่ด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน พิชัย อารีย์[1*] [1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	93
PW-132	จุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไมโครกริดอิสระ อานนท์ พ่วงชิงงาม[1*] ปฏิวัติ บุญมา[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	97
PW-133	การประเมินสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี ศักดินนท์ ตันละมัยงาม, พิจักขณา ศรีฉ่ำพันธ์, ศุภฤกษ์ สนามเขต, สุรพล โรจนประดิษฐ, สยามรัฐ เพิกอาภรณ์ และ เฉลียว เกตุแก้ว สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์สุพรรณบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	101

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-134	การพัฒนาระบบแจ้งเตือนไฟดับสำหรับระบบจำหน่ายด้านแรงดันต่ำ ปิยะ ศรีสุขขี, นนท์ปวิธ ฝัดศิริ, ขจรศักดิ์ เทพผดุง, สุรพล โรจนประดิษฐ, สยามรัฐ เพิกอาภรณ์, เฉลียว เกตุแก้ว สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์สุพรรณบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	105
PW-135	เทคนิค FMECA สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคา นาวิน รอดเรือง[1] ปพน งามประเสริฐ[2] ณัชพล เรืองทรัพย์[1,3] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [3]การไฟฟ้านครหลวง	109
PW-136	การยกระดับเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้ UPFC ชวลิต ทองดี[1] ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1] ยุทธณา คงจีน[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] กาณฑ์ เกิดชื่น[1] และ นพณัฐ จิตกรียาน[1*] [1*]หน่วยวิจัยไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา	113
PW-137	การตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา สลักจิตร แบลนชาร์ด[1*] ไพศาล คงเรือง[2] อัซวา มามะ อัฟนันท์ กะลูแป และ ฮานาฟี ลือแบกาเส็ง [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา	117
PW-138	การศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของการต่อลงดินจากประเภทและการจัดเรียงของแท่งต่อลงดินที่แตกต่างกัน อัมพร บุญราม[1] สลักจิตร แบลนชาร์ด[1*] และ ไพศาล คงเรือง[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2]หลักสูตรเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา	121
PW-139	การศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสุ่มโดยใช้จุดเชื่อมต่อทั่วไปด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด นิวัทธ์ วรรณวงศ์[1] สิษฐ รัตนคำ[1] สมชาติ โสนะแสง[2] ประกาศิต ปราบพาล[3*] [1]ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2, สกลนคร [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม [3]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1,อุดรธานี	125

บทความวิจัยสาขา PW ไฟฟ้ากำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PW-140	การเลือกปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดจากความผิดพร่อง นิติกร เกษพรหม, สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	129
PW-141	ผลของสารทำงานของระบบ ORC ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพโดยใช้วิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ฮามียี ยูโซะ[1] วสุ สุขสุวรรณ[2] และ มักตาร์ แวหะยี[2*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [2]ศูนย์วิจัยชีวมวล พลังงานและเทคโนโลยียั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	133
PW-142	การออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ภัททิยา พยอมหอม[1] และ อรรถ พยอมหอม[2*] [1]โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ [2]ฝ่ายออกแบบระบบไฟฟ้าและงานวิศวกรรมโยธา การไฟฟ้านครหลวง	137
PW-143	เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวที่เหมาะสมสำหรับการประจุแบตเตอรี่แบบแฟลชรถโดยสารสาธารณะไฟฟ้าในระบบจำหน่ายปฐมภูมิ กิตติวงศ์ สุธรรมโน[1] นพณัฐ จิตกรียาน[1] ชวลิต ทองดี[1] ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1] สมศักดิ์ วัชระคุปต์[1] วุฒิชัย สง่างาม[1] ธงชัย คล้ายคลึง[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] ยุทธณา คงจีน[1*] และ กาณฑ์ เกิดชื่น[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา	141

บทความวิจัยสาขา EC อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
EC-201	วงจรความต้านทานค่าลบขึ้นกับความถี่แบบใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นหลัก นัชนัยน์ รุ่งเหมือนฟ้า และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์* คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	145
EC-202	วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์โดยใช้วงจร VDBA พิชญานิน มูลเมือง และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์* คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	149
EC-203	วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์สองโหมดปราศจากตัวต้านทานพาสซีฟสังเคราะห์ด้วยวงจร VDGA จิรพันธ์ พิมพล[1] อรพิน ชาญนำสิน[1] ทัตยา ปุคคละนันทน์[2] และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์[2*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น [2]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	153
EC-205	เครื่องอบแห้งแบบพลังงานผสมที่สามารถควบคุมอุณภูมิได้ จิรพันธ์ พิมพล[1] เมธิน ดลโสภณ[1] อรพิน ชาญนำสิน[1] นัชนัยน์ รุ่งเหมือนฟ้า[2] ทัตยา ปุคคละนันทน์[2*] และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์[2] [1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น [2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	157
EC-206	Investigating the Impact of LoRa and CW Interference on Sigfox Communication Performance Fumihiko Sato[1*] Rardchawadee Silapunt[1**] [1]Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand	161
EC-207	การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์โดยใช้โปรแกรม PSpice for TI ปรีชา วงษ์จำปา* ภูดิศ โทอินทร์ บุษกร บุญศรี และ กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น	165

บทความวิจัยสาขา EC อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
EC-208	วงจรกรองสัญญาณหลายหน้าที่โหมดแรงดันอันดับหนึ่งโดยใช้ไอซี AD844 ภัทธาวุธ วงศ์ศักดิ์[1] สุชาติ เขียวนอก[2] วินัย ใจกล้า[3] และ โกศล พิทักษ์สัตยาพรต[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ [3]ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	169
EC-209	วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดควอเดรเจอร์ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โดยใช้ไอซี LT1228 สุชาติ เขียวนอก[1] นิสิต องอาจ[1] สมคิด ฤทธิ์เนติกุล[2] ธนวัฒน์ เฉลิมพงษ์[3*] และ โกศล พิทักษ์สัตยาพรต[3] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ [3*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์	173
EC-210	สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอปรับจูนด้วยสตับรูปวงแหวนและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานสามย่านความถี่ในระบบ 4G/5G สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] ตฤณภพ บุญเส็ง[1] นิยวดี ศรีสุวรรณ[1] สมมาตร พรหมพุฒ[2] วัชรพล นาคทอง[3] และ ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล[4*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ [2] สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [3]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน [4*]สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	177

บทความวิจัยสาขา EC อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
EC-211	การวัดค่าความชื้นในไม้ยูคาลิปตัสด้วยคลื่นความถี่สูงสำหรับใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] วิกร วงษ์เสถียร[1] วราภรณ์ ลือใจ[1] วารุณี ศรีสงคราม[1] สมมาตร พรหมพุฒ[2] และ วัชรพล นาคทอง[3*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [3*]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	181
EC-212	Design and Implementation of Graphene Sheet Monopole UHF 860-960 MHz RFID Tag Antenna for Transportation and Logistics Prach Asavanarakul[1*] Aran Asavanarakul[1] Phongsuk Ampha[1] Suwat Sakulchart[2] Thanat Sooknuan[3] and Nikorn Kaewpraek[4] [1*]Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani [2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Ayutthaya [3]Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima [4]Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Pathum Thani	185
EC-213	การวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรงที่มีแอมปลิจูดไม่สม่ำเสมอโดยใช้ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์ และ ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์[*] สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	189
EC-214	สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่สำหรับประยุกต์ใช้งานย่าน WLAN/SUB 6 GHz พิษณุ ดีแสน[1] และ อำนวย เรืองวารี[1*] [1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	193

บทความวิจัยสาขา EC อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
EC-215	Metamaterial-inspired microwave sensor for measurement of sugar concentration in sugar solution Rujipas Sumranbumrung[1*] [1*]Department of Electrical Communication and Intelligent System Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon	197
EC-216	วงจรซีมอสชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์แรงดันต่ำมากสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน สุนทร รุ่งเรืองใบหยก รุ่งลาวัลย์ ชูสวัสดิ์ ดรุณี ชายทอง และ อภิรักษ์ เสือเดช* สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	201
EC-219	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID สำหรับการติดตามการเบิกจ่ายกุญแจ สุวรรณี ปัญยศ[1*] นิวัติ นวลกัน[1] สุจิตรา จีนะวงษ์[1] และ ศรัญญู กันทะวงค์[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย	205
EC-220	ชุดรับส่งข้อมูลอัตราการเต้นของหัวใจสำหรับการดูแลสุขภาพทางไกลผ่านโครงข่ายลอร่า วิชัย ครองกิจศิริ[1*] พัชรี ครองกิจศิริ[2] มีชัย แจ่มใส[1] วลันดา อุ้ยวงค์[1] และ ภาณุพงศ์ ปัญญาสาร[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, [2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	209

บทความวิจัยสาขา PE อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PE-301	การวิเคราะห์โหมดการทำงานย่อยและออกแบบในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ-ฟลายแบ็ก อัตราขยายแรงดันด้านออกสูงในสภาวะทำงานกึ่งเรโซแนนซ์ ณัฐกมล ประดุมสุข* จิรัชยา จำปา วรพงษ์ วงศ์พาสุข จุฑาทิพย์ แหมา และ อนุศักดิ์ บิสลาม สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	213
PE-302	การปรับปรุงสมดุลของตัวเก็บประจุด้านออก แบบวงจรทวีแรงดันบนพื้นฐานคอนเวอเตอร์พุช-พูลเรโซแนนซ์ แหล่งจ่ายกระแสที่มีอัตราการขยายด้านออกสูง สุขคานา ลืม* ภีรวัชร ภูมิสุวรรณ หัฏฐะ สาวะจันทร์ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง สุริโยทัย สุปัญญาพงศ์ และ อนุศักดิ์ บิสลาม สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าประยุกต์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	217
PE-303	Reliability analysis of DC –Link Capacitors Adjustable-Speed Drive Systems Prasit Mongkhonkaset[1] Santi Narakulnan[2] and Gontapon promnigon[1] Department of Science and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Roi Et Rajabhat University	221
PE-304	วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เพื่อลดความสูญเสียการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดในเชิงเวลาจริงสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับโดยอาศัยข้อมูลกระแสด้านออกและการทำให้เป็นจริงด้วยการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร[1] ชาตรี สรรคอนุรักษ์[1] และ สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ [2]ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	225
PE-305	การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ สันติสุข สว่างกล้า[1] สถาพร เสือเทศ[2] และ ประสพโชค โห้ทองคำ[3*] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม [2]สาขาวิชาวิศวกรรเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	229

บทความวิจัยสาขา PE อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
PE-306	การจำลองแบบเรียลไทม์กับวงจรแปลงผันแบบทบระดับ ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ นายวาฤทธิ์ ช่างประดับ นายนิโรธ ชื่นชม นางสาวอินทิรา คำพิมพ์ และ ถิระวรรธน์ สืบธนะวงษ์* ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	233
PE-307	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุโดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส ศักดาวุฒิ บุญตั้ว*[1], กัลยรัตน์ ใจชื่น[2], วรพล อินทร์แปลง[2], ณัฐพงศ์ แสงสูงเนิน[2], ชาคริต วินิจธรรม[2] และ ประหยัด กองสุข[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	237
PE-308	การศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรควอไซเรโซแนนซ์ สำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ พินิจ บุญหล้า[1], สายชล ชุดเจือจีน[2], ณัฐภัทร พันธ์คง[3] และ อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์[4] [1,2,4]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชคลมงกรุงเทพ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	241
PE-309	เสถียรภาพของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากริดอิมพิแดนซ์ ปรัชญา ปฐมชัยวัฒน์[1*] เดชา ปานประเสริฐ[1] วราห์ สาดาระ[1] และ กรวิทย์ กระจ่างพันธ์[1] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	245
PE-310	เครื่องขยายตลับลูกปืนแบบใช้การเหนี่ยวนำความร้อน ศิริชัย แดงเอม[1*] นิติพงศ์ ปานกลาง[1] สมชาย เบียนสูงเนิน[1] ณัฐพล หาอุปละ[1] นิธิกร จันทร์หัวโทน[1] ศีลวัตร ร่มโพธิ์ชัย[1] ชานนท์ ชูพงษ์[1] มนฑล นาวงษ์[1] และ ณัฐพัทธ์ พันธ์คง[1] [1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	249

บทความวิจัยสาขา CP คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CP-401	การประเมินประสิทธิภาพของ Teachable Machine และเครือข่ายประสาทเทียมในงานจำแนกขยะ: การใช้แนวทาง Semi-Supervised Learning ฤชานนท์ ศรีราวงค์[1] บพิตร ไชยนอก[1] เดชรัชต์ ใจถวิล[2] และ ปิยะมาศ ไชยนอก[3*] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี [3*]สาขาวิชาสหวิทยาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	253
CP-402	การออกแบบและพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม IoT มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1*] วราลี หมื่นจิตร[2] และ ธันษา หมื่นศรี[3] [1*]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม [2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม [3]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม	257
CP-403	การพัฒนาระบบเรียกรถสไลด์: แพลตฟอร์มกลางสำหรับการเชื่อมโยงผู้ใช้และผู้ให้บริการ มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1] มาลิวรรณ บุญพลอย[2*] คุณาธิป อู่ทอง[3] และ ประธาน นิลสนธิ์[4] [1,2*,3,4]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม	261
CP-404	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์สำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้าอัตโนมัติ พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี[1*] สุเมธ ดาราพิสุทธิ์[1] ศรีชล ภิรมย์ลาภ[1] มนตรี อารีย์[2] นพรุจ เขียวนาค[3] และ นภสร จินนิกร[1] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีโลจิสติกส์และการจัดการระบบขนส่ง คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [3]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	265
CP-405	การพยากรณ์และการวิเคราะห์การลาออกของพนักงานด้วยโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและระบบธุรกิจอัจฉริยะ สุเมธ ดาราพิสุทธิ์ ศรีชล ภิรมย์ลาภ* และ พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	269

บทความวิจัยสาขา CP คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CP-406	ระบบติดตามเด็กเล็กด้วยเทคโนโลยีสมาร์ทวอทช์ ญาณภัทร ซองทอง[1*] วชิรนันท์ ปุ้ม[2] และ วีระ รัตนงาม[3] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม [3]สาขาวิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	273
CP-407	ระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัย: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สุภัทรา เกิดเมฆ[1*] จิรันธนิน พุกสี[1] สิรวิชญ์ ธรรมรสเดชา[1] วิทยา ศรีกุล[1] และ พรภัสสร อ่อนเกิด[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	277
CP-408	การเปรียบเทียบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1*], นิมิตร ทักษวิทยาพงศ์[2] และ นนทกร เลิศวชิรไพบูลย์[3] [1*]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม [2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม [3]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม	281
CP-410	การพยากรณ์ความเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเฟสเดียวด้วยปัญญาประดิษฐ์จากข้อมูลแรงสั่นสะเทือนโดยใช้ WTVB01-485 จิโรจน์ จริตควร[1] และ กฤษฎากร นวลละออง[2] [1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม	285
CP-412	การพัฒนาระบบตรวจจับ ควัน, LPG, และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง ภูมินทร์ ฮงมา[1] ระวิวร ฮงมา[2] และ ธราธิป ภู่ระหงษ์[3] [1,2]คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม [3]คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	289
CP-414	การพัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่ มารุต รักษา[1*] สัญญา ผาสุข[1] ชยานิษฐ์ บุญสนิท[1] และ พรชัย แคล้วอ้อม[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	293
CP-415	การตรวจจับแว่นตานิรภัยแบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง นที ศรีนะ[1] และ ภาสพิชญ์ ชูใจ มิเซล[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	297

บทความวิจัยสาขา CP คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CP-416	การพัฒนาระบบทดสอบแบบปรับเหมาะ ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับประเมินความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรม เอกราช ธรรมษา[1] ปกรณ์ กัลปดี[2*] และปิยภัทร โกษาพันธุ์[1] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี [2*]สาขาวิชาเทคโนโลยีเกม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี	301
CP-417	การวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์และการตรวจจับการโจมตีของ LockBit Ransomware โดยใช้บันทึกเหตุการณ์และเครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะทาง ณัฐพงษ์ รุ่งพรมมา[1*] และ พงษ์พิสิฐ วุฒิดิษฐโชติ[1] [1*]สาขาวิชาการบริหารเครือข่ายและความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ ภาควิชาการบริหารเครือข่ายดิจิทัลและความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	305
CP-418	การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง นุชจิเรศ แก้วสกุล[1*] วรพงศ์ บุญช่วยแทน[2] และ กรภัทร เฉลิมวงศ์[3] [1*3]หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	309
CP-419	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ReXNet สำหรับการจำแนกสถานะก้อนเห็ดจากภาพถ่าย กฤษฎา ทาสันเทียะ[1*] เอกบดี เมืองกลาง[1] ปรีชา สมหวัง[1] กรัณฑ์กมล ภูครองหิน[1] ประจวบ อินระวงค์[2] ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[2] มงคล คูพิมาย[3] และ พงษ์ประภัทร ชูหิรัญญ์วัฒน์[4] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน [3]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน [4]สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์	313
CP-420	การพัฒนาการจดจำท่ามือด้วยถุงมือเซนเซอร์ร่วมกับการโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน 1 มิติ สมชาย เปาะทองคำ[1*] กมลทิพย์ วัฒกีกำธร[1] และ ธนะกิจ วัฒกีกำธร[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	317

บทความวิจัยสาขา CT ระบบควบคุมและการวัด

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CT-501	การควบคุมระดับของเหลวสองถังด้วยการค้นหาแบบค้างคาวบนพื้นฐานตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน ดนุพล คำปัญญา[1*] ชาญณรงค์ อ่างทอง[1] และ สัตถาภูมิ ไทยพานิช[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ [2]สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	321
CT-502	โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลแบบวิชวลที่มีปฏิสัมพันธ์สำหรับวิชาระบบควบคุม ดนุพล คำปัญญา[1] และ ปรีชา สาคะรังค์[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	325
CT-503	A Robust Practical Fixed-Time Torch Height Control by Applying Arc Voltage Feedback for CNC Plasma Machines Varin Cholahan and Tassaphan Suwannatat[*] EEC Networking of Mechatronics Excellent Center, School of Engineering and Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok	329
CT-504	การพัฒนาระบบควบคุมน้ำและปุ๋ยอัตโนมัติในแปลงหญ้าสนามกอล์ฟร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง นิคม ศรีหะมงคล[1] กาญจน์ กันปัญญา[2] เจษฎา สารสุข[3] และ บุญเติม อุ่นวิเศษ[4] [1]สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม [2,3,4]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	333
CT-505	ระบบคลาวด์บริการสำหรับจัดการและติดตามอุปกรณ์ด้านมาตรวิทยา สุนันติยา พาระนา[1*] นิติธร เคนโยธา[1] นรินทร์ จันทวงศ์[1,2] และ จริยา บัวเจริญ[1,2] [1]ศูนย์การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย [2]ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย	337
CT-506	การประยุกต์ใช้ระบบการรู้จำอักขระด้วยแสงสำหรับบันทึกผลและเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ พิทยา จุฬาเต่า[1,*] นฤสรณ์ แน่นหนา[1] นิติธร เคนโยธา[1] นรินทร์ จันทวงศ์[1,2] และ จริยา บัวเจริญ[1] [1]ศูนย์การเปลี่ยนแปลงด้านดิจิทัล ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ [2]กลุ่มงานมาตรวิทยานาโน ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	341

บทความวิจัยสาขา CT ระบบควบคุมและการวัด

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
CT-507	Development of a Protocol for Particle Number Concentration Measurement Using Laser Scanning Confocal Microscopy Benjarat Ngansalung* and Jariya Buajarern Nanometrology Group, Department of Dimensional Metrology, National Institute of Metrology (Thailand)	345
CT-508	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่นด้วย MATLAB/SIMULINK สิษฐ รัตนคำ[1*] ปิยะ ศิริขันธ์[1] นิวัทธ์ วรรณวงศ์[1] และ ประกาศิต ปราบพาล[2] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2 [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1	349
CT-510	การสังเคราะห์ตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบลำดับเศษส่วนโดยใช้ขั้นตอนวิธี ACO/PSO แบบผสมผสาน ฐาปนา นามประดิษฐ์[1*] ศักดาวุฒิ บุญตั้ว[1] และ ลัคนา เพิ่มพูล[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์	353
CT-511	ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ ผ่านโปรแกรม LabVIEW และแอปพลิเคชัน LINE อรสา พุทธศรี[1] ธีวราพร เทพสุวรรณ[1] ดารารัตน์ มั่งคั่ง[1] ธมลวรรณ นัททีทอง[1] จุฑารัตน์ ทานะรมณ์[2] และ พลอยบุศรา โกมาสังข์[1*] [1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร [2]ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	357

บทความวิจัยสาขา DS ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
DS-601	Adaptive Sigmoid-Based Low-light Image Enhancement Thaweesak Trongtirakul[1*] Shiquan Wu[2] and Sos Agaian[3] [1*]Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon [2]Institute of Advanced Displays and Imaging, Henan Academy of Sciences [3]College of Staten Island and the Graduate Center, City University of New York (CUNY)	361
DS-602	วงจรตรวจหาที่ทำงานด้วยมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์น สันติ กูลการขาย[1*] นิรัช ชัยหา[1] ชานนท์ วริสาร[2] สถาปัตย์ กิลาโส[3] และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]คณะเทคโนโลยีนวัตกรรมบูรณาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [3]วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา	365

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-701	ชุดวัดพลังงานและประสิทธิภาพความเย็นของเครื่องปรับอากาศผ่านเครือข่ายไร้สาย สมศักดิ์ วัชระคุปต์[1*] กาณฑ์ เกิดชื่น[1] ยุทธณา คงจีน[1] รุ่งเพชร ก่องนอก[1] และ นพณัฐ จิตกรียาน[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน	369
ES-702	การศึกษาผลกระทบทางเทคนิคด้วยวิธีควบคุมโหลดโดยตรง เพื่อศึกษาการตอบสนองของโหลดมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้า วัฒนา มาคำ[1] เกษม ตรีภาค[1] ตระการ ยอดดำเนิน[2] กฤษดา ทัศกานิเวศน์[2] ชุติพร นิลแนม[2] กวีวัฒน์ ทัติวงศ์[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีล้านนา ลำปาง	373
ES-703	การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง วัฒนา มาคำ[1] เกษม ตรีภาค[1] กฤษดา ทัศกานิเวศน์[1] คงศักดิ์ ตุ้ยสืบ[2] ต่อศักดิ์ โกษาวัง[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง	377
ES-704	การประเมินคุณภาพไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 1,200 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ พลากร พรหมเมศร์[1*] สุพิพัฒน์ พานิชธนาคม[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์	381
ES-707	ผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิในระบบไฟฟ้าและการสูญเสียพลังงานในอาคารเรียน: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*] [1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	385
ES-708	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า: กรณีศึกษาอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[1] และ สันติ การีสันต์[2*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2*]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	389

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-709	การวิเคราะห์และพัฒนาแนวทางสู่การเป็นอาคารต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อม: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*] [1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	393
ES-710	การวิเคราะห์พฤติกรรมการสวิงของกระแสไฟฟ้าและผลกระทบต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้า: แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและความยั่งยืน กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*] [1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	397
ES-711	การหาค่าเหมาะสมของเวลาการระบายความร้อนสายเคเบิลหลักเพื่อการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[1] และ สันติ การีสันต์[2*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [2*]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	401
ES-712	การพัฒนาและออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ภุชงค์ จันทร์จิระ[1] ณัฐนันท์ บางจั่น[2] สวรุจ คำสุจริต[3] และ โอภาส สุขหวาน[4*] [124*]ภาควิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ [3*]โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฝ่ายมัธยม	405
ES-713	การประเมินสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ทนุสินธุ์ ลาลู่[1] บูรพา จำรัส[1] พงศภัค บุตรไฉยา[1] กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[2] ประหยัด กองสุข[1] และ วัชรากร ปิ่นธุรัตน์[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	409

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-714	การออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ* ชนสิษฎ์ เปลี่ยนจันทร์ และ อันวัร มัสอูดี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	413
ES-715	การวิเคราะห์หาขนาดและต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง : กรณีศึกษาช่วงเวลาพลังงานไฟฟ้าเหลือใช้โซล่ารูฟท็อป นิพนธ์ พลเสน[1] นพมาศ พรมอาสา[1] ชัชนันท์ ปานะพิพัฒน์[1] สยามรัฐ เพิกอาภรณ์[1] กรัณย์ ศิริจันทร์ชื่น[1] และ ประมุข อุณหเลขกะ[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	417
ES-717	แบบจำลองต้นทุนการผลิตไฟฟ้า: กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในภาคตะวันตกของประเทศไทย ชยกฤตย์ ลิขิตานุสิทธิ์[1*] และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน[1] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	421
ES-718	เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำจากขยะพลาสติกในทะเล ไพโรจน์ แสงอำไพ[1] นันทวัฒน์ สุวรรณ[2] สันติพงษ์ คงแก้ว[3] อภิรัญธ์ จันทร์ทอง[4] อาคม ลักษณะสกุล[5] [1,2,3,4,5]หลักสูตรวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช	425
ES-719	การศึกษาการวัดสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างด้วยแผ่นเพลเทียร์ อรุณสวัสดิ์ ปรีดาถวัลย์[1*] นริส ประทินทอง[1] และ สมบูรณ์ เวชกามา[1] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	429
ES-721	การออกแบบและพัฒนาระบบจัดการแสงสว่างด้วยเซิฟเวอร์บนเครือข่าย WLAN สัญญา ผาสุข มารุต รักษา พรชัย แคล้วอ้อม จินดา สามัคคี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	433
ES-722	ผลกระทบทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม จากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน : การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์กับเชื้อเพลิงชีวมวล ปิฎก ค้าโค[1*] และ อำนาจ ผดุงศิลป์[2] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	437

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-723	An Examination of Functionality Renewable Microgrids: Khlong Ruea, Thailand Montri Ngao-det[1], Jutturit Thongpron[1], Anon Namin[1], Nopporn Patcharaprakiti[1], Worrajak Muangjai[1], Naris Khampangkaew[1], Kittinun Srasuay[1], Nattawat Panlawan[1], Kan nakaiam[1],and Teerasak Somsak[1*] [1*]Clean Energy System (CES-RMUTL), Division of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna	441
ES-724	การออกแบบและวิเคราะห์ต้นทุนการติดตั้งโซล่าร์รูฟทอปร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ขนาดกำลังการผลิต 22 กิโลวัตต์ สำหรับบ้านพักอาศัย เฉลิม จินาตุน[1*], อนุชิต อุไรรัตน์[1], ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1], สมพล บุญญสุวรรณโณ[1], สมควร มณีนาค[1] และ สุเมธ เทศกุล[2] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	445
ES-726	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลย้อนหลัง 10 ปีของโรงงานและอาคารภายในประเทศไทย ปุรเชษฐ์ ตราหยก[1*] เบญจมาภรณ์ ภูมี[1] วรรัตน์ ปัตรประกร[2] และ พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	449
ES-728	Balancing Grid Demand and Battery Availability: NSGA-II-Based Optimization for Battery Swapping Station Trinnapop Boonseng[1*] Waraporn Luejai[1] Wikorn Wongsathian[1] Suwat Sakulchat[1] and Niyawadee Srisuwan[1] [1*]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architechture, Rajamangala University of Technology Suvannabhumi	453
ES-729	อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดเชื่อมต่อกริดโดยการใช้แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้า อนุชิต อุไรรัตน์[1] เฉลิม จินาตุน[1] ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1] สมควร มณีนาค[1] หาญศึก สุชาติกุล[1] สมพล บุญสุวรรณโณ[1] สุนัน หนองเหล็ก[1] และ สุเมธ เทศกุล[2] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	457

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-731	ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ไฮบริดออฟกริดและการตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT สำหรับฟาร์มสุกรอัจฉริยะ ธีรยุทธ ทองทวี[1] ธวัช ชูชิต[2] ธนวัฒน์ ศรีรักษา[3] และ อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ	461
ES-733	การประหยัดพลังงานไฟฟ้าเครื่องปรับอากาศแยกส่วนด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำทิ้งจากชุดคอยล์เย็น เมธาสิทธิ์ โชคฤทัย[1*] จุมพลภัทร์ สีทากุลเศรษฐ์[1] และ ชญานนท์ แสงมณี[2] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี	465
ES-734	การพัฒนาระบบเฝ้าระวังปั๊มน้ำแบบเรียลไทม์ ณัฐพงศ์ สอนอาจ และ คมกฤษณ์ ชูเรือง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม	469
ES-735	ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแรงลมปะทะของรถใต้แนวสะพานลอย ทัศพงศ์ นันทมัจฉา[1*], ณัฐพงษ์ เกตวงษา[1], ผศ.ประสิทธิ์ มงคลเกษตร[2] [1*]สาขาวิชาเทคนิคพื้นฐาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม [1]สาขาวิชาไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม [2]คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด	473
ES-736	การพัฒนาถังขยะอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ทัชชกร ธรรมปัญญา[1], เพลิน จันทร์สุยะ[1], วิวัฒน์ ทิพจร[1], วุฒิไกร ธรรมวรรณ[1], เอกชัย ชัยดี[1] และ ทักษ์ หงษ์ทอง[2*] [1,2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย	477
ES-738	การศึกษาผลของความผันผวนของอัตราการผลิตไอน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ นภรรท แสนสร้อย[1*] สมบูรณ์ เวชกามา[1] และ จุลละพงษ์ จุลละโพธิ[2] [1]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี	481

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-739	การจำลองการใช้พลังงานสำหรับลดความชื้นในข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์[1] สมพจน์ คำแก้ว[2] ประชา บุณยวานิชกุล[3] และ เสฏฐา ศาสนนันทน์[4*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [2]ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมวิศวกรรมอบแห้งทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน [3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ [4]ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	485
ES-741	ผลการศึกษาการทำไพโรไลซิสโดยการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตเชื้อเพลิงทดแทน มักตาร์ แวหะยี[1] จารุวัฒน์ เจริญจิต[2] สิทธิพร บุญญานุวัตร์[2] สุเทพ ชูกลิ่น[2] และ วสุ สุขสุวรรณ[2*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [2*]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	489
ES-742	มาตรการอนุรักษ์พลังงานของโรงพยาบาลในช่วง 1 ทศวรรษ: แนวทางการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน จารุวรรณ พันลำภักดิ์[1] วรรัตน์ ปัตรประกร[1] และ พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[2] [1]สาขาวิชาสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	493
ES-743	การตรวจจับการบุกรุกในอุปกรณ์ IoT โดยอาศัยความผิดปกติของการใช้พลังงาน กิติธัช คงงาม[1] และ พฤศยน นินทนาวงศา[1] [1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	497
ES-744	การศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการประจุไฟฟ้าของวาเนเดียมรีดอกซ์โฟล์วแบตเตอรี่ บรรชา กวีวงษ์พิพัฒน์[1] บุญยัง ปลั่งกลาง[1] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	501
ES-745	การเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับอุปกรณ์ต้นทาง จีรยุ คณธิดามี[1] และ พฤศยน นินทนาวงศา[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	505

บทความวิจัยสาขา ES พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
ES-746	การผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียวและสองหน้าสำหรับการติดตั้งหลายรูปแบบ นพณัฐ จิตกรียาน[1] ชวลิต ทองดี[1] ภัคจิรา กำเนิดเขว้า[1] ขวัญชีวา กันทะสาร[1] อดิศร พลเสนา[1] รุ่งเพชร ก่องนอก[1] วุฒิชัย สง่างาม[1] ยุทธณา คงจีน[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] กาณฑ์ เกิดชื่น[1*] [1]หน่วยวิจัยไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา	509
ES-747	การศึกษาการใช้พลังงานจากพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่ออะลูมิเนียมและท่อทองแดง ภากรณ์ ปู[1] ทรัพย์ทวี สุวรรณทา[1] เด่น คอกพิมาย[1] สัญชัย รำเพยพัด[1] ทรงยศ มาลีวงศ์[1] ธนวรรธน์ วัชรดำรงค์ศักดิ์[2] วะชิระพงษ์ พงศ์กิจวิทูร[3] และ รุ่งเพชร ก่องนอก[1*] [1]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา [2]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ [3]บริษัท เอ็กโก โคเจนเนอเรชั่น จำกัด 222 หมู่ 8 ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง	513

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-801	ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ภุชงค์ จันทร์จิระ[1*] โอภาส สุขหวาน[2] ศุภกาญจน์ รักษาศรี[3] และ สุชานันท์ บริบรูณ์[4] [123*]ภาคอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	517
IN-803	การพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลเพื่อการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงาน ฐานทัพ นนท์ตุลา[1] สุรชัย เหมหิรัญ[1*] วสันต์ เธียรสุวรรณ[1] ประชา บุณยวานิชกุล[2] และ ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี[3] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	521
IN-805	เครื่องทดสอบการทำงานของบริภัณฑ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า ชานนท์ ชูพงษ์[*] พัชรพร มั่นกิจ ณัฐพล หาอุปละ ณฐภัทร พันธ์คง และ ศิริชัย แดงเอม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	525
IN-806	The Development of a Fault Detection Notification System Model for Street Lighting Veerapatra Wangsilabatra[1] Peerapon Chanhom[1] Puttipong Ratanatikanon[2] Chitsanucha Loicharoenphon[2] Chanathip Saengchan[2] Keerati Kongwattanathaworn[2] Sukan Chotwutthiphan[2] Peerawit Chaiareekij[2] Tannawat Wongsawang[3] and Promphak Boonraksa[*4] [1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi [2]Department of Electrical Power and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok [3]Design and Estimation Department Metropolitan Electricity Authority Bang Yai [*4]Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi	529
IN-807	ระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุ วารินี วีระสินธุ์[1] ภาวนา ชูศิริ[2] อนุชา ไชยชาญ[3] นราธิป มีศาสตร์ พสุพร ศักดิ์วธารักษ์ สิริพงษ์ เพชรนาค และพิสิฐ สอนละ [1,2,3,4]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	533
IN-808	เครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ กฤษณะ จันทรวิจิตร[1] ไชยนุวัติ สิงหประชา[1] สิรวิชญ์ ตังตา[1] สุภัทรา เกิดเมฆ[1] ชิติสรรค์ วิชิโต[1] วิทยา ศรีกุล[1*] [1*]สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา	537

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-809	การออกแบบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1*] เฉลิม จินาตุน[1] อนุชิต อุไรรัตน์[1] และ สมพล บุญญสุวรรณโณ[1] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล	541
IN-810	ชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ธนวัฒน์ ศรีรักษา[1] กนกพล เพ็ชรมาก[2] ธวัช ชูชิต[2] และ เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย[3*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [3*]สาขาวิชาวิศวกรรมยาง พอลิเมอร์ และปิโตรเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ	545
IN-811	การพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนโดยใช้ไอโอทีต้นทุนต่ำ วรจักร์ เมืองใจ[1*] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] มนตรี เงาเดช[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] ณัฐวัฒน์ พัลวัล[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] กิตตินัน สระสวย[1] ณรงค์ นันทกุศล[1] ภูรชญา วิรัตน์ศิริ[1] พิเชษฐ์ ทานิล[2] และ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงล้านนา [2]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่	549
IN-812	ระบบควบคุมติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำและสภาวะแวดล้อมอัจฉริยะสำหรับการเลี้ยงไข่น้ำด้วยเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง ปฏิพล กวานปรัชชา[1] และ เจษฎา สารสุข[2] [1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	553
IN-813	เครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898 พนัสชัย ศรีบำรุง อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์[*] กันต์ธีร์ สินะวงค์ และ โสภณวิชญ์ กองมงคล [*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	557
IN-814	การพัฒนาอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที วรจักร์ เมืองใจ[1*] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] มนตรี เงาเดช[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] ณัฐวัฒน์ พัลวัล[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] กิตตินัน สระสวย[1] ณรงค์ นันทกุศล[1] พิเชษฐ์ ทานิล[2] และ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงล้านนา [2]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่	561

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-815	ระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล ดนัย ทองธวัช[1*] กมลณิตย์ ภู่สร[2] พันกร เส็งดอนไพร[1] ยศชดิษ บุญโกย[1] และสรายุทธ ปล้องเงิน[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	565
IN-817	ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ณัฐวุฒิ สมพงษ์[1*] จีระพงศ์ ศรีวิชัย[1] อรรคชัย ภูผานิล[1] และ อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร [2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	569
IN-818	การออกแบบห้องคลีนรูมสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงวัน ชนิด Black Fly อภิสิทธิ์ บุตรนนท์[1], ยุติ ฉัตรวรานนท์[1], กฤษดา แสนสิมน[1], ภัทรพงศ์ จันทรประสาท[1], สมมาตร ทองคำ[2], ธนพงษ์ กรรณแก้ว[2], อุทัย อึ้งเจริญ[2], สนธยา ขำเดช[3] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี [3]สาขาวิชา วิศวกรรมซ่อมบำรุงรักษาอากาศยาน มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี	573
IN-819	พัฒนาเครื่องบ่มคอนกรีตแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ STC-3028 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบของนักศึกษาวิศวกรรมโยธา อภิสิทธิ์ บุตรนนท์[1*], พัชรพล ไม่เที่ยง[1] , ยุติ ฉัตรวรานนท์[1] , สุรวุฒิ ยิ้มฤทธิ์[1], มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม[2] , พัชรา วงค์ทอง[2] , อนุสรณ์ ผ่องประภา[3] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี [3]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี	577
IN-820	ระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถังด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง พัทธพล วิโรจธีระกุล[1*] และ ดวงอาทิตย์ ศรีมูล[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์มหาบัณฑิต วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต [2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต	581

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-821	โซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนสำหรับจ่ายโหลดปั๊มน้ำแสดงผลในแอปพลิเคชันผ่านสมาร์ทโฟน ตฤณภพ บุญเส็ง[1] นิยวดี ศรีสุวรรณ[1] วิกร วงษ์เสถียร[1] สุวัฒน์ สกลุชาติ[1] วารุณี ศรีสงคราม[2] และ วราภรณ์ ลือใจ[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา [2]สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี	585
IN-822	การออกแบบและสร้างโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัจฉริยะ วิฑูรย์ พรมมี[1*] ประกาศิต ศรีทะแก้ว[1] ธนกฤต สราญสิริบรรักษ์[1] และ จิรัฏฐ์ ฝั้นจักรสาย[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย	589
IN-824	การพัฒนาเครื่องช่วยเดินอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุโดยใช้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง นิยวดี ศรีสุวรรณ[1] วราภรณ์ ลือใจ[1] ตฤณภพ บุญเส็ง[1] สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] และ วิกร วงษ์เสถียร[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	593
IN-825	เครื่องล้างไข่ไก่ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ ชุติพล มหาวีระ[1*] ภานุมาศ แสนพวง[1] เจษฎา พรหมเกษ[1] กฤตยา สมสัย[1] และ ณัฐวุฒิ สมพงษ์[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	597
IN-827	การออกแบบและพัฒนาตู้เพาะเลี้ยงเห็ดที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ชุติพล มหาวีระ[1*] นครินทร์ ศรีปัญญา[1] กอบกุล นงนุช[2] และ พิมพ์นิภา รัตนจันทร์[3] [1*]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร [2]สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร [3]สาขาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา	601
IN-828	ชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้น คณโฑ ปานทองคำ อเนก ไทยกุล ณัฐพร ความสุข และ ธนโชติ กัลยาณปัทม์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	605

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-829	อุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีฬา ศุภกร กตาธิการกุล[1*] พิทักษ์ บุญนุ่น[2] สุเจนต์ พรหมเหมือน[1] และ สุวิทย์ เพชรห้วยลึก[1] [1*]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	609
IN-831	เครื่องบ่มกระเทียมดำควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน* ชนกานต์ ไพบูลย์โรจน์รุ่ง อมรพงศ์ ฐากุลอธิวัฒน์ และ ธนิตา ลาภวิบูลย์กิจ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	613
IN-832	การศึกษาเทคนิคการควบคุมสำหรับการขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีไลดาร์ ชาคริต วินิจธรรม[1] กัญยาณี คำดี[1] อดิศักดิ์ ผ่อนร้อน[1] นัฐรดี เขมากโรทัย[1] และ ฐาปนา นามประดิษฐ์[2] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า[1] สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	617
IN-835	การควบคุมเตาเผาถ่านไม้ด้วยระบบฟัซซี่ลอจิก สุรชาติ เหล็กงาม* กฤษฎ์ อานนท์ มานุพล ธานี และ ศิวกร โคธิเสน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา	621
IN-838	รถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล[1] ประสิทธิ์ ศรีนคร[2] แวอารีฟ แวอาลี[3] อิดริส เร่งหวัง[3] ซุลกิฟลี บาโละ[3] และ ฟิกรี ดีเยาะ[3] [1,2]สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [3]หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	625
IN-840	ตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วย ระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล[1] สุรศักดิ์ เกตบุญนาค[2] ธนภูมิ มูสิกัณฑ์[3] และเภาพิภัสร์ ลิ่มสายหั้ว[3] [1,2]สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย [3]หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	629

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-842	Design of Hybrid Smart Microgrid Systems for Enhanced Energy Resilience and Efficiency: Case Studies in Water Quality Monitoring Stations Seksan Wongsom[1*] Jarun Khonrang[1], Pairoj Duangnakhorn[1], Seksan Winyangkul[1] and Kamol Boonlom[2] [1*]Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University, Chiangrai, Thailand [2]School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, United Kingdom	633
IN-843	การพัฒนาระบบตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ด้วยการประมวลผลภาพ ทัศพันธุ์ สุวรรณทัต[1*] และ พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	637
IN-844	การศึกษาแรงดันไฟฟ้าของนวัตกรรมผนังเตาอบชุบโลหะด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริก รตบงกช แสนจุ้ม[1*] ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช[2] และ ศักดาวุฒิ บุญตั้ว[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี [2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี	641
IN-846	ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ณรงค์ นันทกุศล[1] สาคร ปันตา[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] ศตวรรษ บูรณา[1] สุริยา เทียมตามณี[1] ปริญญา สมยี่[2] และ กิตตินัน สระสวย[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา [2]มูลนิธิโครงการหลวง ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรโครงการหลวง ชนกาธิเบศรดำริ	645
IN-847	ตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมการทำงานผ่านเทคโนโลยีไอโอที ภราดร เรืองกูล สายัณ ละอองโชค อธิโรจน์ มะโน และ อภิรักษ์ เสือเดช สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	649
IN-849	การพัฒนาชุดการเรียนการสอนทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส เอกนรินทร์ เถิงจาง[1] อนนท์ นำอิน[1] และ สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่	653

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-850	ระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อมสำหรับเกษตรแนวตั้งในเขตเมือง อภิรักษ์ เสือเดช กฤตภาส หนูคง ศุภณัฏฐ์ แก้วประสิทธิ์ เสนอ สะอาด และ สุนทร รุ่งเรืองใบหยก* สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	657
IN-851	การพัฒนาระบบตรวจจับและติดตามสุกรในฟาร์มด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก วิวรรธน์ สุเหร็น[1*], ธวัช ชูชิต[1], ธนวัฒน์ ศรีรักษา[2], ธีรยุทธ ทองทวี[3], ศุภชัย แก้วพวง[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	661
IN-852	Development of High Voltage DC Power Supply for low power X-ray Device Patnaree Tatiyanukulpong[1*] Nithiphat Teerakawanich[1] and Siriroj Sirisukprasert[1] [1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok ,Thailand	665
IN-853	การวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติผ่านระบบ IoT บริเวณพื้นที่ใกล้นากุ้ง จังหวัดจันทบุรี กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[1*] ณัฐวุฒิ ผ่องหนู[2] สมพร ศรีวัฒนพล[3] ฐาปนา นามประดิษฐ์[4] และ พงศภรณ์ ชาติสุทธิ[5] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [2]สาขาวิชาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬาและการออกกำลังกาย คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี [3]สาขาวิชาสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี [4]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก [5]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก	669
IN-854	แนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร พงศ์พัทธ์ มังคละคีรี[1*] ธนภัทร มาลีลัย[1] และ พัชรณัฏฐ์ แสงอ่อน[1] [1*]สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม	673

บทความวิจัยสาขา IN นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
IN-855	เครื่องตรวจสอบการเข้าห้องเรียนแบบพกพาด้วยเทคโนโลยี QR code เจษฎาพร ทองขันธ์ ภูวภัท อัครดำรงโชค และ พลอยบุศรา โกมาสังข์* *ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร	677
IN-856	การออกแบบและพัฒนาระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้าและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการลงทุนของระบบพลังงานทดแทน นริศ กำแพงแก้ว[1] จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] วรจักร์ เมืองใจ[1] นพพร พัชรประกิติ[1] มนตรี เงาเดช[1] ณัฐวัฒน์ พัลวัล[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] และ กิตตินัน สระสวย[1*] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	681
IN-857	การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการควบคุมวีลแชร์สุนัขอัตโนมัติสำหรับสุนัขพิการทางขาหลัง วิชชา อุปภัย[1] พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์[1] และ ศุภโชค ตันติวิวัทน์[1*] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	685
IN-858	การพัฒนาแว่นตาอัจฉริยะเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาด้วยระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและระบุตำแหน่ง กมลณิตย์ ภู่สร[1] ดนัย ทองธวัช[2] และ ก่อเกียรติ อ๊อดทรัพย์[3*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี) [3*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ตาก)	689
IN-859	ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ดำรง เซ้งมณี[1] ชนาธิป ทิพย์กองราษฎร์[2] ณัฐพงศ์ แพนไธสง[2] ปาณชัย เจริญบุญพัชร[2] เตือนใจ อาชีวะพนิช[1*] และ บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์[2] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์กรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ [2]หลักสูตรวิศวกรรมไอโอทีและสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	693

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-902	การเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่องสว่างไฟถนนด้วยการปรับมุมดวงโคมแบบอัตโนมัติ อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*] นนธวัช สีสรรค์[1] อิศเรศ ขาวเกลียด[1] ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์[2] และ ธวัช ชูชิต[3] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ	697
GN-904	การจำลองจ่ายโหลดประสิทธิภาพสูงสุด และอิทธิพลการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ อานนท์ สิงห์เสถียร[1] เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ[1] คชพงศ์ สุมานนท์[2] สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ[1] สุรเชษฐ เดชฟุ้ง[1] มนัส บุญเทียรทอง[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [2]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	701
GN-905	การสร้างแบบจำลองอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส คณิศร บุญรัตน์[1*] วสันต์ จันทรโชติ[1] ไพโรจน์ วุ่นชุม[1] และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์[1] [1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	705
GN-907	การออกแบบและสร้างแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก กฤตินันท์ เพ็ชรศรี[1*] กรวิทย์ กระจ่างพันธ์[1] [1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าประยุกต์ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	709
GN-908	การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดคาปาซิเตอร์รัน วรรณวินิต วิจิตรเตมีย์ และ บุญยัง ปลั่งกลาง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	713
GN-909	การพัฒนาระบบเย็นแช่ผักด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกและแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ ขจรศักดิ์ สีเมฆ[1*] บุญธง วสุริย์[2] และ พรชัย กิจเจริญ[2] [1*]คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	717

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-910	การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกลือสินเธาว์ร่วมกับถ่านในการปรับปรุงความต้านทานดิน ทนงศักดิ์ โกสีย์[1] ดุสิต อุทิศสุนทร[2*] และ กีรติ ชยะกุลศีรี[3] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี [2*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	721
GN-911	การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี สุพร หนูคง, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	725
GN-913	การพัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้การประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์ ธีรพงษ์ ฉิมเพชร[*] สมคิด สุทธิศักดิ์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย	729
GN-914	ผลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง ต้นตระการ เผยกลิ่น ธีรภัทร บุตร์เพชร์ และ พิชญา สุกใส สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงสุวรรณภูมิศูนย์สุพรรณบุรี	733
GN-915	การออกแบบและวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างพัลส์แบบยูนิโพลาร์และไบโพลาร์ ธเนศ ภู่กัน[1] กำไร จันทร์พรม[2] เอกชัย ชูเที่ยง[3*] [1-3]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3	737
GN-916	การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับเพื่อผลิตไฮโดรเจน อดิศร เมรุแก้ว[1] ศุภชัย แก้วพวง[2] และ อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[3] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ [3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม	741

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-917	การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนโดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำเทียบกับไฟฟ้าแรงดันสูง วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง กฤษราช เดชมา เชษฐวพันธุ์ รัตนบุรี และ พงศ์พันธ์ เลขะวัฒนะ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงสุวรรณภูมิศูนย์สุพรรณบุรี	745
GN-918	การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ธราธิป ภู่ระหงษ์[1*] ภูมินทร์ ฮงมา[2] และ ประจวบ แสงวงค์[3] [1*]สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม [2]คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม [3]สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา	749
GN-919	ความเป็นไปได้ของการตรวจจับการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีนในเนื้อหมูด้วยอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล ณัฐฐะวีวรรณ ปานจันทร์[1*] ไพโรจน์ วุ่นชุม[1] และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์[1] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	753
GN-920	เครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุ เอกพล อนุสุเรนทร์ ชูศักยฐ์ กมลขันติธร กมลชนก ขุนทอง และ ปัทมพร แสงสุวรรณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	757
GN-921	การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003) หน่วยการเรียนรู้ มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ชัยณรงค์ บุตรจำนง ชาญชัย แสนจันทร์ และ ประกาศิต ปราบพาล วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1, อุดรธานี	761
GN-922	การควบคุมอุณหภูมิที่ผิวท่อฮีทไปป์ สาเหะอันวา ดะแซ[1], ปิยะภัทร พ่วงศรี[1], เหมหงส์ จุรีนุกูล[1] และ สันติ หวังนิพพานโต[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน	765
GN-923	หุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับการเพาะปลูกข้าว วิรัช กองสิน[1*] ชัยนรินทร์ ขุมทอง[1], นาวินต้า ฟักแก้ว[1] และ นิติธร ทองเรือง[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	769

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-924	การวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับโหลดแบบพาสซีฟ สันติสุข สว่างกล้า[1] สถาพร เสือเทศ[2] สามารถ ใจซื่อ[3] และ ประสพโชค โห้ทองคำ[4*] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม [2]สาขาวิชาวิศวกรรมมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ [3]ภาควิชาวิศวกรรมการพิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม [4*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์	773
GN-925	การพัฒนากระบวนการแปรรูปกาแฟด้วยระบบอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและเทคโนโลยีพลังงาน สิทธิชัย จีนะวงษ์[1] ปรานต์ เมฆอากาศ[2] ธีรชาติ สถิตธรรมพนา[3] และ สุจิตรา จีนะวงษ์[1*] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา [2]โปรแกรมวิชาวิศวกรรมพลังงานและเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย [3]สวนกาแฟลีซูมีดอยช้าง (LISUMI Coffee Farm) และ Q Arabica Grader (Q Grader) by Coffee Quality Institute (CQI)	777
GN-926	การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารบนพื้นฐาน IoT พงษ์ชัย จำนงค์นอก ชลลัดดา คงม่วงหมู่ ศุภณกร พวงมาลัย รุ่งวิลัย กลิ่นทองหลาง และ ชัยวุฒ ชูรักษ์* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม	781
GN-927	การทดสอบภาคสนามของระยะเบรกรถไฟ: ผลกระทบของความเร็ว มวล และบทบาทของระบบเบรกเชิงไฟฟ้า คมกฤษณ์ ศรีสวรรณ์* กฤตยา สมสัย จีระพงศ์ ศรีวิชัย อรรคชัย ภูมิผานิล เมธา ทัศคร และ ณัฐวุฒิ สมพงษ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	785
GN-928	การทดสอบสมรรถนะเครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็ก จักรกฤษณ์ เคลือบวัง[1*] อมรเทพ ประเสริฐน้อย[1] มณิสรา มั่นแก้ว[1] สวัสดิ์ ยุคะลัง[1] และ อภิรักษ์ ขัดวิลาศ[2] [1*]หน่วยวิจัยพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก [2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก	789

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-933	เครื่องลดความชื้นขดลวดมอเตอร์ ชูศักยฐ์ กมลขันติธร* กิตติพงษ์ อนันเอื้อ และ อธิษฐ์ บุตรโดย สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ	793
GN-934	การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องซีลปลายหลอด สายัณห์ ฉายวาส* ทัศพล ชมภูอาจ วจี พาที และ ผดุงรัตน์ ปรองพิมาย คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา	797
GN-935	การคำนวณค่าฟลักซ์การส่องสว่างของหลอดไฟโดยวิธีทรงกลมรวมแสง วิวัฒน์ ทิพจร[1*] วิฑูรย์ พรมมี[1] นพัตธร พิชัยวง[1] และ สมเกียรติ ปันยา[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาเชียงราย	801
GN-936	การใช้ระบบตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ศึกษาการขาดน้ำและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในน้อยหน่าเครือ สุจิตรา จีนะวงษ์ สิทธิชัย จีนะวงษ์ สุวรรณี ปัญยศ และ นิวัติ นวลกัน สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา	805
GN-937	การจำลองการทำงานของ RCD สนับเบอร์ที่ใช้ปรับปรุงบูสต์คอนเวอร์เตอร์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อนุชา บุญชูโต* สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	809
GN-939	การลอยตัวของวัตถุแม่เหล็กโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์และตัวควบคุมพีไอดี ปราโมทย์ จางอิสระกุล และ ณหทัย ผ่องสายใจ สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และอัตโนมัติ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์	813
GN-942	ระบบตรวจวัดและบันทึกข้อมูลสำหรับจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นระบบไฟฟ้า พีรธัช มากปรี* ณัฐวัตร รุ่งเรืองพินิจ ญายนันท์ สุขนพกิจ จักรี แซ่ซิ้ม ประภวิษณุ์ ปานมี และ วราห์ สาดะระ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	817
GN-944	การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบไฟฟ้า 1-เฟส สำหรับที่พักอาศัยทั่วไป ตามประเภทผู้ใช้งานของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1*] สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ[1] มนัญญา อำนวย[1] ชินวัตร อมรรัตนานุเคราะห์[1] และ ขวัญชนก ศรีวัลลภ[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	821

บทความวิจัยสาขา GN งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
GN-945	การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1*] ชินวัตร อมรรัตนานุเคราะห์[1] มนัญญา อำนวย[1] ชนาธิป ใจเฉื่อย[1] และ ขวัญชนก ศรีวัลลภ[2] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	825
GN-946	การปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสของระบบไมโครกริดผ่านโปรแกรมจำลองการทำงาน ณัฐวุฒิ เนียมตะเคียน[1*] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	829
GN-947	การศึกษาตู้เพาะเชื้อควบคุมด้วยแสง และอุณหภูมิ กิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์[1*] เอกรัฐ ชอุ่มเอียด[1] ธนายุทธ ไพศาลอัศวเสนี[1] สิทธิชัย วิบูลย์กลาง[1] ณัฐนัย พวงเขียว[1] และ วรัญญู เมฑทา[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	833
GN-949	เทคนิคการลดกำลังสูญเสียในบั๊กคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงจร RCD สนับเบอร์ผ่านการจำลองการทำงาน ชาริทัศน์ นาคประทุม[1*] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1] [1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	837

บทความวิจัยสาขา SS1 หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
SS1-1001	การศึกษามาตรฐาน และการทดสอบแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงในประเทศไทย: บทวิเคราะห์และแนวโน้มในอนาคต ณัฐพันธ์ ถนอมสัตย์[1] [1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา	841

บทความวิจัยสาขา SS2
หัวข้องานวิจัยด้านการบริหาร การจัดการ ด้วยขบวนการร่วมกับเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนา

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
SS2-2001	การประเมินผลการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ ณัฏฐณิชา จันทร์ปัญญา[1*] นิติธร เคนโยธา[1] จริยา บัวเจริญ[1,2] และ นงลักษณ์ ตั้งไพศาลกุล[3] [1*]ศูนย์การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย [2]ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย [3]ฝ่ายมาตรวิทยาเคมีและชีวภาพ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย	845
SS2-2002	การพัฒนากระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนในระบบ HRM ของพนักงานมหาวิทยาลัย และพนักงานราชการ กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศรัญญา พิริยประเสริฐ[1*] และ มลิวรรณ ชัยฮะนิจ[2] [1*]งานการเงิน ฝ่ายบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร [2]งานการเงิน ฝ่ายบริหาร คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	849
SS2-2003	การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่โรงเรียนสังกัดของกรุงเทพมหานคร ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) พีรวิชญ์ วัฒนะ[1*] และ พิชญ รัชฎาวงศ์[1* 2 3] [1*]หลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [2]สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [3]ภาควิชาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	853

บทความวิจัยสาขา SS3
หัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม ปวช. และ ปวส.

รหัส	ชื่อบทความ	หน้า
SS3-3003	การพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอน: ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จีรภา เพลาวัน[1*] อุรา คล่องแคล่ว[1] กฤษฎา บุญมีวิเศษ[1] ชาตินนท์ ทองกัลยา[1] พงศธร พรมชมชา[1] อธิวัตร อุปสุข[1] สมเกียรติ์ มะลิพันธ์[1] นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ[1] และ วิชัย ครองกิจศิริ[1] [1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร	857
SS3-3005	ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล กิตติพัศ แก้วฉิมพลี ธรรศธร จำนงจิต ธนัชชา ศุทธางกูร สุวิมล ฤทธิ์พันธ์ และ สุเมธ เนาว์รุ่งโรจน์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก	861

Electrical power (PW)

ไฟฟ้ากำลัง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีต่อทิศทางที่แตกต่างกัน

Effects on the Electricity Generation of Polycrystalline Photovoltaics in Different Directions

นเรศ ชลังสุทธิ์, อินทัช ฉันทสัมพันธ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สวาง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนำเสนอผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีต่อทิศทางที่แตกต่างกัน มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาทิศทางที่ดีที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้เซ็นเซอร์ในการควบคุมมอเตอร์แนวราบซึ่งทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หมุนตามแสงอาทิตย์เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่มีความเข้มของแสงอาทิตย์มากที่สุด โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศเหนือทำมุม 15 องศา กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศา กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศตะวันออกทำมุม 15 องศา กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศตะวันตกทำมุม 15 องศา และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศตะวันออกซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ได้ จากการศึกษาพบว่ากรณีที่ 5 สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, ทิศทาง, ประสิทธิภาพ

Abstract

This paper present effects on the electricity generation of polycrystalline photovoltaics in different directions. The objective is to find the best direction. To maximize efficiency of photovoltaic and use sensors to rotate motor in horizontal mode. It makes photovoltaic follows the direction of the sun where the sun ray has the maximum solar irradiance. This paper divides case studies in 5 cases. the first installs photovoltaic in 15 degrees in north direction. the second case installs photovoltaic in 15 degrees in south direction. the third case installs photovoltaic in 15 degrees in east direction. The fourth case installs photovoltaic in 15 degrees in west direction. The fifth case installs photovoltaic in east direction and rotate following the solar irradiance. From all study case the fifth case maximum current and voltage.

Keywords: photovoltaic, direction, efficiency

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกนั้นมีค่ามากจนไม่สามารถประเมินค่าได้ แสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษโดยสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความเข้มของแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้คือเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 1,000 วัตต์ต่อชั่วโมง [1]

ในปี 2021 [2] มีการทดสอบก่อนที่จะมีการใช้จริงโดยมีการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายด้วยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ PVSyst และ IEC 61724 โดยระบบสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 8,954.9 เมกกะวัตต์ชั่วโมงต่อปี และมีร้อยละอัตราส่วนสมรรถนะเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 77.84 ได้รับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและได้ปริมาณพลังงานรวมรายปีมากที่สุดประมาณ 1,837 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร ในปี 2024 [3] มีการปฏิบัติการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสานสำหรับ ระบบกักเก็บพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม ผลลัพธ์พบว่าโหลดแบ็คอัพเฉลี่ย คือ 4,793.42 kWh ผลลัพธ์พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานสัมพันธ์กับระบบกักเก็บพลังงาน สามารถจ่ายพลังงานให้แก่โหลดได้อย่างสมดุล ในปี 2025 [4] ได้มีการศึกษาเสาอากาศกริดพลังงานแสงอาทิตย์แบบมัลติบีมที่ผสานรวมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนโมโนคริสตัลไลน์แบบหลายลำแสงที่รวมเข้ากับแผงโซลาร์เซลล์ซิลิคอนชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าเสาอากาศกริดพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลายลำแสงสามารถครอบคลุมแถบเรดาร์ 24 GHz และเกิดการโก่งตัวของลำแสงในระนาบอะซิมัทสี่ระนาบด้วยช่วงแกน 15.2 ถึง 16.6 dBi ที่ความถี่กลาง 24.125 GHz และแผงโซลาร์เซลล์สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ 0.56 โวลต์

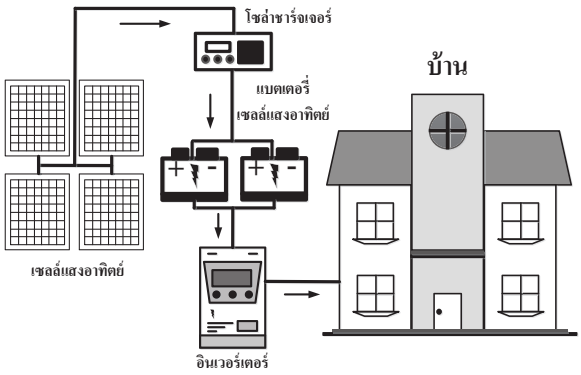
ดังนั้นบทความนี้จึงได้มีการศึกษาด้านผลกระทบของการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ที่มีต่อทิศทางที่แตกต่างกันมีโดยมีชุดทดสอบ 2 ชุดคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถปรับองศาได้และเซลล์แสงอาทิตย์ปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ ซึ่งแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี

2. ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด เป็นระบบที่ไม่จำเป็นต้องพึ่งพาระบบพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าหรือพลังงานจากที่อื่นๆนอกจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์นั้นพลังงานส่วนเกินของโหลดในระบบไฟฟ้าจะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเป็นพลังงานสำรอง [5]

ประโยชน์ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด เป็นการใช้งานพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประโยชน์ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มาจากพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันมาใช้ซึ่งการใช้พลังงานเหล่านี้จะถูกแบ่งออกดปัน 2 ทางคือ จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆในเวลากลางวัน และนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือจากการผลิตไฟฟ้านั้นนำมากักเก็บไว้ลงในแบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเอาไว้ใช้จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆหรือโหลดในระบบไฟฟ้า ในเวลากลางคืน สิ่งสำคัญคือต้องผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากพอที่จะสามารถเปิดใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ หรือโหลดในระบบไฟฟ้า ได้ตามที่ต้องการตลอดในระยะเวลาที่กำหนด และมีกระแสไฟฟ้านำไปเก็บในแบตเตอรี่มากพอต่อตามต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืน [6]

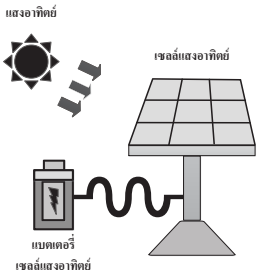
สิ่งที่ผู้ใช้ต้องทราบก่อนติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด คือ 1.กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการเปิดใช้งาน 2.การประเมินระยะเวลาการเปิดใช้งานในแต่ละวันของอุปกรณ์แต่ละชนิด และ 3.การประมาณค่าพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ต้องการเปิดใช้งานตามระยะเวลาทั้งกลางวัน และกลางคืน การเลือกอุปกรณ์ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด 1.เซลล์แสงอาทิตย์ 2.อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการชาร์จประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 3.แบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ 4.อินเวอร์เตอร์ และ 5.เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งใช้ในเวลาที่แบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เก็บพลังงานได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ การเลือกอุปกรณ์ทั้งหมดนี้ล้วนสำคัญต่อระบบไฟฟ้าทั้งหมดทั้งสิ้น [7] ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริดแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบออฟกริด

3. ผลกระทบจากทิศทางการติดตั้งของเซลล์แสงอาทิตย์

การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศเหนือ ซึ่งทิศเหนือเป็นทิศที่ได้รับแสงแดดน้อยที่สุด เพราะพระอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออก อ้อมไปทางทิศใต้ และตกทางทิศตะวันตกโดยที่ทิศเหนือไม่ได้หันทำมุมการตั้งฉากกับพระอาทิตย์ทำให้การตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศเหนือเกิดการสะท้อนของแสงอาทิตย์บางส่วนออกไป ทำให้ทิศเหนือได้รับแสงแดดน้อยที่สุด การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันออก ซึ่งทิศตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทางทิศตะวันออก ปริมาณแสงแดดที่ได้รับจะอยู่ในระดับปานกลาง โดยจะรับแสงแดดมากสุดในช่วงเช้าถึงช่วงเที่ยงเท่านั้น ซึ่งหากเราติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศตะวันออกจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานไม่เต็มที่ การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศตะวันตก สำหรับการตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ทางทิศตะวันตก ปริมาณแสงแดดที่ได้รับจะอยู่ในระดับปานกลาง โดยจะรับแสงแดดมากสุดในช่วงเที่ยงถึงช่วงเย็นเท่านั้น ซึ่งหากเราติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในทิศตะวันตกจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานไม่เต็มที่ การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้ คือทิศทางที่ดีที่สุดเพราะดวงอาทิตย์ที่อ้อมไปทางทิศใต้ทำให้ทิศใต้ได้รับแสงแดดเข้มข้นมากที่สุด [8] ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์

สมการวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ 1 [9]

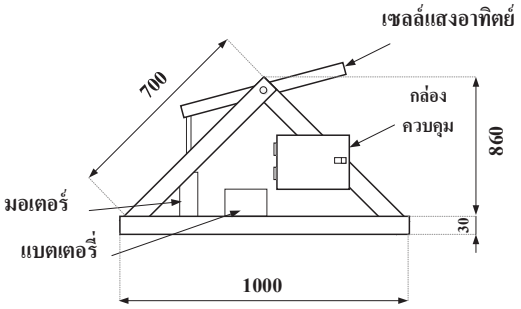
$$I = I_{Ph} - I_o\left[exp\frac{(V_{PV} + R_s I_{PV})}{N \times K \times T} - 1\right] - \left[\frac{(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{R_{sh}}\right] \quad (1)$$

เมื่อ

+	คือ	กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
+˗	คือ	กระแสไฟฟ้าของโมดูล (A)
+	คือ	กระแสไฟฟ้าโฟโตอิเล็กทริก (A)
+	คือ	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว
0	คือ	ตัวประกอบทางอุดมคติ
−	คือ	1.3806504× ѕ2 67J/Kelvin
6	คือ	อุณหภูมิที่รอยต่อขณะเซลล์ทำงาน
8 ˗	คือ	แรงดันเอาท์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์
4	คือ	ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
4	คือ	ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

4. กรณีศึกษา

บทความนี้ได้ทำการทดสอบการวัดกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศเหนือทำมุม 15 องศา กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศา กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศตะวันออกทำมุม 15 องศา กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศตะวันตกทำมุม 15 องศา และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศตะวันออกซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ได้ โดยทดสอบที่ ต.บางแม่นาง อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี ที่ละติจูด: 13.8547° เหนือ , ลองจิจูด: 100.3892° ตะวันออก แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์ด้านทิศทาง แสดงดังรูปที่ 4 และเซลล์แสงอาทิตย์ปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ด้านทิศทาง



รูปที่ 5 เซลล์แสงอาทิตย์ปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์

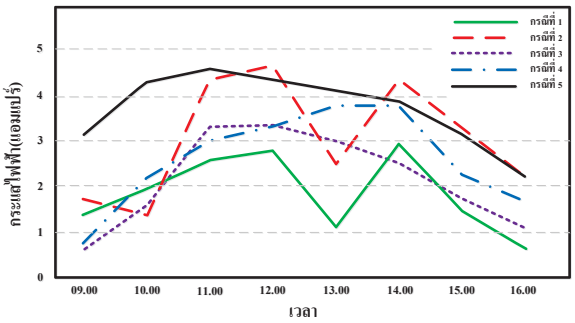
การดำเนินงานได้มีการออกแบบ มีชุดทดสอบ 2 ชุดซึ่งมีอุปกรณ์ดังนี้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถปรับองศาได้ซึ่งมีการทดสอบชุดเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ 12 โวลต์ 50 วัตต์ 2.โซล่าชาร์เจอร์ 30 แอมป์ 3.แบตเตอรี่ขนาด 12โวลต์ 5 Ah 4.เบรกเกอร์ 20 แอมป์ และเซลล์แสงอาทิตย์ปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ 12 โวลต์ 50 วัตต์ 2.โมดูลเซนเซอร์ 3.โซลาร์ชาร์เจอร์ 30 แอมป์ 4.มอเตอร์แนวราบ 12 โวลต์ 5.โมดุลแหล่งจ่ายไฟ 6.แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 5 Ah 7.ไทม์เมอร์ กระแสตรง 12 โวลต์ 8.เบรคเกอร์ 20 แอมป์ซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยมีเซ็นเซอร์ตามแสงอาทิตย์ และมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อน เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้า โดยผ่านโซล่าชาร์เจอร์ และเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ที่แบตเตอรี่ ซึ่งแต่ละกรณีจะมีการทดสอบ 4 วัน หาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา และดีสชาร์จแบตเตอรี่ก่อนทำการทดสอบ และมีการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 16.00 น. ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 1 และผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า

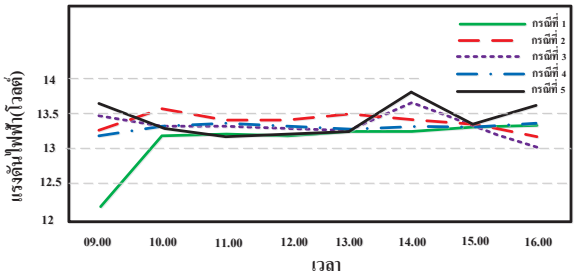
เวลา	กรณีที่ 1 (แอมแปร์)	กรณีที่ 2 (แอมแปร์)	กรณีที่ 3 (แอมแปร์)	กรณีที่ 4 (แอมแปร์)	กรณีที่ 5 (แอมแปร์)
09.00	1.38	1.72	0.64	0.77	3.14
10.00	1.95	1.37	1.60	2.18	4.30
11.00	2.57	4.35	3.31	3.00	4.57
12.00	2.78	4.65	3.34	3.32	4.33
13.00	1.10	2.48	2.99	3.77	4.12
14.00	2.93	4.35	2.51	3.76	3.86
15.00	1.46	3.28	1.73	2.26	3.14
16.00	0.64	2.21	1.09	1.67	2.21
ค่าเฉลี่ย	1.85	3.05	2.15	2.59	3.70

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

เวลา	กรณีที่ 1 (โวลต์)	กรณีที่ 2 (โวลต์)	กรณีที่ 3 (โวลต์)	กรณีที่ 4 (โวลต์)	กรณีที่ 5 (โวลต์)
09.00	12.19	13.29	13.49	13.20	13.65
10.00	13.21	13.60	13.34	13.34	13.32
11.00	13.23	13.43	13.33	13.38	13.19
12.00	13.20	13.44	13.32	13.35	13.23
13.00	13.27	13.52	13.27	13.30	13.25
14.00	13.27	13.44	13.69	13.34	13.84
15.00	13.32	13.36	13.33	13.33	13.38
16.00	13.35	13.19	13.04	13.38	13.63
ค่าเฉลี่ย	13.11	13.40	13.35	13.33	13.43



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

5. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ด้านทิศทางที่แตกต่างกัน โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า และรูปที่ 7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า กรณีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 1.85 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 13.11 โวลต์ กรณีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 3.05 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 13.40 โวลต์ กรณีที่ 3 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 2.15 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 13.35 โวลต์ กรณีที่ 4 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 2.59 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 13.33 โวลต์ และกรณีที่ 5 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 3.70 แอมแปร์ และแรงดันไฟฟ้า 13.43 โวลต์ จากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่หันไปทางทิศตะวันออกซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ได้ เป็นการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] มนัส บุญเทียรทอง ปพน งามประเสริฐ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2021). การจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับการปฏิบัติการโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กแบบกระจายตัวในระบบจำหน่าย. *วารสารวิชาการ และวิจัย มทร.พระนคร*. 15(2), 194 – 206.

[2] ปพน งามประเสริฐ, ณรงค์พันธ์ รุ่งเจริญ, ชุมพล ศิริวัฒนสิทธิ์, กันต์ วุฒิพฤกษ์, สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2024). การปฏิบัติการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสานสำหรับ ระบบกักเก็บพลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม. *วารสารวิจัยราชมงคลกรุงเทพ*. 18(1), 11 – 21.

[3] Fuwei Wang, Xuechen Zhang, Rong Sun, Bokai Ding, Ke Li and Chen He," A Multibeam Solar Grid Antenna Integrated With Monocrystalline Silicon Solar Cell," IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 6, no. 1, pp. 304-310, 02 December 2024

[4] Mariem Mallat, Olfa Bel Hadj, Brahim Kechiche, Kawther Ezzeddine and Mahmoud Hamouda," AN Optimized Genetic Algorithm (GA)-Based MPPT for Off-Grid Solar Photovoltaic System," Artificial Intelligence & Green Energy, 2023.

[5] S. Gutiérrez, "Prototype for an off-grid photovoltaic system with low cost solar tracking," 2017 IEEE Mexican Humanitarian Technology Conference, 2017, pp.7-11.

[6] Rui Li, Xing Liang, Xinpei Li and Xu Cai, "On/off-grid integrated photovoltaic power generation system," 2014 International Electronics and Application Conference and Exposition, 2014.

[7] Emil Lazarescu, Flaviu M. Frigura-Iliasa, Marius Mirica, Mihaela Frigura-Iliasa, Lia Dolga and Hannelore E. Filipescu, "Computer Aided Model for an Off-grid Photovoltaic System Using Batteries Only," 2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics, 2018, pp.7-11.

[8] Pemendra Kumar Pardhi and Rakesh Saxena, " Integrated DC-DC Converter For Stand-alone Single Phase Photovoltaic Supply System," 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy, 2022.

[9] Edwin Boima Fahnbulleh, Babita Panda, Sriparna Roy Ghatak, Sampurna Panda, Chitralekha Jena and Rudra Narayan Dash, " An Analysis of FACTS Devices Control Strategies in Grid-Connected Photovoltaic (PV) Systems," 2024 IEEE 4th International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication, 2024.

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีแบบหมุนตามแสง

Increasing the Efficiency of Photovoltaic Electricity Generation with Light Based Rotation Technology

มนัส บุญเทียรทอง, นเรศ ชลังสุทธิ์, ศศิกา สนธิกัณฑ์, รัตติยา สิงห์สอน, สุรเชษฐ เดชฟุ้ง, พูนศรี วรรณการ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ด้วยเทคโนโลยีแบบหมุนตามแสง โดยทำการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิ ตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยมี 2 กรณีศึกษา กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และกรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง จากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของ กระแสไฟฟ้า 2.69 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.08 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 40.56 วัตต์ และในกรณีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของกระแสไฟฟ้า 3.07 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.23 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 46.76 วัตต์ ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปการทดสอบได้ว่ากรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง เป็นการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความสามารถในการผลิต กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ได้มากกว่ากรณีที่ 1

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า

Abstract

This paper presents increasing the efficiency of photovoltaic electricity generation with light based rotation technology. By testing electric current, voltage, power, light intensity, and temperature from 9:00 a.m. – 15:00 p.m. the case study is divided into 2 cases: Case 1 Installation of photovoltaic facing south at an angle of 15 degrees to the horizontal, and case 2 Installation of photovoltaic that rotate according to light. From the test results, it was found that Case 1 had an average current of 2.69 amperes, a voltage of 15.08 volts, and an electrical power of 40.56 watts. And case 2 has an average current of 3.07 amperes, voltage of 15.23 volts, and power of 46.76 watts. From the test results it can be concluded from the test that case 2 is a rotating photovoltaic that follows light. It is an installation of photovoltaic that is able to produce electricity, voltage, and power. More than case 1

Keywords: photovoltaic, voltage, current

1. บทนำ

พลังงานคือ สิ่งที่สามารถเปลี่ยนจากรูปแบบหนึ่งไปยังอีกรูปแบบหนึ่งได้ พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ ต้นกำเนิดของพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้อยู่ทุกวันนี้มี 2 ประเภทคือ พลังงานสิ้นเปลือง คือ พลังงานที่เมื่อใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน เป็นต้น และพลังงานหมุนเวียนซึ่งเป็นพลังงานที่จะมาทดแทนพลังงานสิ้นเปลืองหรือเรียกพลังงานนี้ว่าพลังงานสะอาดนั่นเอง เช่น พลังงานน้ำที่เปลี่ยนพลังงานศักย์ของน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้า และพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง [1]

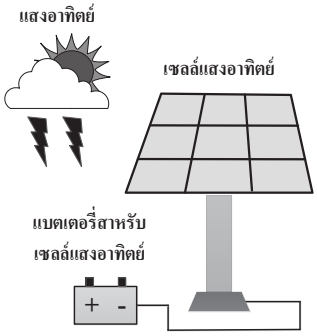
ในปี 2021 [2] ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โปรแกรม PVSyst และมาตรฐาน IEC 61724 ผลจากการศึกษาพบว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดและมีความต่อเนื่อง ในปี 2024 [3] ได้มีการระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สำหรับการปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว 3 ชนิดได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม และพลังงานน้ำ ผลลัพธ์พบว่าตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ในปี 2024 [4] มีการวิเคราะห์กลยุทธ์การควบคุมอุปกรณ์ข้อเท็จจริงในระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อโครงข่าย การผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยการบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อลดความต้องการไฟฟ้าล้นเหลือจากสาธารณูปโภค โดยการเปรียบเทียบกลไกควบคุมที่เสนอเหล่านั้นซึ่งใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า พลังงานปฏิกิริยา และกลไกการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ FACTS บางชนิด มีการพิจารณาเทคโนโลยี FACTS

ดังนั้นบทความจึงได้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีแบบหมุนตามแสงชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และกรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสงซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์

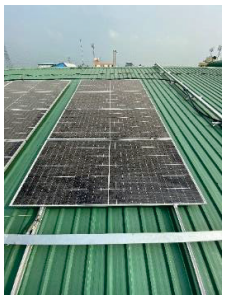
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด รวมถึงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ณ ปัจจุบันถึงแม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์จะมีราคาแพงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอื่น การเลือกใช้ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นถือเป็นการตัดสินใจที่สำคัญและจะส่งผลโดยตรงต่อต้นทุน ประสิทธิภาพ การผลิตไฟฟ้า และประสิทธิผลของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยว สามารถระบุได้ง่ายจากสีดำสนิทและขอบโค้งมน เซลล์แสงอาทิตย์โมโนคริสตัลไลน์มักถูกตัดเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีมุมโค้งมน ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์แบบโมโนคริสตัลไลน์ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพร้อยละ 20 [5]

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้ากระแสตรงจากความเข้มของแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมายังพื้นโลกที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง เมื่อมาตกกระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งผลิตขึ้นมาจากการนำสารกึ่งตัวนำซิลิคอนโดยนำมาวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ให้เป็นขั้วบวก และ ขั้วลบ เมื่อความเข้มของแสงอาทิตย์ส่งผ่านมายังสารกึ่งตัวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะปลดปล่อยประจุไฟฟ้า ให้วิ่งผ่านไปมาระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำที่เป็น ขั้วบวก และขั้วลบ ก่อให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าและเมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ เซลล์มาต่อวงจรกันจนได้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น [6] แบบจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1 และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์บนหลังคา แสดงดังรูปที่ 2



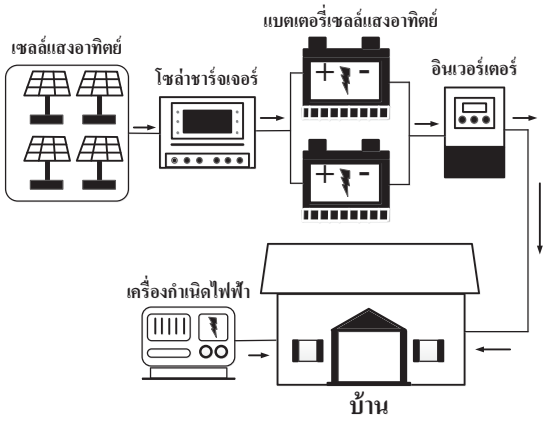
รูปที่ 1 แบบจำลองระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์บนหลังคา

3. แบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมาจากความเข้มของแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจะเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ และนำไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้ที่โหลดในระบบไฟฟ้า เมื่อโหลดในระบบไฟฟ้านำไฟฟ้ากระแสสลับไปใช้แต่ใช้ไม่หมดก็จะมีส่วนเกินของไฟฟ้าซึ่งจะถูกส่งเข้าเข้าไปเก็บไว้ที่แบตเตอรี่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกพัฒนาให้สามารถจัดเก็บประจุได้มาก และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นานยิ่งขึ้นกว่าแบตเตอรี่ทั่วไป ที่เรียกว่า แบตเตอรี่ชนิดดีฟไซเคิล ซึ่งมีแผ่นธาตุตะกั่วที่หนาเป็นพิเศษ ค่าความต้านทานภายในจึงสูง ทำให้สามารถจัดเก็บประจุไฟฟ้าได้สูง แต่การจ่ายกระแสไฟฟ้าจะได้ไม่สูงมากนัก ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูงในระยะเวลาการใช้งานจึงไม่ควรใช้ประจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าร้อยละ 60 และควรเก็บไว้ในที่อากาศเย็น ระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์เพิ่มเติมของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจัดเก็บไฟฟ้าที่ผลิตเกินความต้องการมากกว่าความต้องการโหลด [7] ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ร่วมกับแบตเตอรี่ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ร่วมกับแบตเตอรี่

สมการวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ 1 [9]

$$V_{OC} = \frac{N \times K \times T}{q} In(\frac{I_{Ph}}{I_o}) \quad (1)$$

เมื่อ

V_{OC} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V)
I_{Ph} คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตอิเล็กทริก (A)
q คือ 1.602×10^{-19}
N คือ ตัวประกอบทางอุดมคติ
K คือ $1.3806504 \times 10^{-23}$ J/Kelvin
I_o คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน
T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน

4. กรณีศึกษา

บทความนี้ได้ทำการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิ จะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และกรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสงซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบแสดงดังรูปที่ 4 และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสงแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ



รูปที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง

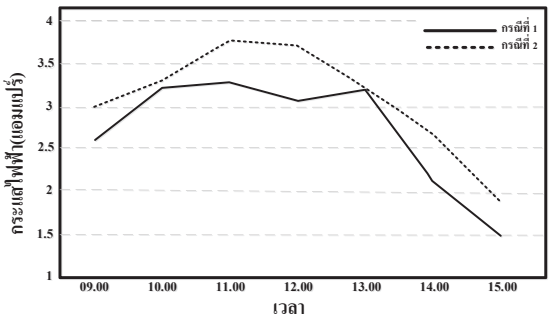
บทความนี้ได้มีการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิ โดยใช้ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชุด ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถปรับองศาได้ซึ่งชุดเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ 12 โวลต์ 50 วัตต์ 2.โซลาร์ชาร์เจอร์ 30 แอมป์ 3.แบตเตอรี่ ขนาด 12โวลต์ 5 Ah 4.เบรคเกอร์ 20 แอมป์ และ เซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง ซึ่งชุดเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ 12 โวลต์ 50 วัตต์ 2.โมดูลเซนเซอร์ 3.โซลาร์ชาร์เจอร์ 30 แอมป์ 4.มอเตอร์แนวราบ 12 โวลต์ 5.โมดุลแหล่งจ่ายไฟ 6.แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 5 Ah 7.ไทม์เมอร์กระแสตรง 12 โวลต์ 8.เบรคเกอร์ 20 แอมป์ ซึ่งสามารถปรับองศาตามความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยมอเตอร์จะหมุนต่อเมื่อเซ็นเซอร์ได้รับความเข้มของแสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละกรณีจะทำการทดสอบทั้งหมด 4 วัน และหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะมีการดีสชาร์จแบตเตอรี่ก่อนทำการทดสอบ และมีการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบแสดงดังตารางที่ 1 และผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ

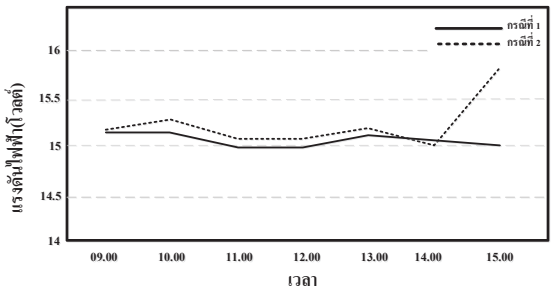
เวลา	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (P)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ (^OC)
09.00	2.59	15.16	39.26	121.52	37.3
10.00	3.20	15.14	48.45	158.13	39.0
11.00	3.27	15.00	49.05	169.25	41.8
12.00	3.05	14.99	45.72	165.01	51.2
13.00	3.18	15.12	48.08	168.37	46.2
14.00	2.11	15.06	31.78	137.48	48.7
15.00	1.47	15.01	22.06	72.04	39.3
ค่าเฉลี่ย	2.69	15.08	40.56	141.69	43.4

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง

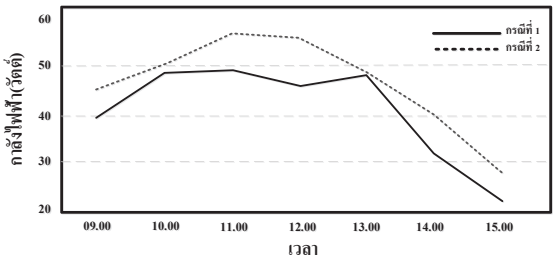
เวลา	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (P)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ (^OC)
09.00	2.98	15.18	45.24	156.66	37.4
10.00	3.29	15.28	50.27	168.08	36.7
11.00	3.76	15.08	56.70	186.68	41.3
12.00	3.70	15.09	55.83	178.33	50.8
13.00	3.21	15.19	48.76	162.23	44.7
14.00	2.66	15.02	39.95	124.45	45.7
15.00	1.86	15.80	28.05	73.21	38.2
ค่าเฉลี่ย	3.07	15.23	46.76	149.95	42.1



รูปที่ 6 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง



รูปที่ 7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง



รูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง

5. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ด้วยเทคโนโลยีแบบหมุนตามแสง โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง รูปที่ 7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง และรูปที่ 8 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ กับเซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง จากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 2.69 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.08 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 40.56 วัตต์ และกรณีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 3.07 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 15.23 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 46.76 วัตต์ ซึ่งสามารถสรุปการทดสอบได้ว่ากรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบหมุนตามแสง เป็นการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ได้มากกว่ากรณีที่ 1

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีอย่างสมบูรณ์ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนเป็นอย่างดียิ่งจากคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เอกสารอ้างอิง

[1] Devonte Sherman, Jesus Marquez, Yves Ramirez, Mariano Urbinaand Andres Meza, Deidra Hodges, "Monocrystalline Silicon Solar Cell Simulation With Reduced Absorber Thickness and Efficiency Exceeding 25%," IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference, 2021, pp.2640-2642.

[2] นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ, ปพน งามประเสริฐ, นริศ ชัชธรานนท์ และทง ลานธารทอง (2021). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า. *วารสารนวัตกรรมการเรียนรู้ และเทคโนโลยี.* 1(1), 80 – 86.

[3] ปพน งามประเสริฐ, ณัชพล เรืองทรัพย์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2024).การระบุตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงความน่าเชื่อถือในระบบจำหน่ายไฟฟ้า. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม.* 20(2), 184 – 195.

[4] Edwin Boima Fahnbulleh, Babita Panda, Sriparna Roy Ghatak, Sampurna Panda, Chitralekha Jena and Rudra Narayan Dash, " An Analysis of FACTS Devices Control Strategies in Grid-Connected Photovoltaic (PV) Systems," 2024 IEEE 4th International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication, 2024.

[5] L.J. Caballero, P. Sanchez-Friera, B. Lalaguna, J. Alonso and M.A. Vazquez, "Series Resistance Modelling of Industrial Screen-Printed Monocrystalline Silicon Solar Cells and Modules Including the Effect of Spot Soldering," 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 2006, pp.3188-3191.

[6] Hyo Sik Chang, Hyun Chul Jung and Hyoung Tae Kim, "Improved light trapping structure for monocrystalline silicon solar cells," 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010, pp.3112-3113.

[7] Narate Charlangsut, Natchapol Ruangsap and Nattachote Rugthaicharoencheep, "An Assessment of a Return from Carbon Credit of a Hybrid Solar Rooftop System," 2023 International Conference on Power, Energy and Innovations , 2023, pp.80-83.

[8] Pramod Rajput, G.N. Tiwari, Birinchi Bora and O.S. Sastry, "Visual and electrical degradation of 22 years field age monocrystalline silicon PV module in composite climate of India," 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference, 2015.

การลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวปเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์

Reducing the Temperature with the EVAP System to Increase Electricity Generation in Photovoltaic

นเรศ ชลังสุทธิ์, พงศธร นาเวียง, ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร, พนา ดุสิตากร, สุรสิทธ์ ประกอบกิจ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวป มีการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป และกรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป จากผลการทดสอบพบว่า อุณหภูมิมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า แต่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าน้อยมาก กรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวปเป็นการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากรณีที่ 1

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, อุณหภูมิ, ระบบอีแวป

Abstract

This paper presents reducing the temperature with the EVAP system to increase electricity generation in photovoltaic. This is a study of reducing the temperature on photovoltaic so that the photovoltaic can produce the best electricity. Testing the electric current, voltage, power, light intensity, and temperature of solar panels. The test was conducted from 9:00 a.m. - 3:00 p.m. divided into 2 case studies: Case 1 : photovoltaic without a cooling fan in an EVAP system, and Case 2 : photovoltaic with a cooling fan in an EVAP system. From the test results, temperature affects voltage and power but has very little effect on electric current in case 2 , photovoltaic with cooling fans in the system EVAP is an installation of photovoltaic that can produce voltage more electrical power than case 1

Keywords: photovoltaic, temperature, EVAP system

1. บทนำ

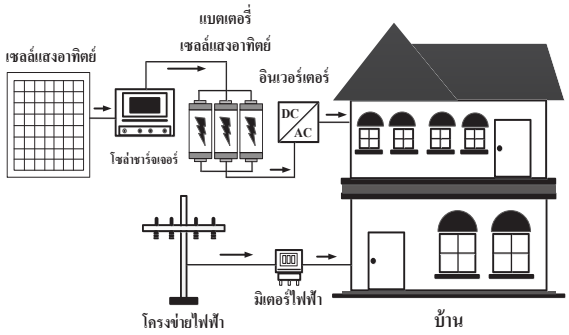
พลังงานไฟฟ้าคือ สิ่งจำเป็นต่อความอยู่รอดของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์นำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการดำรงชีวิต ดังนั้นการผลิตพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งจำเป็น เซลล์แสงอาทิตย์คือ ทางเลือกแห่งอนาคต เซลล์แสงอาทิตย์คือ อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานความเข้มของแสงอาทิตย์ที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงได้ทันที ผลกระทบต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอยู่มากมายหนึ่งนั้นก็คือ อุณหภูมิ การผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้นอุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 25 องศาเซลเซียส

ในปี 2019 [1] การทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางจากอุณหภูมิในการทำงาน โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิต่อเอาท์พุตไดโอด และพารามิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ของเครื่องแปลงไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าความเสถียรของอุณหภูมิของประสิทธิภาพด้วยความหนาแน่นกระแสของไดโอด โดยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20°C เป็น 50°C ในปี 2020 [2] การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อหาข้อบกพร่อง การผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้หลักการตรวจวัด ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด และมีความต่อเนื่อง ในปี 2022 [3] การศึกษาเทคนิคการวิเคราะห์การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยการเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การวิเคราะห์การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ เพื่อแก้ไขปัญหากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจำหน่าย 33 บัส ผลการวิจัยพบว่า การเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายได้

ดังนั้นบทความมีการลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวปเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์ ซึ่งทำการเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตรัลไลน์แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี

2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ซิลิกอน

วัสดุที่สำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์มากที่สุดคือ สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่เรียกว่า ซิลิกอนในปัจจุบันนิยมนำซิลิกอนมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์กันกันอย่างแพร่หลาย เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ผลิตจากซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวซึ่งเป็นซิลิกอนมีความบริสุทธิ์สูง โดยการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวเริ่มจากการนำสารซิลิกอนมาหลอมในเตาเหนี่ยวนำที่อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส เพื่อสร้างให้ซิลิกอนเป็นแท่งผลึกเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท P-type ซิลิกอน และ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท N-type ซิลิกอน การผลิต P-type ซิลิกอนจะมีการใส่โบรอนในกระบวนการผลิต และเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท N-type ซิลิกอน จะถูกเติมด้วยชั้นฟอสฟอรัสในกระบวนการผลิต หลังจากนั้นก็จะทำให้เกิดการเย็นตัวจับตัวกันเป็นผลึกที่มีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่มาก จากนั้นก็จะทำการดึงแท่งผลึกนี้ขึ้นจากเตาหลอม และนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบางๆ ก็จะนำไปเติมสารที่ทำให้เกิดเป็น รอยเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำ 2 ประเภทคือ เซลล์แสงอาทิตย์ประเภท N-type ซิลิกอน และเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท P-type ซิลิกอน ขึ้นบนแผ่นบางๆ ด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าซึ่งที่ผิวบนจะเป็นขั้วลบ ส่วนผิวล่างจะเป็นขั้วบวก จะมีการเคลือบฟิล์มบนผิวหน้าหลังจากนั้นก็นำไปประกอบเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้กระจกเป็นเกราะป้องกันแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้ซิลิโคน และ เอทิลีนไวนิลแอซีเตดที่เป็นเม็ดพลาสติก [4] ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

3. ระบบอีแวป

ระบบอีแวปคือ ระบบทำความเย็นแบบที่ใช้ในการระเหยของน้ำเพื่อช่วยในการทำความเย็นให้มากขึ้นซึ่งจะทำให้สามารถปรับอุณหภูมิได้ตามความต้องการ โดยหลักการทำงานของระบบอีแวปนี้คือ การพาความร้อนจากการระเหยของน้ำที่แผงระเหยน้ำผ่านสื่อกลางระเหยน้ำ โดยการใช้พัดลมดูดอากาศจากภายนอก ไหลผ่านแผงระเหยของน้ำ เพื่อใช้ในการระเหยของที่อยู่บนแผง คุณสมบัติของอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำรวมถึงอากาศบริเวณจุดต่าง ๆ จะมีอุณหภูมิลดลงและมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น [5]

4. ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์คือ สิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นจะมีพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งสิ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิก็คือแรงดันไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 และในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์มีมาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของตัวเซลล์แสงอาทิตย์อยู่แล้ว เช่น ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส กำหนดไว้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิดที่ 30 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสจะค่าเท่ากับ 30 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเปลี่ยนไป นั้นหมายความว่าถ้าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสจะทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 2.5% นั่นคือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่แรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด จะลดลง 0.75 โวลต์ เหลือเพียง 29.25 โวลต์เท่านั้น สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย [6]

กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิต แสดงดังสมการที่ 1 [7]

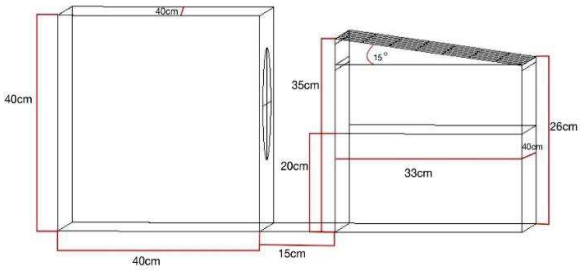
$$I = I_L + I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

เมื่อ

I_L	คือ	กระแสวงจรปิด (A)
I	คือ	กระแสจากโฟตอนที่ตกกระทบพื้นเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
I_0	คือ	กระแสอิ่มตัว (A)
q	คือ	ประจุของอิเล็กตรอน (C)
V	คือ	ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า (V)
n	คือ	Diode ideality factor
k	คือ	ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ ($^{\circ}$)

5. กรณีศึกษา

บทความนี้ได้ทำการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป และกรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แสดงดังรูปที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แสดงดังรูปที่ 3 และเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป



รูปที่ 3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป



รูปที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป

บทความการลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวปเพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์มีอุปกรณ์ดังนี้ 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ 18 โวลต์ 20 วัตต์ 2 แผง 2.เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชุด 3.สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย 12โวลต์ 150 วัตต์ ควบคุมปั๊มน้ำและพัดลม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป เวลาในการทดสอบจะใช้เวลา 3 วัน และหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา เวลาในการทดสอบซึ่งจะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น.

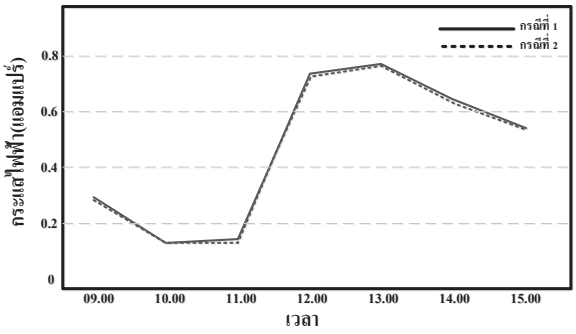
ผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แสดงดังตารางที่ 1 และผลการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป

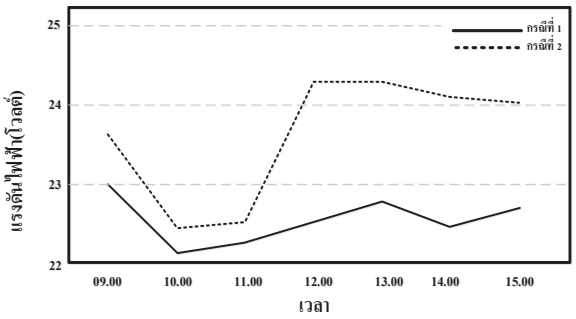
เวลา	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (P)	ความเข้มแสง (W/m)	อุณหภูมิภายใต้แผง ( )
09.00	0.29	22.99	6.60	443.97	34.47
10.00	0.13	22.15	2.80	314.51	31.93
11.00	0.13	22.28	2.97	319.53	31.70
12.00	0.72	22.54	16.22	1007.02	47.87
13.00	0.76	22.79	17.38	1065.69	46.80
14.00	0.63	22.47	14.12	929.96	47.90
15.00	0.54	22.71	12.32	729.92	45.20
ค่าเฉลี่ย	0.46	22.56	10.34	687.23	40.84

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป

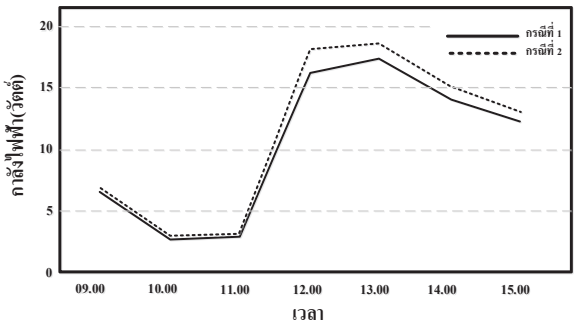
เวลา	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (P)	ความเข้มแสง (W/)	อุณหภูมิภายใต้แผง ( )
09.00	0.28	23.62	6.80	443.97	29.50
10.00	0.13	22.47	3.00	314.51	29.43
11.00	0.14	22.54	3.09	319.53	29.30
12.00	0.73	24.28	18.13	1007.02	34.77
13.00	0.77	24.29	18.61	1065.69	35.37
14.00	0.64	24.10	15.19	929.96	35.00
15.00	0.54	24.03	13.06	729.92	34.83
ค่าเฉลี่ย	0.46	23.62	11.12	687.23	32.60



รูปที่ 5 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2



รูปที่ 6 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2



รูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

6. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการลดอุณหภูมิด้วยระบบอีแวป ซึ่งเป็นการศึกษาทางด้านการลดอุณหภูมิบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ดีที่สุด มีการทดสอบกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 โดยการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ทำมุม 15 องศากับแนวระนาบ และแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป และกรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวป จากรูปที่ 5 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้าของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 รูปที่ 6 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 และรูปที่ 7 ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าของของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 จากผลการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 0.46 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 22.56 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 10.34 วัตต์ และกรณีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้า 0.46 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 23.62 โวลต์ และกำลังไฟฟ้า 11.12 วัตต์ สรุปผลการทดสอบอุณหภูมิมีผลต่อการผลิตแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าซึ่งกรณีที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์แบบมีพัดลมระบายความร้อนในระบบอีแวปเป็นการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้มากกว่ากรณีที่ 1

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Roman Zaitsev, Mykhailo Kirichenko, Gennadiy Khrypunov, Maksim Khrypunov and Kseniia Minakova, " Dependence of the Thin Film Solar Cells Efficiency from Operating Temperature," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, 2019, pp.669-674.

[2] ปพน งามประเสริฐ, พูนศรี วรรณการ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2020). การประเมินศักยภาพการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากโรงไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่าย. *วารสารวิจัยราชมงคลกรุงเทพ*. 14(2), 38 – 49.

[3] ปพน งามประเสริฐ, นริศ ชัชธรานนท์, ทง ลานธารทอง และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ (2022). เทคนิคการวิเคราะห์การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายโดยการเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งรัตนโกสินทร์*. 4(3), 12 – 21.

[4] Kento Kakikawa, Yuji Yamagishi, Katsuto Tanahashi, Hidetaka Takato and Yasuo Cho, "Local Evaluation of Al2O3 Passivation Layers for Monocrystalline Silicon Solar Cells by Super-Higher-Order Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy," 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2018, pp.3118-3121.

[5] Peidong Liu, Linjun Chen, Caijun Luo, Hao Deng, Jing Li, Rui Zhou and Liangping Deng, "The connections between dark rings and efficiency & the analysis of low efficiency in monocrystalline silicon solar cell," 2018 China Semiconductor Technology International Conference, 2018, pp.217-220.

[6] N. Mukisa, R. Zamora and T. T. Lie. "Analysis of Solar Cell Temperature Models used in Solar Photovoltaic Simulating Softwares," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, 2019, pp.124-129.

[7] Petru Valentin Rosu, Adrian-Traian Plesca, Georgel Gabor and Gabriel Chiriac, "Optimizing the Operation of Photovoltaic Panel Systems," 2020 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2020

โมเดลและการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

Modeling and Control of Hybrid Energy Storage System

กฤติพงษ์ ผลอนันต์[1] ธีรภัทร วงษ์กำภู[1] ชุติพนธ์ วิเศษพันธ์[1] กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[2] ประหยัด กองสุข[1] และวัชรากร ปิ่นธุรัตน์[1*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
E-mail: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ระบบกักเก็บพลังงานยังคงมีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพและเสถียรภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการรองรับโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและความไม่แน่นอนของพลังงานทดแทน บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (Hybrid Energy Storage System, HESS) ซึ่งผสานการทำงานของเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงาน 2 ประเภท ได้แก่ แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor, SC) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ โดยแบตเตอรี่เหมาะสำหรับการกักเก็บพลังงานระยะยาว ขณะที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มีความสามารถในการจ่ายพลังงานอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองโหลดที่เปลี่ยนแปลง ในการพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter, LPF) เพื่อแยกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของโหลดและระบบผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ การทดสอบดำเนินการผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดสามารถเพิ่มเสถียรภาพในการจ่ายพลังงาน รองรับโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในระยะยาว

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด, แบตเตอรี่, ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์, การจัดการพลังงาน, พลังงานหมุนเวียน

Abstract

Currently, energy storage systems (ESSs) still have limitations in terms of efficiency and stability, particularly in handling rapid load changes and the uncertainty of renewable energy sources. This paper presents the design of a hybrid energy storage system (HESS), which integrates two types of energy storage technologies: lithium iron phosphate battery and supercapacitor (SC), to enhance system efficiency and stability. The battery is suitable for long-term energy storage, while the supercapacitor can rapidly supply energy to respond to fluctuating loads. In developing the HESS, this study applies a low-pass filter (LPF) to separate the behavior of load variations and solar power generation. The system was tested through simulations using MATLAB Simulink. The obtained results demonstrate that the HESS can improve energy supply stability, efficiently accommodate fluctuating loads, and extend the lifespan of the battery in the long term.

Keywords: Hybrid energy storage system, battery, supercapacitor, energy management, renewable energy.

1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานที่ได้รับความนิยมสูงสุดในระบบพลังงานของยานพาหนะไฟฟ้า เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง อายุการใช้งานยาวนาน ไม่มีผลกระทบจากหน่วยความจำ และมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านความหนาแน่นกำลังและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนทำให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับยานพาหนะไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่ต้องการพลังงานสูงในระยะเวลาสั้น ขณะที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีความหนาแน่นกำลังสูง ใช้เวลาชาร์จสั้น และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่ามากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน แต่ข้อจำกัดหลักของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์คือความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำกว่า ทำให้การใช้งานเพียงอย่างเดียวไม่สามารถตอบสนองความต้องการด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของทั้งสองเทคโนโลยี ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ผสานระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จึงถูกพัฒนาขึ้น ระบบดังกล่าวสามารถรวมข้อดีของทั้งสองเทคโนโลยีได้แก่ ความหนาแน่นพลังงานสูงจากแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตและความหนาแน่นกำลังสูงจากซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการของยานพาหนะไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การจัดการโหลดพลังงานสูงแบบชั่วขณะในยานพาหนะไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างไฮบริดมาบ้างแล้ว แต่งานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการชาร์จของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดยังมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะการชาร์จแบบขนานโดยตรง ซึ่งยังไม่มีการศึกษาเชิงลึก

แม้จะช่วยให้เกิดการบริหารจัดการพลังงานที่ดีขึ้น แต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดด้านระยะเวลาการชาร์จที่ยาวนาน [2, 3]

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ใช้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ร่วมกับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต โดยประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low-Pass Filter, LPF) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันและกำลังไฟฟ้า วงจร LPF ช่วยลดแรงดันกระชากและกรองความแปรผันของแรงดัน รวมถึงป้องกันกระแสพุ่งสูง โดยการจัดสรรค่ากำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงในชั่วขณะจากโหลดและโซลาร์เซลล์ให้กับซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ผลลัพธ์ที่ได้คือช่วยลดภาระของแบตเตอรี่ ยืดอายุการใช้งาน และทำให้ระบบสามารถจ่ายพลังงานได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สามารถแบ่งได้สองส่วน คือ ส่วนโครงสร้างของการนำแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์มาผสานกัน และส่วนของโครงสร้างของระบบกักเก็บพลังงานที่เลือกใช้ในงานนี้

2.1 โครงสร้างของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

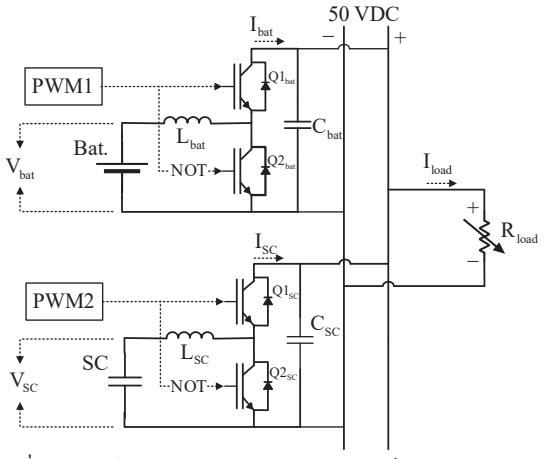
ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดแบ่งออกเป็นสามรูปแบบหลัก ได้แก่ พาสซีฟ (Passive HESS) แอคทีฟ (Active HESS) และฟูลลี่แอคทีฟ (Fully Active HESS) แต่ละแบบมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกัน ระบบพาสซีฟเชื่อมต่อแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์โดยตรง ทำให้ต้นทุนต่ำแต่ควบคุมพลังงานได้น้อย ระบบแอคทีฟใช้ตัวแปลงพลังงานช่วยจัดสรรพลังงานได้ดีขึ้น ลดการเสื่อมของแบตเตอรี่ และรองรับโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้ ส่วนระบบฟูลลี่แอคทีฟใช้ตัวแปลงพลังงานแยกสำหรับแต่ละแหล่ง ทำให้ควบคุมพลังงานได้แม่นยำแต่มีต้นทุนและความซับซ้อนสูง การเลือกใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดจึงขึ้นอยู่กับต้นทุน ประสิทธิภาพ และความต้องการของระบบพลังงาน [3, 4]

2.2 โครงสร้างแบบฟูลลี่แอคทีฟของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้โครงสร้างแบบฟูลลี่แอคทีฟของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด (Fully Active Configuration of Hybrid Energy Storage System) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการจัดการพลังงาน โดยใช้ตัวแปลงพลังงานกำลังแยกอิสระสำหรับแต่ละแหล่งกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ทำให้สามารถควบคุมพลังงานได้อย่างแม่นยำและปรับการทำงานของแต่ละองค์ประกอบได้อย่างเหมาะสม โครงสร้างนี้ช่วยลดภาระของแบตเตอรี่ ปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อย่างไรก็ตาม ระบบฟูลลี่แอคทีฟมีข้อเสียสำคัญได้แก่ ต้นทุนที่สูงขึ้น ความซับซ้อนในการออกแบบและควบคุม รวมถึงความต้องการตัวควบคุมอัจฉริยะที่มีความสามารถสูงเพื่อจัดการการไหลของพลังงานอย่างเหมาะสม แม้ว่ารูปแบบนี้จะเหมาะสมกับระบบที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและความเสถียรของพลังงาน เช่น ระบบพลังงานหมุนเวียนและโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ แต่การนำไปใช้งานจริงอาจต้องพิจารณาความคุ้มค่าและความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นในการดำเนินงานและบำรุงรักษา [4, 5, 6]

3. การออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

ในส่วนนี้ผู้วิจัยแบ่งการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดออกเป็นสองส่วนย่อย คือ ส่วนของวงจรกำลังและส่วนวงจรควบคุม ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้



รูปที่ 1 โครงสร้างแบบฟูลลี่แอคทีฟของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

3.1 วงจรของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างแบบฟูลลี่แอคทีฟของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด ซึ่งประกอบด้วยแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยแต่ละส่วนเชื่อมต่อกับ DC Bus (50 VDC) ผ่านตัวแปลงพลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) ที่เป็นอิสระต่อกัน ระบบแบตเตอรี่ถูกควบคุมโดย PWM1 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการสวิตชิ่งของ MOSFETs ($Q1_{bat}$ และ $Q1_{bat}$) เพื่อจัดการกระบวนการชาร์จและคายประจุ ขณะที่ตัวเหนี่ยวนำ (L_{bat}) และตัวเก็บประจุ (C_{bat}) ช่วยให้การถ่ายโอนพลังงานราบรื่น ส่วนระบบซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ถูกควบคุมโดย PWM2 ซึ่งมี MOSFETs ($Q1_{sc}$ และ $Q1_{sc}$) ตัวเหนี่ยวนำ (L_{sc}) และตัวเก็บประจุ (C_{sc}) ของตัวเองเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอย่างรวดเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ DC Bus ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้โหลด โดยระบบสามารถกระจายพลังงานระหว่างแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้การจัดการพลังงานมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพสูง โครงสร้างนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ให้การควบคุมที่แม่นยำ และรองรับการแบ่งปันพลังงานแบบพลวัต (Dynamics) จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการทั้งการกักเก็บพลังงานระยะยาวและ

การตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงรวดเร็ว เช่น ระบบพลังงานหมุนเวียนและยานยนต์ไฟฟ้า [5, 6]

3.2 ระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

การออกแบบระบบควบคุมของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดโดยใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเริ่มต้นด้วยการกำหนดวงจรควบคุมแรงดัน DC bus โดยมีเป้าหมายเพื่อรักษาระดับแรงดันให้คงที่และลดผลกระทบจากความผันผวนของแหล่งพลังงานและโหลด สามารถนิยามได้ดังนี้

$$C\frac{d}{dt}V_{DC} = i_{hess} + i_{un} \quad (1)$$

โดยที่ V_{DC} คือ ค่าแรงดันของ DC bus, C คือ ค่าความจุไฟฟ้าสมมูลของ DC bus, i_{hess} คือ กระแสรวมของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ใช้ในการควบคุมแรงดัน และ i_{un} คือ กระแสที่แสดงถึงความไม่สมดุลของพลังงานระหว่างแหล่งพลังงานหมุนเวียน และโหลด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i_{un} = i_{res} + i_{load'} \quad (2)$$

โดยที่ i_{res} คือ กระแสจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน และ $i_{load'}$ คือ กระแสที่โหลด ทั้งนี้ ควรสังเกตว่าพลังงานที่เกิดจากกระแสที่ไม่สมดุล i_{un} สามารถมองว่าเป็นสัญญาณรบกวน (Disturbance) จำเป็นต้องได้รับการชดเชยโดยระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด โดยกระแสจากระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดมีสมการดังนี้

$$i_{hess} = i_{sc} + i_{b'} \quad (3)$$

โดยที่ i_{sc} และ $i_{b'}$ เป็นค่ากระแสของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์และกระแสของแบตเตอรี่ ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อแยกองค์ประกอบความถี่ต่ำและความถี่สูงออกจากกระแสอ้างอิง i^*_{hess} ส่งผลให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ หรือ i^*_b และ i^*_{sc} ตามลำดับ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$i^*_b = F(s)i^*_{hess} \quad (4)$$

$$i^*_{sc} = i^*_{hess} - F(s)i^*_{hess} \quad (5)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ของวงจรกรองความถี่ต่ำสามารถนิยามได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F(s) = \frac{1}{\tau s+1} \quad (6)$$

โดยสมการที่ (6) ช่วยรักษาค่าคงที่ของกระแส i^*_{hess} ที่ต้องการไว้หลังจากการแยกความถี่แล้ว [5] ค่ากระแสอ้างอิง i^*_b และ i^*_{sc} จะถูกนำไปใช้ควบคุมกระแสของตัวแปลงพลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional DC-DC Converter) และถูกควบคุมด้วย PI controller ในสภาวะคงที่ (Steady State) กระแส i_bและ i_{sc} จะเท่ากับค่ากระแสอ้างอิง i^*_b และ i^*_{sc} ตามลำดับ ดังนั้น ในอุดมคติแล้วในสภาวะคงที่กระแสอ้างอิงของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$i^*_{hess} = i_b + i_{sc} \quad (7)$$

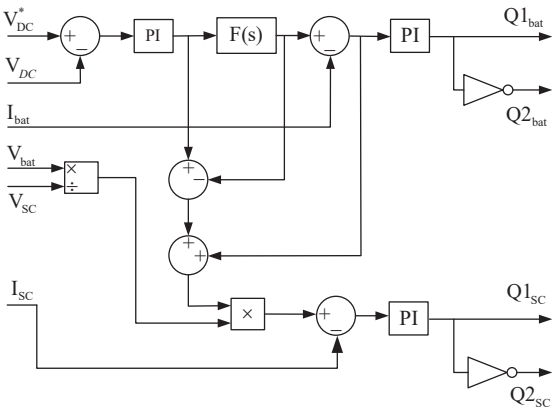
จากสมการที่ (6) ค่าของ τ สามารถออกแบบได้โดยพิจารณาความถี่ของโหลดและแหล่งจ่ายจากพลังงานทดแทนที่ต้องการแยกระหว่างแบตเตอรี่และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ ดังนี้

1) กำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการให้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ตอบสนองต่อโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงเร็ว (ความถี่สูง) และแบตเตอรี่สำหรับโหลดที่เปลี่ยนแปลงช้า (ความถี่ต่ำ) โดยทั่วไปค่าความถี่ f_c อยู่ในช่วง 0.01 Hz - 1 Hz ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

2) คำนวณค่า τ โดยอ้างอิงจากค่าความถี่ตัด (Cut-off Frequency) ที่เลือก ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกค่าความถี่ตัดที่ f_c = 0.1 Hz และสามารถหาค่า τ ได้ดังนี้

$$\tau = \frac{1}{2\pi \times f_c} = \frac{1}{0.628} \approx 1.59\ s \quad (8)$$

ถ้าต้องการให้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์รับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นให้ลดความถี่ตัดลง โดยเพิ่มค่า τ และถ้าต้องการให้แบตเตอรี่รับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นให้เพิ่มความถี่ตัดโดยการลดค่า τ [6] วงจรควบคุมระบบกับเก็บพลังงานแบบไฮบริดโดยใช้ตัวกรองความถี่ต่ำสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



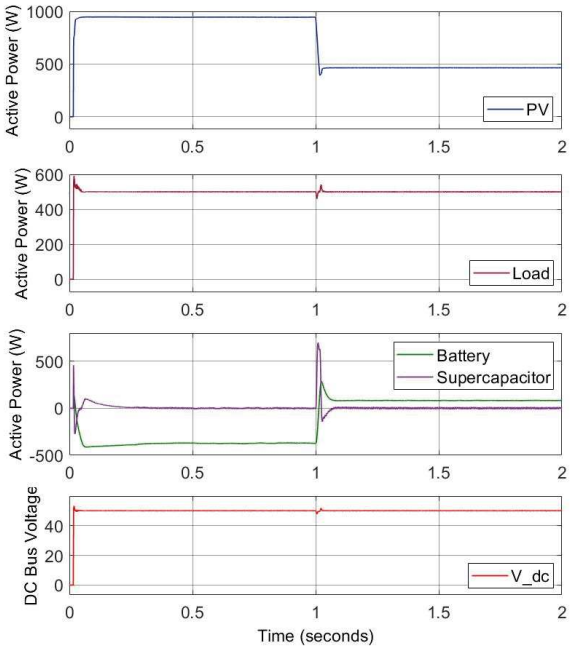
รูปที่ 2 วงจรควบคุมของ Bidirectional DC-DC Converter สำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากรูปที่ 1 ได้มีการติดตั้งโซลาร์เซลล์เพิ่มเติมที่ DC Bus เพื่อทดสอบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่ออกแบบไว้ โดยโซลาร์เซลล์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบถูกควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยวิธี Perturb & Observe เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้า (Maximum Power Generation) ได้สูงสุดตลอดเวลา นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้โซลาร์เซลล์ทำงานที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 (Unity Power Factor)

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่า ในช่วงเริ่มต้น กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์และโหลดมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้น กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์และโหลดเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 980 W และ 500 W ตามลำดับ ในสถานการณ์นี้ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าของโหลด ส่งผลให้

กำลังไฟฟ้าส่วนเกิน (Surplus Power) ประมาณ 480 W (-) ถูกนำไปชาร์จเข้าสู่แบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน ทำให้แบตเตอรี่มีการตอบสนองล่าช้า ส่งผลให้ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์เข้ามาทำหน้าที่รองรับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าวดังที่แสดงในรูปที่ 3 หลังจากที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเสร็จสิ้น กำลังไฟฟ้าของซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะกลับเข้าสู่ศูนย์ ในทำนองเดียวกัน ที่เวลา 1 วินาที กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ลดลง เนื่องจากได้รับแสงน้อยลง ซึ่งอาจเกิดจากเมฆบดบัง ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลงเหลือประมาณ 480 W ขณะที่กำลังไฟฟ้าของโหลดอยู่ที่ประมาณ 500 W ทำให้โหลดต้องการกำลังไฟฟ้าประมาณ 20 W ดังนั้น แบตเตอรี่จำเป็นต้องคายประจุ (+) ประมาณ 20 W เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าที่ขาดไป อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างฉับพลัน แบตเตอรี่จึงตอบสนองได้ช้า เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะเข้ามาทำหน้าที่รองรับการเปลี่ยนแปลงทันทีนี้ และกำลังไฟฟ้าจะกลับเข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ ในระหว่างช่วงที่กำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์เปลี่ยนแปลง ระบบที่ออกแบบสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 50 VDC ได้อย่างมีเสถียรภาพ



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าจริง กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของของโซลาร์เซลล์ โหลด แบตเตอรี่ และซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ และแรงดันไฟฟ้าที่ DC Bus ของระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด ตามลำดับ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด ซึ่งเป็นการผสานการทำงานระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตและซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบพลังงาน โดยแบตเตอรี่ทำหน้าที่กักเก็บพลังงานระยะยาว ขณะที่ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ช่วยจ่ายพลังงานอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองโหลดและความไม่แน่นอนของพลังงานทดแทนที่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้วงจร กรองความถี่ต่ำเพื่อแยกพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของโหลดและโซลาร์เซลล์ พร้อมทั้งทำการจำลองและทดสอบระบบผ่านโปรแกรม MATLAB Simulink ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดสามารถเพิ่มเสถียรภาพในการจ่ายพลังงาน รองรับโหลดและกำลังไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วย ลดภาระของแบตเตอรี่และยืดอายุการใช้งานในระยะยาว ดังนั้น ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่พัฒนาขึ้นนี้จึงมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบพลังงานหมุนเวียนและโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความมั่นคงของระบบพลังงานไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิผล

เอกสารอ้างอิง

[1] G. Ren, H. Wang, C. Chen, and J. Wang, "An energy conservation and environmental improvement solution-ultra-capacitor/battery hybrid power source for vehicular applications," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 44, p. 100998, 2021.

[2] M. Michalczuk, L. M. Grzesiak, and B. Ufnalski, "Experimental parameter identification of battery-ultracapacitor energy storage system," in 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil, pp. 1260-1265, 2015.

[3] M. A. Zabara, C. B. Uzundal, and B. Ülgüt, "Performance modeling of unmanaged hybrid battery/supercapacitor energy storage systems," Journal of Energy Storage, vol. 43, pp. 103185, 2021.

[4] Butterworth, S. "On the theory of filter amplifiers," Wireless Engineer, 7(6), 536-541, 1993.

[5] Ramos, G. A., & Costa-Castelló, R. "Energy management strategies for hybrid energy storage systems based on filter control: Analysis and comparison, " Electronics, vol. 11, no. 10, pp. 1631, 2022.

[6] G. A. Ramos and R. Costa-Castelló, "Energy management strategies for hybrid energy storage systems based on filter control: Analysis and comparison," Electronics, vol. 11 , no. 1631, pp. 1–26, 2022.

การจำลองเพื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้า

Simulation to Design a Filter for Harmonics Caused by The Non-Linear Load of An UPS

อาทิตย์ ขาวรุ่งเรือง[1] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สวาง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการจำลองเพื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้า แบบจำลองประกอบด้วยเครื่องสำรองไฟฟ้า, โหลดไม่เป็นเชิงเส้น และ ตัวกรอง R-L-C ทำการวิเคราะห์ด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ในแบบจำลองเพื่อหาฮาร์มอนิกส์ที่เอาต์พุตของเครื่องสำรองไฟฟ้า ทั้งกรณีที่ไม่ใส่ตัวกรองและกรณีที่ใส่ตัวกรอง ผลจากกรณีที่ไม่ใส่ตัวกรองนั้นมีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมด้านกระแสร้อยละ 76.70 ส่วนกรณีที่ใส่ตัวกรองนั้นความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมด้านกระแส เหลือเพียงร้อยละ 6.13 พิสูจน์ได้ว่าการใส่ตัวกรองที่เอาต์พุตของเครื่องสำรองไฟฟ้าช่วยปรับปรุงฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้า จึงส่งผลดีต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่เครื่องสำรองไฟฟ้าต่อใช้งาน

คำสำคัญ: ฮาร์มอนิกส์, โหลดไม่เป็นเชิงเส้น, เครื่องสำรองไฟฟ้า, ตัวกรอง R-L-C

Abstract

This paper presents a simulation to design a harmonic filter induced by non-linear load of a UPS. The model consists of an Uninterruptible Power Supply (UPS), a non-linear load, and a R-L-C filter. Fast Fourier Transform (FFT) analysis was performed on the model to determine the harmonics at the UPS output in both unfiltered and filtered cases. The result of the case without filter is the total harmonic distortion,i (THD,i) of 76.70%. In the case of adding a filter, the total harmonic distortion,i (THD,i) is only 6.13%. It is proven that adding a filter to the output of the UPS can improve the harmonics caused by the non-linear load of the UPS. It is beneficial to the power quality of the electrical system in the area where the UPS is used.

Keywords: Harmonics, Non-Linear Load, Uninterruptible Power Supply, R-L-C Filter

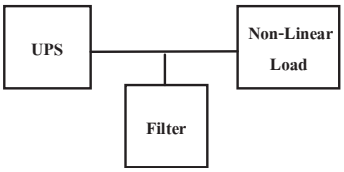
1. บทนำ

คุณภาพกำลังไฟฟ้าถือว่ามีความสำคัญมาก หากมีปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าอาจนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า การสูญเสียข้อมูล หรือแม้แต่ความล้มเหลวของระบบโดยรวม ในอดีตโหลดทางไฟฟ้ามักเป็นโหลดเชิงเส้น เช่นหลอดไฟแบบไส้, มอเตอร์เหนี่ยวนำ และเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดตัวต้านทาน แต่ในช่วง 15-20 ปีที่ผ่านมา โหลดทางไฟฟ้าได้เปลี่ยนเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น เช่นโหลดที่เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือดิจิทัล [1-3]

ด้วยการใช้งานเทคโนโลยีดิจิทัลที่มากขึ้น ศูนย์ข้อมูลจึงมีความสำคัญมากขึ้นตามลำดับ เทคโนโลยีเครือข่ายการส่งข้อมูลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ก็สร้างปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์มากขึ้น ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า [4] เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) ถูกออกแบบมาเพื่อรักษาเสถียรภาพของเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญสูง กรณีที่เกิดไฟฟ้าดับ เครื่องสำรองไฟฟ้าจะช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองให้กับอุปกรณ์จนกว่าระบบไฟฟ้าหลักจะกลับมาจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ตามปกติ อย่างไรก็ตาม โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้พลังงานจากเครื่องสำรองไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายไฟของคอมพิวเตอร์ เซิฟเวอร์ และอุปกรณ์ไอที ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อ UPS ทำให้ความสามารถในการรองรับโหลดลดลง, เกิดความร้อนสะสม, เกิดการแจ้งเตือนความผิดปกติขึ้น [5-6] ภายในเครื่องสำรองไฟฟ้าประกอบด้วย วงจรเรียงกระแส (AC-DC Converter) วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรง-กระแสตรง (DC-DC Converter) และอินเวอร์เตอร์ (DC-AC Converter) ในกรณีพื้นที่ที่ใช้งานโหลดเชิงเส้นเป็นส่วนใหญ่ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้มักจะมีตัวกรองชนิด R-L-C ที่ด้านเอาต์พุตอยู่แล้ว [7-9] ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อลดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมด้านแรงดัน (THD,v) แต่ถ้ามีการใช้งานโหลดไม่เป็นเชิงจำนวนมากขึ้น จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของทั้งความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมด้านแรงดันและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมด้านกระแส (THD,i)

บทความนี้จึงทำการจำลองฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส 400 โวลต์ ด้วยการจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้เทคนิคการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) เพื่อให้ทราบว่าฮาร์มอนิกส์อันดับใดมีขนาดมากจนมี

ผลต่อ THD,i จากนั้นใช้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: QF) และกำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power) ในการกำหนดค่าที่เหมาะสมขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับตัวกรอง R-L-C ภายนอก (Double-Tuned Passive Filter) ที่จะนำมาต่อเพิ่มทางด้านเอาต์พุตของเครื่องสำรองไฟฟ้า ซึ่งตัวกรองดังกล่าวจะสามารถลด THD,i ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 1

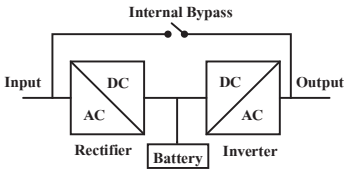


รูปที่ 1 ไดอะแกรมจำลองเชื่อมต่อตัวกรองพาสซีฟแบบขนาน

2. องค์ประกอบที่สำคัญในการจำลอง

2.1 เครื่องสำรองไฟฟ้า

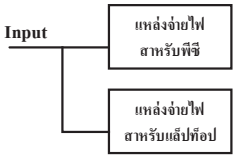
เครื่องสำรองไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง เป็นแบบสแตติกชนิดดับเบิลคอนเวอร์ชั่น ดังไดอะแกรมในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นเครื่องสำรองไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ และป้องกันอุบัติเหตุด้านไฟฟ้าได้ดีที่สุด



รูปที่ 2 เครื่องสำรองไฟฟ้าสแตติกชนิดดับเบิลคอนเวอร์ชั่น

2.2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้น

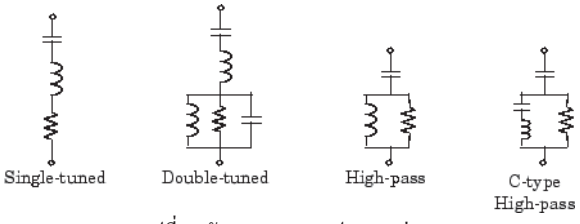
อุปกรณ์ไฟฟ้าที่นำไปต่อทางด้านเอาต์พุต UPS มีการทำงานในรูปแบบสวิตชิ่งซึ่งเป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเช่น แหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี และ แล็ปท็อป ดังไดอะแกรมในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไดอะแกรมแหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี และ แล็ปท็อป

2.2 ตัวกรอง

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับลดฮาร์มอนิกส์ ใช้เพื่อลดความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4 ในบทความนี้เลือกใช้ Double-Tuned Passive Filter



รูปที่ 4 ตัวกรอง R-L-C ประเภทต่างๆ

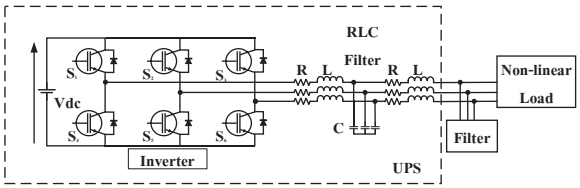
3. การสร้างแบบจำลอง

3.1 การสร้างแบบจำลองระบบ

การจัดวางของอินเวอร์เตอร์สามเฟสแรงดัน 400 โวลต์ ที่ใช้ไอจีบีทีประกอบด้วยสวิตช์สองทิศทาง 6 ตัวที่สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ทั้งสองทิศทางผ่านไดโอดอนุกรมคู่ขนาน และถูกจ่ายพลังงานโดยแหล่งแรงดันกระแสตรงพร้อมกับตัวกรอง R-L-C ภายนอกที่ด้านเอาต์พุตของ UPS ดังแสดงในรูปที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ค่า
แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง VDC [V]	720
ค่าตัวเก็บประจุ C [F]	100e-6
ค่าตัวเหนี่ยวนำ L [H]	500e-6
เวลาการสุ่ม Ts [Sec]	5e-6



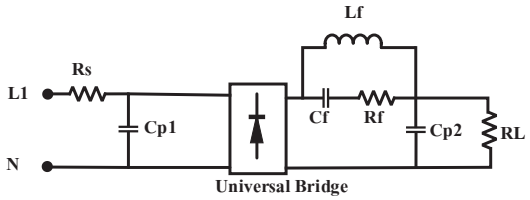
รูปที่ 5 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามเฟสที่ป้อนกำลังให้กับตัวกรอง R-L-C ภายนอกที่เอาต์พุตของ UPS

3.2 แบบจำลองโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำการจำลองนี้ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี [9] และแหล่งจ่ายไฟสำหรับแล็ปท็อป [10] ดังแสดงรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ซึ่งใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี

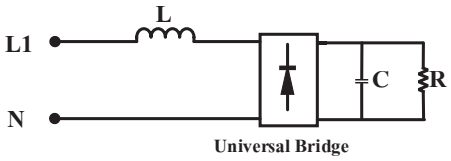
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	Rs [Ω]	RL [kΩ]	Rf [Ω]	Cp1 [μF]	Cf [μF]	Cp2 [μF]	Lf [mH]
แหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี	10	1.7	7	0.82	0.57	600	35



รูปที่ 6 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายไฟสำหรับพีซี

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับแหล่งจ่ายไฟสำหรับแล็ปท็อป

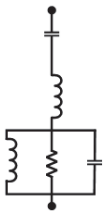
โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	R [Ω]	C [μF]	L [mH]
แหล่งจ่ายไฟสำหรับแล็ปท็อป	493	231	0.78



รูปที่ 7 วงจรสมมูลของแหล่งจ่ายไฟสำหรับแล็ปท็อป

3.3 ตัวกรองแบบพาสซีฟ

ตัวกรอง R-L-C ภายนอก (Double Tuned Passive Filter) ดังแสดงในรูปที่ 8 ทำหน้าที่เดียวกันกับฟิลเตอร์ปรับครั้งเดียวสองตัว มีข้อดีนั่นคือ การสูญเสียจะน้อยกว่า และขนาดอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ของการสั่นพ้องขนานที่เกิดขึ้นระหว่างความถี่การปรับทั้งสองจะต่ำกว่า



รูปที่ 8 ตัวกรอง R-L-C ภายนอก (Double Tuned Passive Filter)

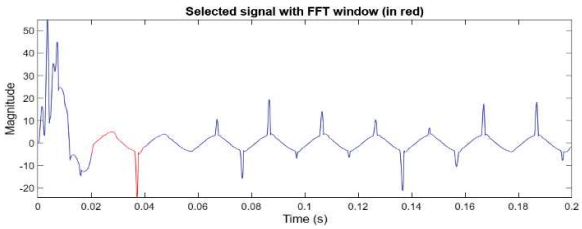
ความถี่เฉลี่ยในการปรับจูน	$f_m=\sqrt{f1f2}$
ปัจจัยด้านคุณภาพ	$Q= R /(L \cdot 2\pi f_m)$
แบนด์วิธ	$B = f_m/Q$
Reactive Power ที่ f_1	$Q_C = (V^2/X_C)\cdot n^2/(n^2 - 1)$
Active Power ที่ f_1 (สูญเสีย)	$P \approx (Q_C/Q)\cdot n/(n^2 - 1)$

เมื่อ

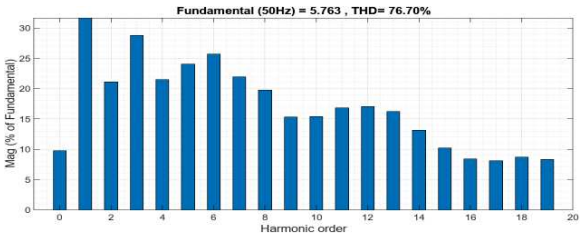
ω = $2\pi f_1$ = ความถี่เชิงมุม
f_m = ความถี่เฉลี่ยในการปรับจูน
n = ลำดับฮาร์มอนิกส์ = (f_n / f_1)
V = แรงดันไฟฟ้าเส้นตรงต่อเส้นที่กำหนด
X_L = รีแอคแตนซ์ตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่พื้นฐาน = $L\omega$
X_C = รีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่พื้นฐาน = $1/(C\omega)$

4. ผลการจำลอง

ผลการจำลองรูปคลื่นไซน์กระแสเอาต์พุตในกรณีที่ไม่ใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ร้อยละ 28.79 และอันดับที่ 5 ร้อยละ 24.07 และมี THD,i ร้อยละ 76.70 แสดงดังรูปที่ 10 จากนั้นใช้ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor: QF) และกำลังรีแอคทีฟ (Reactive Power) [1]

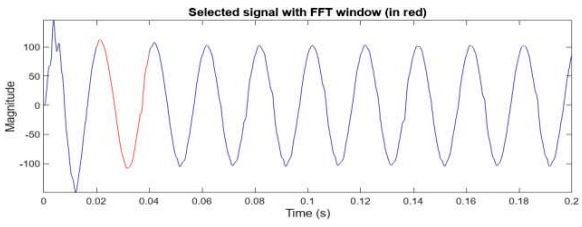


รูปที่ 9 กระแสเอาต์พุตเมื่อไม่ใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก

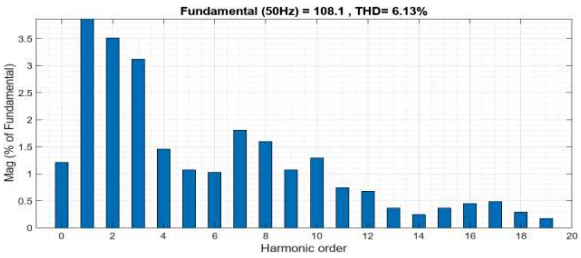


รูปที่ 10 การวิเคราะห์ FFT ของ THD,i เมื่อไม่ใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก

ผลการจำลองรูปคลื่นไซน์กระแสเอาต์พุตในกรณีที่ใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก แสดงดังรูปที่ 11 ซึ่งมีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ร้อยละ 3.12 และอันดับที่ 5 ร้อยละ 1.07 และมี THD,i ร้อยละ 6.13 แสดงดังรูปที่ 12 พบว่า THD,i ลดลงอย่างชัดเจน



รูปที่ 11 กระแสเอาต์พุตเมื่อใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก



รูปที่ 12 การวิเคราะห์ FFT ของ THD,i เมื่อใช้ตัวกรอง R-L-C ภายนอก

5. สรุปผลการจำลอง

บทความนี้เสนอการศึกษาฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของเครื่องสำรองไฟฟ้าโดยการจำลองผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบจำลองประกอบด้วย UPS, โหลดไม่เป็นเชิงเส้น และ ตัวกรอง R-L-C ภายนอก ทำการวิเคราะห์ด้วย FFT ในแบบจำลองเพื่อหาฮาร์มอนิกส์ที่เอาต์พุตของ UPS ซึ่งเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบของฮาร์มอนิกส์อันดับ 3 และ 5 ผลการจำลองจากรูปที่ 10 การวิเคราะห์ FFT ของ THD,i เมื่อไม่ใช้ตัวกรอง คือ ร้อยละ 76.70 และ จากรูปที่ 12 การวิเคราะห์ FFT ของ THD,i เมื่อใช้ตัวกรอง คือ ร้อยละ 6.13 ผลจากการจำลองบ่งชี้ว่าการใส่ตัวกรอง R-L-C ภายนอกด้วยวิธีที่นำเสนอช่วยปรับให้เปอร์เซ็น THD,i ลดลงอย่างชัดเจน ตามมาตรฐาน IEEE 519-2022 เป็นผลให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าบริเวณที่ UPS ใช้งานดีขึ้นเมื่อต้องจ่ายโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับงานในอนาคตจะนำแบบจำลองนี้ไปสร้างเพื่อใช้งานจริงในทางปฏิบัติ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Sufyanu A, "Power Quality and Harmonic Analysis in Three Phase Systems," Journal of Electrical & Electronic Systems 07(04), Dec., 2018, doi: 10.4172/2332-0796.1000291.

[2] P. S. Sanjan, N. Gowtham, Mahajan Sagar Bhaskar, Umashankar Subramaniam, Dhafer J. Almakhles and Sanjeevikumar Padmanaban, "Enhancement of Power Quality in Domestic Loads Using Harmonic Filters," IEEE Access, Vol. 8, pp. 197730 – 197744, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034734.

[3] K. RaiČ Raguž, M. MiletiĆ, V. ZeleniČiĆ, D. Sumina, I. Erceg and Ž. NastasiĆ, "Analysis of current harmonics in data center power system, " 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), Jun.27, 2022.

[4] Marcos Poletto Godoy, Vinicius André Uberti, Alzenira da Rosa Abaide, Gabriel Drehmer Guidali, Lúcio Renê Prade and Armando Leopoldo Keller, "Identifying and reducing harmonic distortion in an industrial uninterruptible power supply system, " 2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Jan.06, 2021.

[5] C. Boonseng, R. Boosseng and K. Kularbphettong, "Simple Techniques for Designing Passive Power Filter System to Reduced Harmonic Resonance and Improve Power Quality of Electrical Systems with Servo Drive," 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Dec.22, 2022.

[6] C. Boonseng, R. Boosseng and K. Kularbphettong, "The 3rd Harmonic current and Power Quality Improvements of Data Centers Using Hybrid Power Filters," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Dec.05, 2019, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8922558.

[7] Patricio Cortes, Gabriel Ortiz, Juan I. Yuz, JosÉ Rodriguez, Sergio Vazquez and Leopoldo G. Franquelo, "Model Predictive Control of an Inverter With Output LC Filter for UPS Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, Feb.27, 2009.

[8] Iftissen Nabil, Mokrane Hamza, Abdelmalek Samir and Dali Ali, "Model Predictive Voltage Control of Uninterruptible Power Supply with an Output RLC Filter," 2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM), Feb.13, 2024, doi: 10.1109/IC2EM59347.2023.10419462.

[9] Surendra Bajagain and Anamika Dubey, "Harmonic Distortion Analysis in North American Residential Power Distribution Systems," 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Dec.20, 2021.

[10] Ayekpam Jagadananda, Lourembam Lastrong Mangang, Mayanglambam Sam Meitei, Bunusagar Nongmaithem, Sorokhaibam Nilakanta Meitei and Nameirakpam Basanta Singh," Analysis of Harmonic Generated by Household Electronic Equipments with SMPS Using Matlab® Simulink®," 2024 6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Sep.11, 2024.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบพยากรณ์ไฟด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Fire forecasting design using artificial neural networks and fuzzy logic

ปิยะบุตร แก้วรัชนี ชัยมงคล เพ็งเต็ม กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ และ ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
Corresponding author e-mail: sillawat.r@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพยากรณ์หาแนวโน้มที่อาจจะก่อให้เกิดไฟไหม้ด้วยเทคนิคโครงข่ายประสามเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น จำนวน 232 ค่า และค่าของการทดสอบชุดข้อมูลจำนวน 51 ค่า โมเดลที่นำเสนอมีตัวแปรอินพุต 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ ความชื้น และมีเอาต์พุตเป็นค่าความน่าจะเป็นของเหตุเพลิงไหม้ โดยใช้ค่าฟังชันก์สมาชิก (Membership Function) แบบ Triangular ผลการเรียนรู้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลลัพธ์ก่อนการปรับปรุงพบว่าค่าอัตราความผิดพลาดอยู่ที่ 1.9161 เปอร์เซ็นต์ระหว่างค่าจริงและค่าที่พยากรณ์ของชุดข้อมูลดิบจากเซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น หลังจากการปรับปรุงโดยวิธีที่นำเสนอแล้วพบว่าค่าที่ทำการออกแบบการพยากรณ์มีค่าความผิดพลาด 0.273363 เปอร์เซ็นต์ ฉะนั้นโมเดลที่ปรับปรุงแล้วมีความแม่นยำสูงถึง 99.726637 เปอร์เซ็นต์ การออกแบบพยากรณ์เหตุไฟไหม้จึงให้ผลที่มีประสิทธิภาพสูง และยังสามารถนำไปใช้กับพื้นที่ อาคารที่พักอาศัยและโรงงานอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: การพยากรณ์, โครงข่ายประสาทเทียม, ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

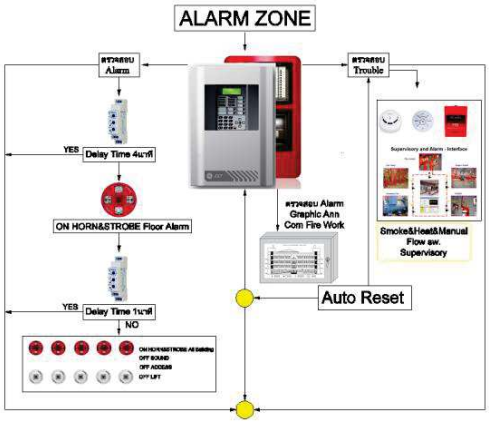
Abstract

This paper presents the prediction of the potential fire and its error value from the data obtained from 232 temperature and humidity sensors and 51 The proposed model has two input variables, namely temperature and humidity, and outputs the probability of fire occurrence using the Triangular Membership Function. test data sets using an Artificial Neural Network (ANN) technique with fuzzy logic method. The learning result of the ANN shows that the result before the improvement has the error rate The proposed model has two input variables, namely temperature and humidity, and outputs the probability of fire occurrence using the Triangular Membership Function. of 1.9161 percent between the actual value and the forecast value of the raw data set from the temperature and humidity sensors. After the improvement, the designed forecast value has the error rate of 0.273363 %. Therefore, the efficiency of the proposed method was 99.726637 %. Fire forecast design gives high efficiency and can also be applied to areas such as residential building and industrial areas.

Keywords: Forecasting, Artificial Neural Network, Fuzzy Logic

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบแจ้งเหตุไฟไหม้มีการพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงขึ้นในการตรวจจับเหตุการณ์ไฟไหม้ โดยทั่วไปแล้วระบบจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ [1]



รูปที่ 1 แผนภูมิสัญญาณเตือนไฟไหม้อาคารที่พักอาศัย

จากรูปที่ 1 ระบบแจ้งเหตุไฟไหม้ใช้เซ็นเซอร์ควัน, ความร้อนและปุ่มแจ้งเหตุเพื่อตรวจจับไฟไหม้และส่งสัญญาณไปยังตู้ควบคุมระบบ (Fire Alarm Control Panel) ซึ่งจะหน่วงเวลา 4 นาทีและแจ้งเตือนที่ชั้นเกิดเหตุ หากสัญญาณยังคงอยู่ ระบบจะส่งสัญญาณเตือนทั่วทั้งอาคารและสั่งการอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ระบบระบายอากาศและลิฟต์ หากมีปัญหาจะเข้าสู่โหมด Trouble และรีเซ็ตเมื่อปัญหาแก้ไข ระบบดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำโดยเฉพาะในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนหรือสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการตรวจจับ[1].

การพยากรณ์เหตุไฟไหม้ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการผสานระหว่างโครงข่ายประสาทเทียมและตรรกศาสตร์คลุมเครือซึ่งมีจุดเด่นในด้านการจัดการข้อมูลไม่แน่นอน เช่น Nakip et al. (2021) ได้เสนอโมเดล RNN สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์ ซึ่งช่วยให้การตรวจจับไฟแม่นยำยิ่งขึ้น [2] ด้าน Sarwar et al. (2018) พัฒนา Fuzzy Logic สำหรับระบบอาคารอัจฉริยะเพื่อลดการแจ้งเตือนผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน [3] ในทำนองเดียวกัน Kiethson et al. (2022) ได้ออกแบบระบบแจ้งเตือนไฟที่ใช้กฎฟัซซี ได้แก่ แก๊ส ควัน และอุณหภูมิ โดยประยุกต์ใช้งานผ่าน MATLAB เพื่อให้สามารถตรวจจับได้แม่นยำและลด false alarm อย่างมีประสิทธิภาพ [4] ส่วน Hashim et al. (2020) แสดงให้เห็นถึงการใช้ ANFIS กับระบบที่มีหลายอินพุต ซึ่งสามารถวิเคราะห์และปรับปรุงระบบได้ดีในสภาพข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนสูง [5]

2. การออกแบบหาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

การใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถเขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของหาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยได้ดังสมการที่ (4) และทดสอบระบบดังสมการที่ ดังต่อไปนี้

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_i)^2} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 ใช้วัดความคลาดเคลื่อนของค่าพยากรณ์เทียบกับค่าจริงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือโดยที่ y_i คือ ค่าจริง (Actual Value) ของข้อมูลที่ $i, \hat{y}_i$ คือ ค่าที่คาดการณ์ (Predicted Value) ของข้อมูลที่ i, N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3. ระบบโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกะคลุมเครือ

อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกะคลุมเครือในการออกแบบโมเดลนี้ใช้โมเดลฟัซซีมีฟังก์ชันสมาชิกเพื่อแปลงข้อมูลเป็นค่าฟัซซีในขณะที่เครือข่ายประสาทเทียมจะเรียนรู้และปรับปรุงพารามิเตอร์ ฟังก์ชันสมาชิกเป็นสิ่งสำคัญในการแปลงข้อมูลให้เป็นค่าฟัซซี สามารถเขียนได้เป็นสมการการเป็นสมาชิก (Membership Function) เช่น Sigmoid Membership Function ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้กันมากในตรรกะคลุมเคลือ

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + e^{-k(x-y)}} \quad (2)$$

โดยที่ $\mu_A(x)$ คือค่าฟังก์ชันสมาชิกของชุด A คือค่าของข้อมูล x, k คือค่าคงที่กำหนดความชันของกราฟ และ y คือจุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน เมื่อได้ค่าฟัซซีแล้วจะใช้กฎฟัซซีในการคำนวณผลลัพธ์จากอินพุตหลายๆ ตัว

$$\text{OUTPUT} = \sum_i \omega_i f(x_i) \quad (3)$$

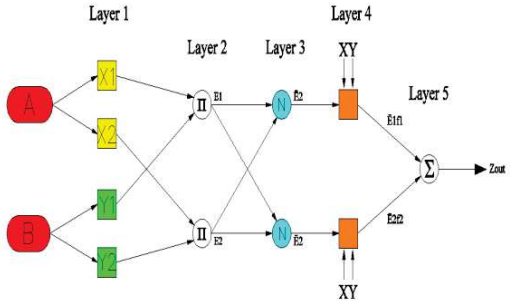
ω_i คือค่าความสำคัญของแต่ละกฎฟัซซี และ $f(x_i)$ คือฟังก์ชันที่คำนวณผลลัพธ์จากอินพุต

$$\Delta\omega = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega} \quad (4)$$

ที่ $\Delta\omega$ คือการน้ำหนัก, η คืออัตราการเรียนรู้ (learning rate), และ $\frac{\partial E}{\partial \omega}$ คืออนุพันธ์ของข้อผิดพลาดตามน้ำหนัก

4. ออกแบบระบบเครือข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกะคลุมเครือ

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลเกี่ยวกับ ผลของข้อมูลดิบที่ได้มาจากการผลของเซ็นเซอร์ที่ทำการตรวจเช็คค่าอุณหภูมิ ความชื้น เพื่อนำมาใช้ประมวลผลข้อมูลการเรียนรู้และประมวลข้อมูลทดสอบ แนวทางการปฏิบัติจะมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 แผนผังของแบบจำลอง ANFIS

4.1 กำหนดโครงสร้างของ Fuzzy Inference System (FIS)

ใช้การปรับขนาดข้อมูล Min-Max Normalization ของข้อมูลเพื่อปรับชุดข้อมูลให้อยู่ในช่วงต่างๆหรือช่วงที่ต้องการได้

$$CR_{normalized} = \frac{CR_x - min(CR_x)}{max(CR_x) - min(CR_x)} \quad (5)$$

$CR_{normalized}$ เป็นค่าที่จะกำหนดให้อยู่ระหว่าง [0,1] (CR_x) ค่าของตัวแปร X (เช่น อุณหภูมิ, ความชื้น) เวลาปัจจุบัน $min(CR_x)$ ค่าX เวลาก่อนหน้า, $max(CR_x)$

4.2 กำหนดฟังก์ชันสมาชิก (Fuzzy Membership Functions)

ในการทำ Fuzzifier เพื่อใช้แปลงค่าตัวแปรอินพุต (Crisp Input) ให้เป็นค่าฟัซซี่ (Fuzzy Value) โดยจะใช้ฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function, MF) Triangular เพื่อกำหนดระดับของตัวแปรอินพุต

$$\mu_{(x)} = \begin{cases} 0 & if\ x \le a\ or\ x \ge c \\ \dfrac{x-a}{b-a} & if\ a < x < b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & if\ b < x < c \end{cases} \qquad (6)$$

4.3 การกำหนดกฎฟัซซี่ (Fuzzy Rule Base)

การกำหนดกฎฟัซซี่ (Fuzzy Rule Base) เป็นขั้นตอนสำคัญในระบบฟัซซี โดยกฎฟัซซีจะกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต โดยทั่วไปสามารถเขียนกฎฟัซซีให้อยู่ในรูปแบบของ IF-THEN ดังสมการที่ (11),(12).

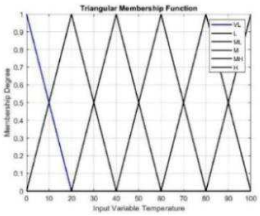
IF x1 is x AND t1 is m THEN z1 = p1A + q1B + r1 (7)

IF x2 is x AND t2 is m THEN z2 = p2A + q2B + r2 (8)

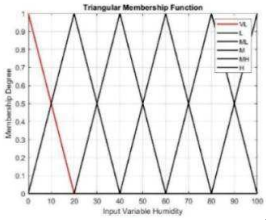
การตั้งค่ารูปแบบของกฎ (Rule) และการกำหนดเงื่อนไขความเหมาะสมของชุดข้อมูล (Data System) เป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกะคลุมเครือ (Neuro-Fuzzy) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยให้สามารถเลือกฟังก์ชันสมาชิก (Membership Function, MF) ที่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลและการจำแนกสถานะของโมเดลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ช่วง	a	b	c
Very Low	0	10	20
Low	10	20	40
Medium Low	20	40	60
Medium	40	60	80
Medium High	60	80	100
High	80	100	100

ตารางที่ 1 ช่วงของความเป็นสมาชิก Membership Function(MF) ตัวแปรอินพุต อุณหภูมิ ความชื้น



รูปที่ 3 ความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิ



รูปที่ 4 ความเป็นสมาชิกของความชื้น

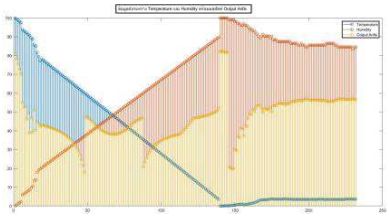
4.4 คำนวณ Defuzzification (Crisp Output) ด้วย Centroid Method

$$\text{Crisp Output} = \frac{\sum \mu(x).x}{\sum \mu(x)} \qquad \textbf{(9)}$$

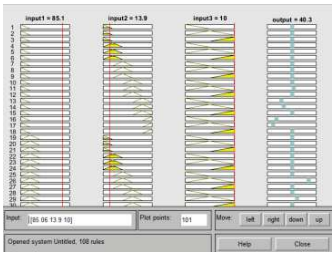
โดยที่ x = ค่าอุณหภูมิ หรือ ความชื้น ที่ทำ Max- min Normalization และ $\mu(x)$ ค่าความเป็นสมาชิก การ Defuzzification การแปลงค่าฟัซซีให้เป็นค่าชัดเจน (Crisp Output) และ Centroid Method (วิธีจุดศูนย์กลาง

4.5 รายละเอียดชุดข้อมูลและการกำหนดค่าจริง

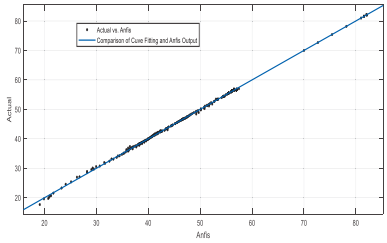
ข้อมูลจากเซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้นรวมจำนวน 283 ตัวอย่าง แบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน 232 ตัวอย่าง และข้อมูลทดสอบ 51 ตัวอย่าง โดยเลือกใช้อุณหภูมิช่วง 27.7°C ถึง 57°C และความชื้นสัมพัทธ์ 20% ถึง 90% เป็นตัวแปรอินพุตหลัก และเปลี่ยนแปลงชัดเจนในช่วงเริ่มต้นของการเกิดเพลิงไหม้ ค่าที่แท้จริงของอินพุตเอาต์พุตที่ใช้ในการฝึกโมเดล เป็นค่าความน่าจะเป็นของการเกิดไฟไหม้ โดยแสดงในช่วง 0–100% ตามการประเมินสถานการณ์ที่จำลองไว้ล่วงหน้า ซึ่งผลลัพธ์ของโมเดล ANFIS ที่เรียนรู้จากข้อมูลดังกล่าวจะแสดงให้เห็นในกราฟประกอบที่ 5



รูปที่ 5 แสดงข้อมูลอินพุต Temperature และ Humidity พร้อมค่าผลลัพธ์จากโมเดล ANFIS สำหรับชุดข้อมูลฝึก



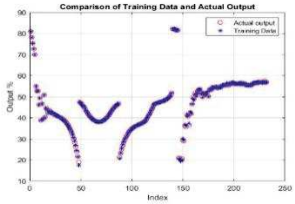
รูปที่ 6. การแสดงผลของระบบ ANFIS ด้วยชุดข้อมูลอินพุต



รูปที่ 8 เปรียบเทียบ ANFIS ด้วย Curve Fitting

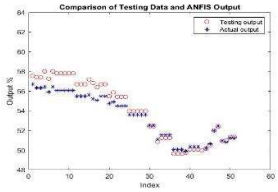
5. ผลการทดลอง

แสดงให้เห็นว่าระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือกับการผสานกับโครงข่ายประสาทเทียมช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดข้อผิดพลาด โดยทดสอบกับข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น พบว่ามีค่าความผิดพลาดที่น้อยมาก



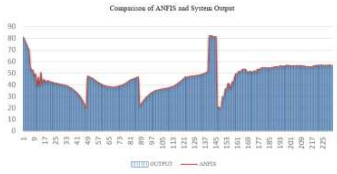
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบข้อมูลการฝึกอบรมและผลลัพธ์ของ FIS

จากรูปที่ 5 การฝึก ANFIS แสดงผลโมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า FIS Output ใกล้เคียงกับข้อมูลฝึกสอน ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.27748% บอกถึงความแม่นยำของโมเดล และลดข้อบกพร่องในการใช้งานจริง.



รูปที่ 6 ข้อมูลการทดสอบ ANFIS

จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าพยากรณ์ของโมเดลใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีข้อผิดพลาดเฉลี่ยต่ำ สะท้อนถึงความแม่นยำและประสิทธิภาพในการออกแบบการพยากรณ์.



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบ ANFIS และผลลัพธ์ชุดข้อมูล

จากรูปที่ 7 และ 8 เป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าจริง (OUTPUT) และค่าของโมเดล ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) ซึ่งทำให้เห็นว่าโมเดลได้เรียนรู้รูปแบบของข้อมูลและการพยากรณ์ได้อย่างแม่นยำ Curve Fitting แสดงให้เห็นว่าค่าผลลัพธ์จากโมเดล ANFIS มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับค่าจริง (OUTPUT) อย่างชัดเจน จุดข้อมูลกระจายตัวตามแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งบ่งบอกว่าโมเดลสามารถประมาณค่าผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำและมีความสอดคล้องสูงกับข้อมูลจริง

6 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีออกแบบพยากรณ์เหตุไฟไหม้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดความผิดพลาดโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น และระบบ ANFIS ถูกนำมาใช้เพื่อเรียนรู้และปรับปรุงกฎของฟัซซี ผลลัพธ์ทำให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกสถานการณ์ไฟไหม้ได้อย่างแม่นยำ.

เอกสารอ้างอิง

[1] Elsevier Inc., "Fire Alarm and Mass Notification Systems," Smart Building Systems for Architects, Owners, and Builders, Chapter 9, 2010. DOI: 10.1016/B978-1-85617-653-8.00009-0.

[2] M. Nakip, C. Güzelis, and O. Yildiz, "Recurrent Trend Predictive Neural Network for Multi-Sensor Fire Detection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 84204–84215, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3087736.

[3] B. Sarwar, I. S. Bajwa, S. Ramzan, B. Ramzan, and M. Kausar, "Design and Application of Fuzzy Logic Based Fire Monitoring and Warning Systems for Smart Buildings," Symmetry, vol. 10, no. 11, p. 615, 2018. DOI: 10.3390/sym10110615.

[4] Kiethson, B. A. A., Khairuddin, I. M., et al. (2022). *Artificial* Intelligence Approach For Fire Monitoring and Warning System Design. Mekatronika,Vol.4,Issue2,58–63.

[5] Hashim, W. A., Mohammed Alawy, F. A., & Hameed, J. H. (2020). Multi Input Single Output Fuzzy Model to Evaluate the Performance of Distance Education Media.

สถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบ V2G ที่ควบคุมด้วยความเฉื่อยเสมือนเพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพความถี่ในระบบที่มีการใช้ทรัพยากรแบบอินเวอร์เตอร์ในสัดส่วนสูง

Virtual Inertia Controlled V2G Charging Station for Enhancing Frequency Stability with High Penetration of Inverter Based-Resources

ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล[1] กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1] และ ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1*]
[1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
E-mail: sillawat.r@en.rmutt.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงเสถียรภาพความถี่ของระบบกริดผ่านการค้นหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm; GA) และ ออกแบบตัวควบคุมความเฉื่อยเสมือน (Virtual Inertia Control; VIC) สำหรับสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบ Vehicle-to-grid (V2G) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มุ่งเน้นการปรับปรุงเสถียรภาพความถี่และเสถียรของแรงดันไฟฟ้าของระบบกริด วิธีการที่เสนอทดสอบกับระบบ IEEE 15 บัสภายใต้สถานการณ์ประกอบไปด้วย กรณีที่ 1 ไม่ติดตั้งสถานีอัดประจุแบบ V2G กรณีที่ 2 ค้นหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ของ V2G โดยใช้ GA ร่วมกับตัวควบคุมแบบ VIC และกรณีที่ 3 ทดสอบการรบกวนอย่างกะทันหันในกรณีที่ 2. โดยดำเนินการทดสอบด้วยอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ในลูป (HIL) และบอร์ดC2000 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่เสนอสามารถปรับปรุงเสถียรภาพความถี่ได้เมื่อเกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลังได้

คำสำคัญ: สถานีประจุ V2G, การควบคุมความเฉื่อยเสมือน, วิธีทางพันธุกรรม, ฮาร์ดแวร์ในลูป, บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

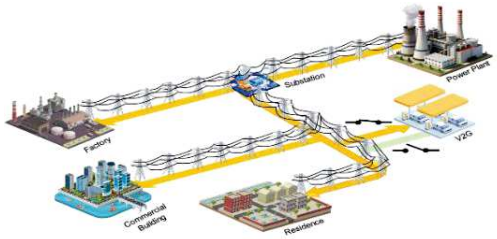
Abstract

This paper presents a methodology to improve grid power quality through optimal location and sizing using a Genetic Algorithm (GA) as well as a Virtual Inertia Control (VIC) design for Vehicle-to-Grid (V2G) systems. The objective functions focus on enhancing frequency, and voltage stability to meet grid code requirements. The proposed method was applied to the IEEE 15-bus system under various scenarios: Case I—without V2G; Case II—optimal location and sizing in conjunction with PI parameter control of V2G using GA compared to VIC; and Case III—the disturbance in Case II. Effectiveness was verified through hardware-in-the-loop (HIL) and c2000 microcontroller testing. Experimental results indicate that the proposed method improves power frequency stability during the grid disturbance.

Keywords: Vehicle-to-Grid, Virtual Inertia Control, Genetic Algorithms, Hardware-in-the-Loop, Embedded Control

1. บทนำ

การนำรถยนต์ไฟฟ้า (Electrical Vehicle - EVs) มาใช้ในวงกว้างอาจส่งผลกระทบอย่างมากต่อระบบไฟฟ้า เนื่องจากการชาร์จ EVs จะเพิ่มการใช้ไฟฟ้าโดยรวมและเปลี่ยนแปลงความต้องการโหลด ซึ่งมักจะสอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีความต้องการสูงสุด ความต้องการที่เพิ่มขึ้นนี้จำเป็นต้องมีการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าและพึ่งพาแหล่งพลังงานกระจาย (Distributed Energy Resource - DER) มากขึ้นเพื่อให้แน่ใจว่าระบบไฟฟ้าเกิดความเสถียร อย่างไรก็ตามความไม่แน่นอนของ DER ก่อให้เกิดความท้าทายเพิ่มเติมในการรักษาเสถียรภาพความถี่ของระบบไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้า อีกประการหนึ่งของการนำ EVs มาใช้คือความเฉื่อยของระบบที่ลดลงทำให้เกิดความผันผวนของความถี่ก็จะตกต่ำลง [1]



รูปที่ 1 การติดตั้ง V2G ในระบบกริด

เทคโนโลยี Vehicle-to-grid (V2G) ได้กลายเป็นอีกหนึ่งวิธีการในการแก้ไขปัญหาความเสถียรความถี่ในระบบไฟฟ้า[2] เนื่องจาก EVs สามารถคืนกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งช่วยรักษาเสถียรภาพความถี่และแรงดันไฟฟ้าโดยรวมได้ EV จึงเป็นแนวทางสำหรับการรักษาสมดุลระหว่างความต้องการกำลังไฟฟ้าและกำลังการผลิต ระบบ V2G ยังสามารถทำหน้าที่เป็นพลังงานสำรองในช่วงที่มีความต้องการสูงสุดหรือการผลิตพลังงานจาก DER อยู่ในระดับต่ำแสดงดังรูปที่ 1 ดังนั้นบทความนี้นำเสนอสร้างเสถียรภาพความถี่ในระบบด้วยความเฉื่อยเสมือนเพื่อเสริมสร้างเสถียรภาพความถี่ในระบบที่มีการใช้ทรัพยากรแบบอินเวอร์เตอร์ในสัดส่วนสูง แนวทางของเราพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ความแปรผันของเอาต์พุต DER และข้อกำหนดของระบบกริด เพื่อพัฒนาวิธีการที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ได้กับระบบไฟฟ้ากำลังในอนาคตได้

2. ข้อกำหนดปัญหา (Problem statements)

ข้อกำหนดปัญหาในบทความนี้ได้จำแนกเป็นสามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดที่ระบุตามที่อธิบายไว้ด้านล่าง โดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม เนื่องจากวิธี GA มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหา [3] และระบุคำตอบที่ดีที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้

2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective functions)

1) การลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power loss reduction)

ฟังก์ชันประสงค์ที่หนึ่ง คือ ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ให้น้อยที่สุด (P_{loss}) ดังแสดงในสมการ (1)

$$f_1 = \min\left(P_{loss}\right) \tag{1}$$

เมื่อ f_1 คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง และ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2)

$$\min\ P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}\left(P_i P_j - P_i Q_j\right) + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}\left(Q_i P_j + Q_i Q_j\right) \tag{2}$$

เมื่อ P_i และ P_j คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหนด i และ j. Q_i และ Q_j คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหนด i และ j. สุดท้าย a_{ij} และ b_{ij} คือ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับบัสตามลำดับ

2) ข้อผิดพลาดของกำลังสองเชิงปริพันธ์ (Integral square error)

ฟังก์ชันเป้าหมายที่สอง คือ ลดข้อผิดพลาดของกำลังสองเชิงปริพันธ์ให้เหลือน้อยที่สุด (ISE) แสดงเป็นสมการ (3)

$$f_2 = \min\left(ISE\right) \tag{3}$$

เมื่อ f_2 คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สอง และ ISE คือ ข้อผิดพลาดของกำลังสองเชิงปริพันธ์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) เมื่อ Δf_{grid} คือ การเปลี่ยนแปลงของความถี่ระบบไฟฟ้า

$$\min \quad ISE = \int_0^t \left(\Delta f_{grid}\right)^2 dt \tag{4}$$

3) ข้อผิดพลาดของอินทิกรัลสัมบูรณ์ (Integral absolute error)

ฟังก์ชันเป้าหมายที่สาม คือ ลดข้อผิดพลาดของอินทิกรัลสัมบูรณ์ให้เหลือน้อยที่สุด (IAE) แสดงเป็นสมการ (5)

$$f_3 = \min\left(IAE\right) \tag{5}$$

เมื่อ f_3 คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สาม และ IAE คือ ข้อผิดพลาดของอินทิกรัลสัมบูรณ์ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\min \quad IAE = \int_0^t \left(\left|\Delta f_{grid}\right|\right) dt \tag{6}$$

2.2 ข้อจำกัดของระบบไฟฟ้า (Power system constraints)

ข้อจำกัดที่กำหนดในกรณีศึกษาแบ่งออกได้ดังนี้

1) ข้อจำกัดความสมดุลของกำลังไฟฟ้า (Power balance constraints)

สมการความสมดุลของกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าจะถูกกำหนดโดยใช้สมการ (7) ในขณะที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าสามารถแสดงโดยสมการ (8)

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} + \sum_{i=1}^{N_G} P_{DR,i} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{D,i}^0 + P_{loss} \tag{7}$$

$$P_{demand} = sum\left(P_{G,i}\right) - P_{loss} \tag{8}$$

เมื่อ P_{Gi} คือ กำลังไฟฟ้าจริงจากระบบกริด $P_{DR,i}$ คือ ความต้องการทางกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้ากำลัง P_{Di}^0 คือ ความต้องการทางกำลังไฟฟ้าจริงของระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงเวลาเริ่มต้น และ N_G คือ จำนวนบัสในระบบไฟฟ้ากำลัง

2) ข้อจำกัดของระดับแรงดันไฟฟ้า (Bus voltage constraint)

การกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสตามขีดจำกัดความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าที่ระบุไว้ในระบบกริด ตามสมการ (10)

$$V_{\min} \le V_i \le V_{\max} \tag{10}$$

โดยที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดและสูงสุดมีค่าเท่ากับ $V_{\min} = 0.95$ pu.และ $V_{\max} = 1.05$ pu. ตามลำดับ

4) ข้อจำกัดการผลิตกำลังไฟฟ้า (Power generation constraint)

กำลังไฟขาออกของสถานีอัดประจุแบบ V2G จะต้องได้รับการควบคุมภายในขีดจำกัดต่ำสุดและสูงสุดที่กำหนดโดยข้อกำหนดของระบบกริด ขีดจำกัดการผลิตเหล่านี้แสดงอยู่ในสมการ (11)

$$P_{V2G}^{\min} < P_{V2G} < P_{V2G}^{\max} \tag{11}$$

2.3 ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

การกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ V2G ภายในระบบจำหน่ายได้ ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ถูกกำหนดไว้ในสมการ (12)

$$f = \min\left(w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3\right) \quad (12)$$

ประกอบด้วย

$$g\left(x,u\right) = 0 \quad (13)$$

และ $$h\left(x,u\right) \le 0 \quad (14)$$

เมื่อ g แสดงถึงข้อจำกัดที่มีเครื่องหมายเท่ากับและ h ข้อจำกัดที่มีเครื่องหมายไม่เท่ากับของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งหมด

3. แบบจำลองทางพลวัตของการเปลี่ยนแปลงความถี่

การเปลี่ยนแปลงของความถี่ระบบไฟฟ้า (Δf) มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันตามการเชื่อมต่อที่มีอยู่เดิมในระบบ สามารถแสดงดังนี้:

3.1 การออกแบบสถานีอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้า แบบ V2G

บทความนี้มุ่งเน้นที่การควบคุมแบบ PI เป็นหลัก โดยวงจร V2G เชื่อมต่อกับระบบส่งกำลังและรับสัญญาณกำลังไฟฟ้าและความถี่จากระบบกริดเพื่อคำนวณ การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่คำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$P_{V2G} = \begin{cases} K_{V2G}\Delta f \;\; if \;\; \left|K_{V2G}\right|\Delta f \le P_{\max} \\ P_{\max} \;\; if \;\; \left(P_{\max} < K_{V2G}\Delta f\right) \end{cases} \quad (15)$$

$$K_{V2G} = K_{\max}\left(1-\left(\frac{SOC \;-\; SOC_{\,low(high)}}{SOC_{\,\max(\min)} \;-\; SOC_{\,low(high)}}\right)\right) \quad (16)$$

เมื่อ K_{V2G} คือ สถานะการชาร์จของ V2G และ P_{V2G} คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของ V2G นอกจากนี้ K_{V2G} ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดในสมการ (16) เมื่อ SOC_{low}, SOC_{high}, $SOC_{\max}$ และ $SOC_{\min}$ โดยพารามิเตอร์ดังกล่าว ถูกควบคุมโดยใช้การควบคุมการเบี่ยงเบนของ SOC

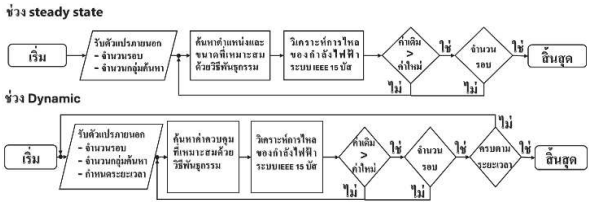
3.2 การควบคุมความเฉื่อยเสมือน

การติดตั้งตัวควบคุมความเฉื่อยเสมือนเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของความถี่หลังจากการรบกวนจากโหลดหรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเฉื่อยต่ำ (K_{VI}) เพื่อให้ VIC สามารถชดเชยการขาดความพร้อมใช้งานของความเฉื่อยโดยธรรมชาติของระบบ [4] สามารถคำนวณดังสมการที่ (17)

$$\Delta P_{inertia} = -K_{VI}\frac{d\left(\Delta f\right)}{dt} \quad (17)$$

4 อัลกอริทึมทางพันธุกรรม

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีทางพันธุกรรม เป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่ง จำลองกระบวนการวิวัฒนาการทางชีววิทยา GA เริ่มต้นด้วยประชากรของโครโมโซมที่สุ่มขึ้น ซึ่งจะนำไปผ่านการคัดเลือก (Selection) การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) การครอสโอเวอร์จะรวมยีนเฉพาะจากโครโมโซมที่เลือกไว้เพื่อสร้างสายพันธุ์ใหม่ ซึ่งแสดงถึงโซลูชันที่เป็นไปได้



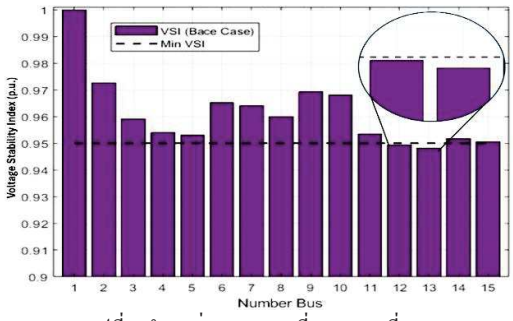
รูปที่ 2 แผนภาพการหาตำแหน่งและขนาดของ V2G ร่วมกับการควบคุม PI ที่เหมาะสม

5. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเกี่ยวกับ V2G ในการศึกษานี้มีความจุแบตเตอรี่ตั้งแต่ 11.5 kWh ซึ่งยังกำหนดเป็นอัตราการคายประจุของ EV ในบทความนี้ด้วย ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดไว้ดังหัวข้อข้างต้น

1) กรณีศึกษาที่ 1

ผลลัพธ์ของกรณีศึกษานี้แสดงดังรูปที่ 3 แสดงระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อไม่มีการติดตั้ง V2G พบว่าระดับแรงดันไฟฟ้าบัส 13 และ 14 อยู่ต่ำกว่า 0.95 p.u. ซึ่งไม่ผ่านข้อกำหนดแสดงดังรูปที่ 3



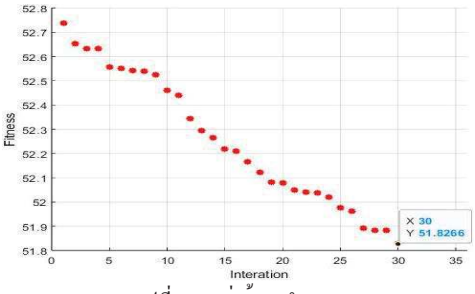
รูปที่ 3 ตำแหน่งของ V2G ที่เหมาะสมที่สุด

2) กรณีศึกษาที่ 2

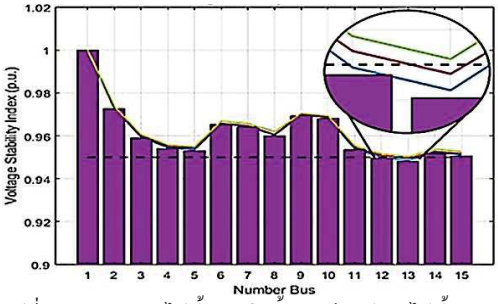
กรณีศึกษานี้ได้หาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ V2G ร่วมกับการปรับปรุงพารามิเตอร์ PI อย่างเดียว โดยใช้วิธี GA แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ดีที่สุดได้ตำแหน่งบัสที่ 11, 12 และ 13 ซึ่งได้ค่า K_p และ K_i ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ที่ปรับให้เหมาะสมแสดงในตารางที่ 1 มีส่วนช่วยรักษาเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้า (VSI) ในช่วงที่มีโหลดสูง จากรูปที่ 5 ประกอบด้วยเส้น 3 เส้นดังนี้: สีแดงสำหรับรอบที่ 1 สีน้ำเงินสำหรับรอบที่ 2 และเส้นเดียวเหนือเส้นประสีดำ ซึ่งระบุรอบที่เหมาะสมสำหรับรอบที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แบบอักษรและขนาดสำหรับส่วนต่าง ๆ ของบทความ

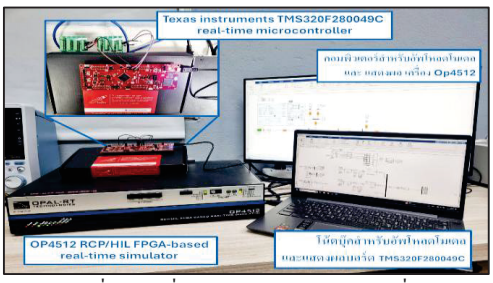
	K_p				K_I			
ตัวแปร	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4
ก่อน	250	$1x10^4$	100	$5\ x10^3$	250	$1x10^4$	100	$5\ x10^3$
หลัง	680	643	617	601	417	214	675	346



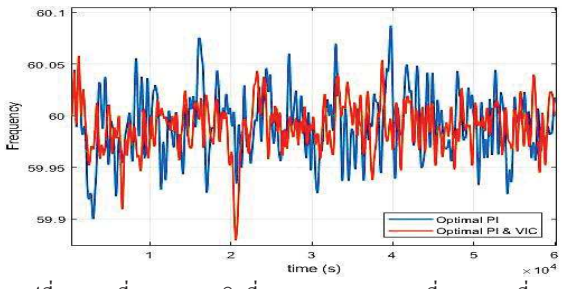
รูปที่ 4 การลู่เข้าหาคำตอบ



รูปที่ 5 ระดับแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งสถานีอัดประจุไฟฟ้า V2G



รูปที่ 6 ชุดเครื่องมือทดสอบในกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 7 ความถี่ของระบบกริดที่ควบคุม PI และ VIC ที่เหมาะสมที่สุด

3) กรณีศึกษาที่ 3

กรณีศึกษานี้นำวิธีการแบบ VIC ร่วมกับ PI ในกรณีศึกษาที่ 2 โดยทดสอบประสิทธิภาพการทำงานด้วยฮาร์ดแวร์อินเดอะลูป (HIL) โดยใช้เครื่อง OP4512 RCP/HIL FPGA-based real-time simulator ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผลบนจอภาพพร้อมบอร์ด Texas Instruments TMS320F280049C Real-Time ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการจำลองในส่วนคอนโทรลเลอร์จริงแสดงดังรูปที่ 6 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของสถานีชาร์จ V2G ร่วมกับตัวควบคุม PI และ VIC ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด สามารถรักษาเสถียรภาพความถี่และเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าได้ภายใต้สถานการณ์การรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อเปรียบเทียบความถี่ของระบบระหว่างการควบคุม PI กับ VIC จะพบว่า การควบคุม VIC สามารถรักษาความถี่ได้ดีกว่า แสดงดังรูปที่ 7

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาเสถียรภาพความถี่และเถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีสถานการณ์การรบกวนด้วยตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของสถานีชาร์จ V2G ร่วมกับตัวควบคุม PI และ VIC ด้วยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่

นำเสนอสามารถรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าและความถี่ระบบไฟฟ้าด้วยการติดตั้งสถานีอัดประจุแบบ V2G โดยใช้ GA ค้นหาขนาดช่วงส่งกำลังไฟฟ้าเข้าระบบกริดได้ 11.5 kW จำนวน 3 จุด ที่บัส 11, 12 และ 13 กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดเหลือ 51.827 kW เมื่อความถี่ของระบบกริดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่า IAE เท่ากับ 0.007 และค่า ISE เท่ากับ 0.00013 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ยอมรับได้ในบทความนี้ ประสิทธิภาพของเทคนิคการควบคุมที่เสนอสำหรับระบบบัส IEEE 15 แม้จะอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนต่างๆ ก็ตาม ได้รับการพิสูจน์ผ่านผลลัพธ์จากการจำลองแบบธรรมดาและแบบเรียลไทม์

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Madnani, R. Basu and M. K. Mishra, "Adaptive Droop Based Bidirectional V2G Charging Station for Grid Frequency Regulation and Improved Power Quality," 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-9, doi: 10.23919/EPE23ECCEEurope5841.

[2] M. Mohammadilandi and E. Shalooyi, "Optimal Placement of PEV Parking Lots with Flexible Charging Control in Power Distribution Systems," 2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM), Mazandaran, Babol, Iran, Islamic Republic of, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICTEM56862.2023.10083585.

[3] S. Deeum et al., "Optimal Placement of EV Fast Charging Stations and Distributed PV/BESS in Power Distribution System based on Minimized Power Loss," 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC57400.2023.10562004.

[4] Kerdphol, T.; Rahman, F.S.; Mitani, Y.; Hongesombut, K.; Küfeoğlu, S. Virtual Inertia Control-Based Model Predictive Control for Microgrid Frequency Stabilization Considering High Renewable Energy Integration. Sustainability 2017, 9, 773. https://doi.org/10.3390/su9050773

การจำลองปัจจัยด้านพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

The Shadow Spatial Composition Differentiates on the Amorphous Type Photovoltaic

ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว, นเรศ ชลังสุทธิ์, นาวิน รอดเรือง, พูนศรี วรรณการ, กฤธพล ธรรมวิรัตน์, สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-836-3000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการจำลองปัจจัยด้านพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ซึ่งได้ทำการทดสอบเพื่อให้เห็นว่าพื้นที่ของเงาบังที่มีพื้นที่ที่แตกต่างกันบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อมีการผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าอย่างไร ซึ่งมีช่วงเวลาในการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีเงาบัง กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 5 กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 12.5 กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 50 และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 100 จากผลการทดสอบพบว่าผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส นั้นมีผลทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้านั้นลดลงตามสัดส่วนของเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์, อะมอร์ฟัส, เงาบัง

Abstract

This paper is shadow spatial composition differentiates on the amorphous type photovoltaic. Tests were carried out to reveal that the shaded area is different on amorphous photovoltaic. That can affect the production of electricity and voltage, which has a testing period from 9:00 a.m. - 3:00 p.m., dividing the case studies into 5 cases. Case 1: Installation of photovoltaic without shade, Case 2 Installation of photovoltaic with 5 percent shade, Case 3 Installation of photovoltaic with 12.5 percent shade, Case 4 Installation of photovoltaic with 50 percent shade and Case 5 Installation of photovoltaic with 100 percent shade. The results it was found that shading effect on amorphous photovoltaic. That has an effect on the generation of electricity and the voltage decreases in proportion to the shadow on the photovoltaic.

Keywords: photovoltaic, amorphous, shadow

1. บทนำ

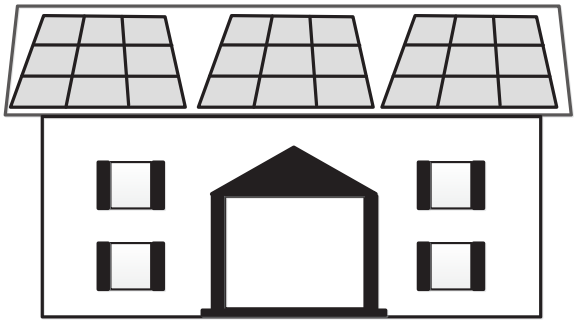
พลังงานแสงอาทิตย์ คือ พลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สามารถผลิตได้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่อยู่ในรูปของแสงแดด พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานหมุนเวียนสะอาดที่ไม่มีวันหมด ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งใช้เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และการผลิตพลังงานความร้อน [1]

ในปี 2019 [2] ได้มีการศึกษาการเปรียบเทียบปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าโดยฟาร์มโซล่าเซลล์ในระบบจำหน่ายด้วยอัลกอริทึมการไหลของพลังงาน ผลลัพธ์ของวิจัยนี้พบว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้ ในปี 2020 [3] มีการศึกษากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ด้วยการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทดสอบในแบบจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 33 บัส ในปี 2022 [4] มีการวางแผนดำเนินการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่าย โดยใช้การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายซึ่งทดสอบในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส เป็นการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ก่อนที่จะมีการใช้ในระบบจริงจากผลการทดลองใน MATLAB พบว่าสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายได้ ในปี 2022 [5] การลดการสูญเสียพลังงานโดยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ทำการทดลองลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดร้อยละ 50 ของความต้องการโหลด ทำการวิเคราะห์ 4 กรณีในระบบกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB กรณีที่ 1 ไม่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ กรณี 2, 3 และ 4 ติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดร้อยละ 50 ของโหลดขนาดเล็ก กลางและใหญ่ตามลำดับ พบว่ากรณีที่ 4 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้มากที่สุดส่งผลให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากที่สุด

ดังนั้นการจำลองปัจจัยด้านพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส โดยทำการเปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัส ต่อพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันและมีกรณีศึกษา 5 กรณี

2. วิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง โดยอาศัยคุณสมบัติสำคัญที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก” ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1839 โดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อ เอ็ดมอนด์ เบกแรล ได้สังเกตเห็นการเกิดแรงดันไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์เมื่อมีแสงตกกระทบ ในปี 1876 มีการค้นพบปรากฏการณ์นี้ขึ้นในสารซีลีเนียมต่อมาได้มีการพัฒนาโดยที่ใช้สาร ซีลีเนียม และสารประกอบของ คอปเปอร์ออกไซด์ ในปี 1941 มีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อสารพี-เอ็น โดยวิธีการทรานซิสเตอร์แบบไบโพลาร์ชนิดแรกที่ถูกสร้างขึ้นโดย วิลเลียม ช็อคลีย์ เทคโนโลยีดังกล่าวมีส่วนอย่างมากในการพัฒนาของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ ในปี 1954 กลุ่มนักวิจัยจากบริษัทโทรศัพท์เบลล์ได้ประกาศความสำเร็จในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของผลึกซิลิกอนขึ้นมาเป็นผลสำเร็จ แต่ในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 6 เท่านั้น ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เซลล์แสงอาทิตย์ถูกพัฒนาและสร้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพและการลดต้นทุนตัวโครงสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงมีการขยายการใช้งานเป็นวงกว้าง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิ์ภาพถึงร้อยละ 25 ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในปัจจุบัน [6] เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา แสดงดังรูปที่ 1

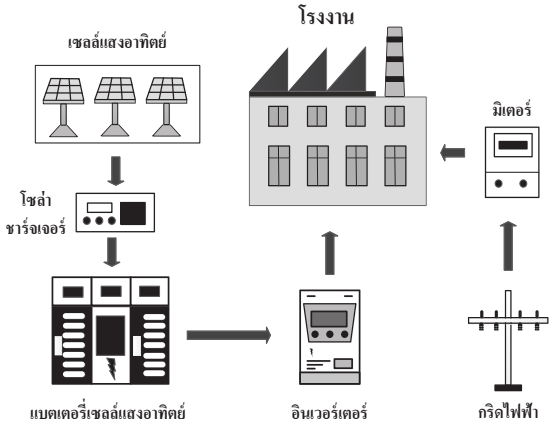


รูปที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

3. แบตเตอรี่ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักสำคัญ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าได้ และแบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์ [7]

แบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์เสริมของระบบพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่จัดเก็บไฟฟ้าส่วนที่เกินกว่าการใช้งานจากโหลดในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีการสร้างปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งมีไว้ใช้สำหรับสำรองพลังงานไฟฟ้าเอาไว้เพื่อใช้งานในอนาคต เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกเก็บเอาไว้ที่แบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์ในเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในเวลากลางคืน เนื่องจากเอาท์พุตที่ได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอด [8] แบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบตเตอรี่เซลล์แสงอาทิตย์

4. เงาบังบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มักถูกสร้างขึ้นบนพื้นดิน บนยอดเขา บนหลังคา หรือแม้กระทั่งบนพื้นน้ำ ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับผลกระทบต่อการยึดติดของฝุ่น ทราย หิมะ น้ำแข็ง หรือแม้กระทั่งสภาพแวดล้อมโดยรอบโรงไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป อาจจะมีพืชพรรณหนาทึบรอบๆ สถานีไฟฟ้าบนผิวน้ำและสถานีไฟฟ้าเสริมใยแก้วนำแสงจากป่าไม้ และภูเขา พืชพรรณ วัชพืช และใบไม้ที่ร่วงหล่นจะก่อตัวเป็นร่มเงา นกจะอยู่บนพื้นผิวของโมดูล โดยทิ้งสิ่งขับถ่าย ขนนก และฝุ่นละอองอื่นๆ ไว้ โดยสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดเงาบังบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในทุกสถานการณ์ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้า บางส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง หรือถ้าเกิดเงาบังเกินร้อยละ 50 เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เลย ดังนั้นวิธีแก้ไขคือ การเลือกพื้นที่ติดตั้งที่เหมาะสม ควรเลือกพื้นที่ติดตั้งที่ไม่มีต้นไม้ อาคาร หรือภูเขาบดบังแสงแดดในช่วงกลางวัน การออกแบบและติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้เหมาะสม ควรติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในมุมที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถรับแสงแดดได้อย่างเต็มที่ [9]

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ 1 [10]

$$n = \frac{P}{s \; H \; m} \quad (1)$$

เมื่อ

คือ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)

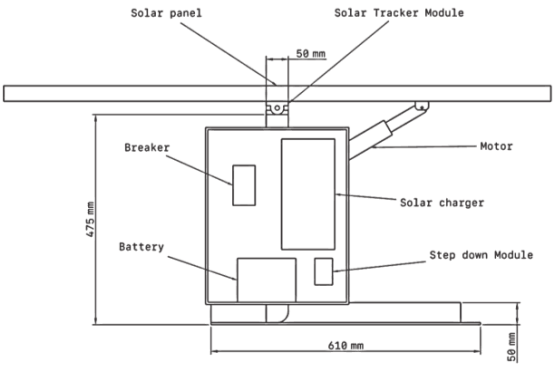
| คือ กำลังงานเอาท์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

s คือ ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ (W/ §

m คือ พื้นที่ติดตั้งของเซลล์แสงอาทิตย์ (§

6. กรณีศึกษา

บทความนี้นำเสนอการจำลองปัจจัยด้านพื้นที่ของเงาบังที่แตกต่างกันบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซึ่งศึกษาผลกระทบต่อการผลิตแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี แต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 4 วัน และหาค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. ได้แก่ กรณีที่ 1 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบไม่มีเงาบัง กรณีที่ 2 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 5 กรณีที่ 3 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 12.5 กรณีที่ 4 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 50 และกรณีที่ 5 การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังร้อยละ 100 บทความนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยมีการออกแบบ และสร้างชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ชุดเป็นการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเงาบังโดยมีอุปกรณ์ประกอบด้วยดังนี้ 1.เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส 48 โวลต์ 85 วัตต์ 2.โซลาร์ชาร์เจอร์ 60 แอมป์ 3.แบตเตอรี่ 12โวลต์ 4.เบรคเกอร์ 16 แอมป์ เซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโซลาร์ชาร์เจอร์ และเก็บพลังงานไฟฟ้าเอาไว้ที่แบตเตอรี่ ซึ่งมุมการรับแสงคือแนวระนาบ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 3 เงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์



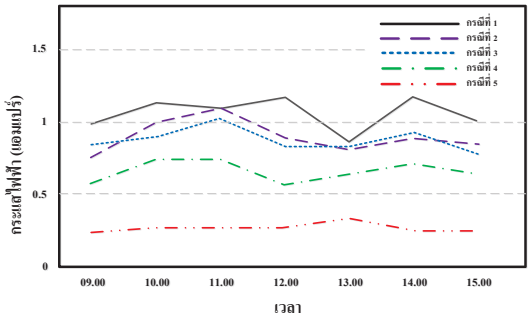
รูปที่ 4 เงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ในแนวระนาบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกระแสไฟฟ้า

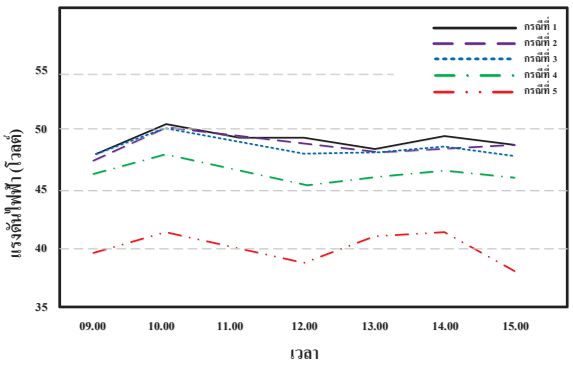
เวลา	กรณีที่ 1 (แอมแปร์)	กรณีที่ 2 (แอมแปร์)	กรณีที่ 3 (แอมแปร์)	กรณีที่ 4 (แอมแปร์)	กรณีที่ 5 (แอมแปร์)
09.00	0.98	0.75	0.84	0.58	0.24
10.00	1.12	0.99	0.89	0.74	0.27
11.00	1.10	1.09	1.01	0.73	0.28
12.00	1.17	0.90	0.83	0.56	0.27
13.00	0.85	0.82	0.84	0.64	0.34
14.00	1.16	0.88	0.92	0.71	0.24
15.00	1.01	0.84	0.78	0.64	0.25
ค่าเฉลี่ย	1.05	0.89	0.87	0.65	0.27

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้า

เวลา	กรณีที่ 1 (โวลต์)	กรณีที่ 2 (โวลต์)	กรณีที่ 3 (โวลต์)	กรณีที่ 4 (โวลต์)	กรณีที่ 5 (โวลต์)
09.00	47.90	47.40	47.90	46.30	39.70
10.00	50.40	50.18	49.97	47.79	41.29
11.00	49.44	49.50	48.83	46.52	39.84
12.00	49.32	48.93	48.02	45.29	38.66
13.00	48.50	48.08	48.07	46.02	40.85
14.00	49.32	48.50	48.56	46.36	41.38
15.00	48.72	48.69	47.86	46.05	38.21
ค่าเฉลี่ย	49.08	48.75	48.45	46.33	39.99



รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าทั้ง 5 กรณี



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทั้ง 5 กรณี

6. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้เป็นกรณีศึกษาการเปรียบเทียบผลกระทบของเงาบังบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ซึ่งได้ทำการทดสอบเพื่อให้เห็นว่าปัจจัยที่ทำให้กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าลดลง คือพื้นที่ของเงาบังบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งมีช่วงเวลาในการทดสอบตั้งแต่เวลา 9.00 – 15.00 น. โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณี จากรูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าทั้ง 5 กรณี และรูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทั้ง 5 กรณี จากการทดสอบพบว่ากรณีที่ 1 มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 แอมแปร์ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 49.08 โวลต์ กรณีที่ 2 มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.89 แอมแปร์ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 48.75 โวลต์ กรณีที่ 3 มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.87 แอมแปร์ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 48.45 โวลต์ กรณีที่ 4 มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.65 แอมแปร์ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 46.33 โวลต์ กรณีที่ 5 มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.27 แอมแปร์ และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 39.99 โวลต์ จากผลการทดสอบพบว่า ผลกระทบเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส นั้นมีผลทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้านั้นลดลงตามสัดส่วนของเงาบังบนเซลล์แสงอาทิตย์

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Pavan Fuke, Shoubhik De, Narendra Shiradkar and Anil Kottantharayil, " Effect of Soiling on the PV Module Temperature and Soiling Loss Estimation," 2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference, 2024, pp.1328-1331.

[2] Papon Ngamprasert, Nattachote Rugthaicharoencheep and Sakhon Woothipatanapan, "Application Improvement of Voltage Profile by Photovoltaic Farm on Distribution System," 2019 International Conference on Power Energy, Oct. 2019. pp.98-101.

[3] Ravindranath, Adda and others. Solar voltaic generation power plants: 1000 MW to 10 kW photovoltaic plant design and application guide the Pacific Northwest. IEEE Conference, 2020.

[4] N. Ruangsap, S. Nedphokaew, and N. Rugthaicharoencheep, “Planning and Operation Enhanced Voltage Profile by Using Distributed Generators Installation in Distribution System with Feeder Reconfiguration,” in 2022 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Pattaya Chonburi, Thailand, 2022.

[5] M. Boonthienthong, S. Woothipatanapan, N. Ruangsap, S. Nedphokaew, and N. Rugthaicharoencheep, “Power Loss Reduction by Installation Photovoltaic Distributed Generators with 50 Percent of The Load Requirement in Power Systems,” in The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45), Nakhon Nayok, Thailand, 2022.

[6] Salwa Ali Ahmed, Gaber Desouki and Ahmed Hafez Zaki," Technology evolution of solar cells and its reflections on the Egyptian electrical power networks," 2015 Saudi Arabia Smart Grid, 2015.

[7] Yuexi Yang, Xiao Zhou, Sichao Wang, Chunpeng Li, Junwei Huang and Wenzheng Xu, "A Coordinated MMC Control Strategy of Integrated Photovoltaic/Battery System," 2023 IEEE International Conference on Energy Internet, 2023, pp.241-245.

[8] Juliia Daus, Danil Desyatnichenko and Gennadiy Stepanchuk " Analysis of Approaches to Determining Solar Radiation Intensity at Preset Geographical Point," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2020.

[9] Napat Chatrung, " Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia ,2019, pp.589-593.

[10] Chairma Lakshmi K R, Vijay Anandh R, K. Rajalakshmi, Seena Simon, Golden Stepha and Gnanasekaran T, " Impact of Shadow or Dust on Solar Photovoltaic Power Generation System," 2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems, 2023.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การแยกแยะระหว่างการผิดพร่องลงดินกับเพาเวอร์สวิงของรีเลย์ระยะทางด้วยวิธีการอนุพันธ์อันดับสอง

Design of an Algorithm to Distinguish between Short Circuit Faults and Power Swings for a Distance Relay using Second Derivative Methods

สิทธิพันธ์ เธียรชาติอนันต์[1]* ธีรธรรม บุณยะกุล[1] และ นพดล ฉาบแก้ว[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

s6301011810081@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

รีเลย์ระยะทางทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่รับค่ามาจากหม้อแปลงแรงดันและหม้อแปลงกระแส ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์คำนวณนั้นมีค่ามากกว่าที่ตั้งขอบเขตไว้ แสดงว่าระบบอยู่ในสภาวะปกติ และในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่รีเลย์คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าที่ตั้งขอบเขตไว้ แสดงว่ามีการเกิดความผิดพร่องในระบบรีเลย์จะสั่งให้ดำเนินการตัดวงจรสายส่งไฟฟ้ากำลังเส้นนั้นในทันที วิธีการที่ใช้ในแยกแยะระหว่างความผิดพร่องและเพาเวอร์สวิงคือการใช้หลักการอนุพันธ์อันดับสองระหว่างระยะที่ 5 และ ระยะที่ 6 ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ในการจำลองผลของสัญญาณแรงดันและกระแสเพื่อนำค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไปใช้ในการออกแบบอัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลองรีเลย์ระยะทางด้วยโปรแกรม MATLAB

คำสำคัญ : รับค่าแรงดันและกระแสคำนวณอิมพีแดนซ์รีเลย์ระยะทางเพาเวอร์-สวิง การอนุพันธ์อันดับสอง ความผิดพร่อง และระยะที่ 5 ระยะที่ 6

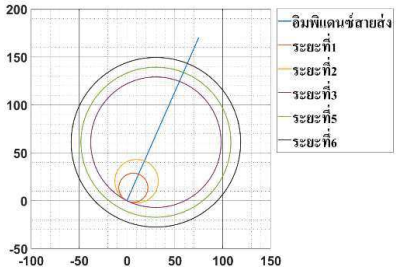
Abstract

The distance relay will calculate the impedance value received from the voltage transformer and the current transformer. In the case that the impedance value calculated by the relay is greater than the set limit, it means that the system is in normal condition. In the case that the impedance value calculated by the relay is less than the set limit, it means that there is a fault in the system. The relay will immediately order to cut off the power transmission line. The method used to distinguish between faults and power swing is to use the principle of The second derivative of impedance between Zone 5 and Zone 6 with PSCAD/EMTDC program to simulate the effect of voltage and current signals to use the voltage and current signal values to design the algorithm to create the distance relay simulation on MATLAB.

Keywords: Sampling Signal, Impedance Trajectory, Distance Relay, Power Swing, second derivative, Faults, and Zone 5 Zone 6

1. บทนำ

โมห์รีเลย์ (MHO Relay) เป็นส่วนหนึ่งของรีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) โมห์รีเลย์จะทำงานโดยการวัดระยะทางจากตำแหน่งที่ติดตั้งรีเลย์ไปยังจุดที่เกิดความผิดพร่อง โดยใช้หลักการในการตรวจจับระยะความผิดพร่อง โมห์รีเลย์จะรับค่าต่างๆผ่านการวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ จากนั้นโมห์รีเลย์จะคำนวณอิมพีแดนซ์เพื่อตรวจสอบความผิดพร่องที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ โมห์รีเลย์มีบทบาทสำคัญในการรักษาความเสถียรและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า ช่วยลดความเสี่ยงและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดพร่องในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 1 วงกลมของโมห์รีเลย์

เพาเวอร์สวิง (Power swing) เกิดได้เมื่อเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส (Synchronous Machine) มีการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) ในช่วงเวลานึง ที่ไม่ทำให้เกิดการหลุดของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส (Loss of Synchronism) จึงทำให้เกิดการแกว่งขึ้นของกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) ที่จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัส

การเกิดเพาเวอร์สวิงทำให้โมห์รีเลย์พบว่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและมีโอกาสเข้ามาสู่ย่านการทำงานของโมห์รีเลย์ จึงทำให้รีเลย์ตรวจจับอิมพีแดนซ์เสมือนว่าเกิดการผิดพร่องของสายส่งไฟฟ้ากำลังซึ่งที่จริงแล้วไม่ได้เกิดการผิดพร่องของสายส่งไฟฟ้ากำลังและสั่งให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรแยกส่วนผิดพร่องออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดจึงมีส่วนของการป้องกันเพาเวอร์สวิงมาป้องกันอุปกรณ์ โดยสามารถแยกได้ว่าค่าของอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำเกิดจากเพาเวอร์สวิงหรือความผิดพร่องของระบบไฟฟ้า (Fault) ส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นในสายคู่ขนานเส้นที่ไม่เกิดการผิดพร่อง

รูปที่ 1 คือรูปที่แสดงระยะการทำงานของรีเลย์ โดยเส้นสีแดงคือระยะที่ 1 เส้นสีส้มคือระยะที่ 2 เส้นสีม่วงคือระยะที่ 3 เส้นสีเขียวคือระยะที่ 5 เส้นสีน้ำเงินคือระยะที่ 6 และเส้นตรงคือค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รีเลย์ระยะทางเป็นอุปกรณ์ป้องกันชนิดหนึ่งที่ป้องกันสายส่ง เนื่องจากมีความไวสำหรับตรวจจับความผิดพร่อง จึงสามารถตัดกระแสความผิดพร่องออกจากระบบได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับรีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent Relay) อีกทั้งยังกำหนดการใช้งานสะดวก จัดการทำงานให้สัมพันธ์กัน และราคาที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งาน

โมห์รีเลย์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามมาตรฐาน IEC 60255-121 โมห์รีเลย์สามารถทำงานได้ตั้งแต่ระยะที่หนึ่งถึงระยะที่สาม และเมื่อสายส่งเกิดการลัดวงจร โมห์รีเลย์จะตัดวงจรออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

2.1 เกณฑ์พื้นที่เท่ากัน (Equal area Criteria)[1]

เกณฑ์พื้นที่เท่ากัน (EAC) เป็นแนวคิดพื้นฐานในการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพของเครื่องจักรกลแบบซิงโครนัสระหว่างการแกว่งของกำลังหรือหลังจากเกิดการรบกวน เกณฑ์ดังกล่าวให้วิธีการแบบกราฟิกเพื่อประเมินว่าระบบจะยังคงเสถียรหรือไม่หลังจากเกิดการรบกวนชั่วคราว สมการการแกว่งของเพาเวอร์สวิง

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (1)$$

โดยที่ M คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Kgm^2) δ คือค่ามุมของโรเตอร์ (Rad) P_m คือค่ากำลังทางกล (W) P_e คือค่ากำลังทางไฟฟ้า (W)

การป้องกันเพาเวอร์สวิงและ Out-of-Step โดยใช้เกณฑ์พื้นที่เท่ากันของกราฟกำลังไฟฟ้าเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับในการป้องกันระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับความเสถียรชั่วขณะ โดยทั่วไปวิธีนี้จะใช้เพื่อป้องกันการสะดุดของรีเลย์ป้องกันที่ไม่จำเป็นระหว่างการเกิดเพาเวอร์สวิง

2.2 Dual Blinder[2]

หลักการ Dual Blinder โดยจะตรวจสอบตำแหน่งอิมพีแดนซ์ และนำค่าไปพล็อตเป็นระนาบอิมพีแดนซ์ (โดยที่เส้นทางของอิมพีแดนซ์ผ่าน Blinder ด้านนอก หลังจากนั้นเส้นทางอิมพีแดนซ์ก็จะผ่าน Blinder ด้านใน โดยส่วนใหญ่ใช้หลักการจับเวลาถ้าหากว่าระยะเวลาที่ผ่านทั้งสอง Blinder น้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาขจัดวิกฤต (t_{cr}) จะทำให้เกิดเพาเวอร์สวิงที่เสถียร แต่ถ้าหากว่าระยะเวลาที่ผ่านทั้งสอง Blinder มากกว่าเวลาขจัดวิกฤต จะทำให้เกิดเพาเวอร์สวิงที่ไม่เสถียร [3]

2.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า[4]

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์เทียบกับเวลา ($\dot{Z}$) คือการอนุพันธ์ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) เทียบกับเวลาตามสมการที่ 2

$$\dot{Z} = \frac{dZ}{dt} \qquad (2)$$

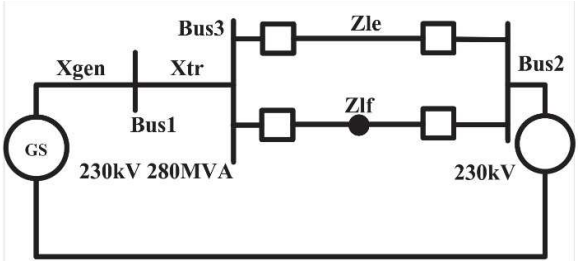
หลักการตรวจจับการเกิดเพาเวอร์สวิง ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ โดยถ้าเกิดค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ มีค่าเป็นบวกและเป็นลบสลับไปมาจะหมายความว่าเกิดเพาเวอร์สวิงที่เสถียร แต่ถ้าเกิดความผิดพร่องค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ จะมีค่าที่สูงมากเมื่อเทียบกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ ในขณะที่เกิดเพาเวอร์สวิงและแนวโน้มของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ จะมีค่าเป็นบวกอย่างเดียว [5]

3. ผลการจำลอง

ข้อมูลในบทนี้จะเริ่มต้นด้วยการอธิบายการทำงานของรีเลย์ระยะทาง ว่ามีระยะการป้องกันเท่าไหร่ และทำการออกแบบวงจรไฟฟ้ากำลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสเชื่อมต่อกับบัสอนันต์ (SMIB system) ด้วยสายส่งไฟฟ้ากำลังแบบวงจรคู่ และทำการคำนวณค่าเพาเวอร์ระหว่างบัส หลังจากนั้นก็ทำการคำนวณกระแสความผิดพร่อง ที่สายส่งไฟฟ้ากำลัง ด้วยโปรแกรม PSCAD/EMTDC

3.1 ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง

รูปที่ 2 เป็นวงจรจ่ายไฟฟ้ากำลังสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดยที่วงจรดังกล่าวนั้นจะต้องมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส โดยทำการตั้งค่ามุมของแรงดันที่ทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงระหว่าง Bus1 กับ Bus2 ซึ่ง Bus2 เป็นบัสอนันต์ มีความถี่และแรงดันที่คงที่ วงจรเป็นไปตามรูปที่ 3 และให้กำลังไฟฟ้าจริงระหว่างบัสมีค่า 1 pu มีค่า 280 MW โดยจำลองให้เกิดความผิดพร่องที่บริเวณจุดสิ้นสุดซึ่งอยู่กึ่งกลางสายส่งเส้น Zlf และตัดวงจรสายส่ง Zlf หลังจากนั้นทำการตรวจสอบการเกิดเพาเวอร์สวิงที่สายส่งเส้น Zle [6]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้ากำลัง

$$Z_{12} = X_{tr} + (Z_{le} \,//\, Z_{lf}), Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}} \qquad (3)$$

$$P_e = |V_1|^2 G_{11} + |V_1||V_2||Y_{12}|\sin(\delta_{12} - \theta_{12}) \qquad (4)$$

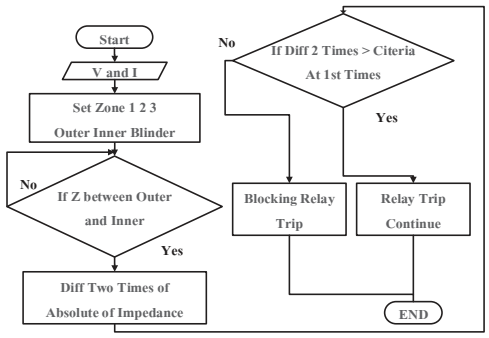
$$I = (V_1 - V_2)Y_{12} \qquad (5)$$

$$I = \frac{(E_g^{'} - V_1)}{X_{gen}} \qquad (6)$$

แทนค่าอิมพิแดนซ์ในรูปเปอร์ยูนิตลงในสมการที่ (3) หลังจากนั้นนำค่า $Y_{12}, G_{11}, \delta_{12}, \theta_{12}$ แทนลงในสมการที่ (4) โดยที่ $V_2 = 1\angle 0^\circ V$ และแทนค่าทั้งหมดในสมการที่ (4) เพื่อหาค่า V_1 โดยที่ $|V_1| = 1$ หลังจากนั้นนำค่า V_1 แทนในสมการที่ (5) เพื่อหาค่า I และทำการคำนวณตามสมการที่ (6) เพื่อหาค่า แรงดันที่ BusGen ตามสมการที่ (6) ค่า $E_g^{'} = 1.013\angle 33.86^\circ V$

3.2 การตรวจจับเพาเวอร์สวิง

จากรูปที่ 3 คือขั้นตอนการทำงาน และได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยที่ใช้หลักการนำค่าอิมพิแดนซ์ช่วงที่ผ่านระหว่างระยะที่ 5 กับระยะที่ 6 มาอนุพันธ์เทียบกับเวลาสองครั้งเพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าเกิดเพาเวอร์สวิงหรือไม่ อิมพิแดนซ์วิ่งผ่านระหว่างระยะที่ 5 กับ ระยะที่ 6 โดยต้องการค่าเพียงครั้งแรกครั้งเดียวเท่านั้น โดยที่เกณฑ์ดังกล่าวถูกกล่าวในหัวข้อ 4.1 [7]



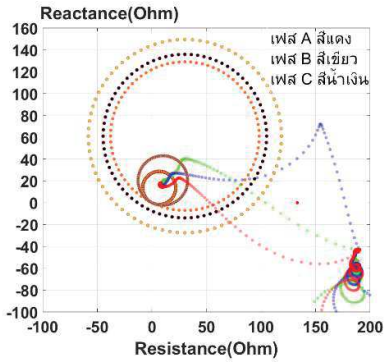
รูปที่ 3 แผนผังการทำงานของการแยกแยะระหว่างเพาเวอร์สวิงและการผิดพร่อง

4. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

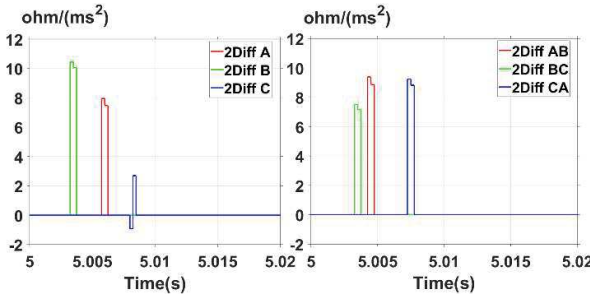
4.1 ผลการจำลองการผิดพร่อง

ในหัวข้อนี้ ที่เกี่ยวข้องกับการผิดพร่องไฟฟ้าของระยะที่ 1 โดยในรูปที่ 4 กราฟสีแดงสีเขียวและสีน้ำเงินคืออิมพิแดนซ์ที่วัดได้จากแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสามเฟสสมดุลของเฟส A เฟส B และ เฟส C ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเส้นกราฟสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินวิ่งเข้าสู่ ระยะที่ 1 ได้ถูกต้อง

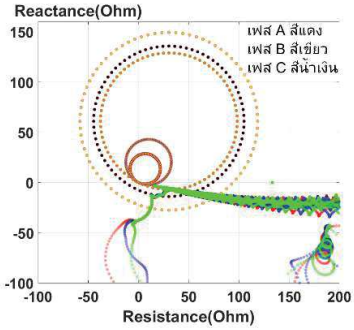
จากรูปที่ 5 จะสังเกตุได้ว่าค่าการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลาที่ได้จากเส้นสีแดงเส้นสีเขียวและเส้นสีน้ำเงิน นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าสูงกว่า 0.1 $\Omega/(ms)^2$ ของแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสายถึงสายไม่ต่อกับดิน รูปที่ 5 ซ้าย และแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสายถึงดิน รูปที่ 5 ขวา ในกรณีเกิดการผิดพร่องแบบสามเฟสระยะที่ 1 ใช้ระยะเวลาสูงสุดประมาณ 10 มิลลิวินาที เพื่อแยกแยะระหว่างความผิดพร่องกับเพาเวอร์สวิง และสรุปค่าการอนุพันธ์ของการผิดพร่องทุกชนิดทั้งหมด 10 เหตุการณ์ ตามตารางที่ 1 ถ้าเกิดการผิดพร่องที่ไม่ใช่การผิดพร่องแบบสามเฟส แบบจำลองของรีเลย์แบบสายถึงดิน หรือแบบจำลองของสายถึงสายจะมีค่าอนุพันธ์ที่สูง เช่นการผิดพร่องแบบเฟส A ถึงเฟส B ลงดิน ค่าอนุพันธ์ของแบบจำลองของเฟส A กับ เฟส B และค่าอนุพันธ์ของแบบจำลองของเฟส A ลงดิน ค่าอนุพันธ์ของแบบจำลองของเฟส B ลงดิน จะมีค่าที่ไม่ใช่ 0 $\Omega/(ms)^2$ และมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่าอนุพันธ์ของเพาเวอร์สวิง ในตารางที่ 2



รูปที่ 4 แผนภาพอิมพิแดนซ์ที่วัดได้จากแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสามเฟสสมดุล กรณีการผิดพร่องลงดินแบบสามเฟสสมดุล



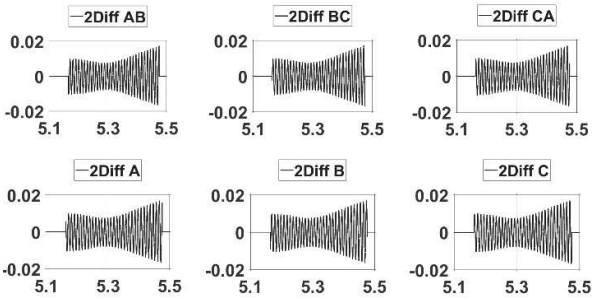
รูปที่ 5 กราฟขยายอนุพันธ์อันดับสองของอิมพิแดนซ์เทียบกับเวลา กรณีการผิดพร่องลงดินแบบสามเฟสสมดุล



รูปที่ 6 แผนภาพอิมพิแดนซ์ที่วัดได้จากแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสามเฟสสมดุล กรณีเพาเวอร์สวิง

4.2 ผลการจำลองการเกิดเพาเวอร์สวิง

โดยในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 กราฟสีแดงสีเขียวและสีน้ำเงินคืออิมพิแดนซ์ที่วัดได้จากแบบจำลองรีเลย์การผิดพร่องแบบสามเฟสสมดุลของเฟส A เฟส B และ เฟส C ตามลำดับ ซึ่งเกิดการแกว่งไปแกว่งมา และสรุปค่าการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลา(Ω/(ms)^2) ได้ตามตารางที่ 2 โดยมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้ที่ 0.1 /(ms)^2 ถ้าเทียบกับตารางที่ 1 ค่าอนุพันธ์แตกต่างกันเป็นอย่างมาก



รูปที่ 7 กราฟขยายอนุพันธ์อันดับสองของอิมพิแดนซ์เทียบกับเวลา ของทั้งสองแบบจำลอง กรณีเพาเวอร์สวิง

ตารางที่ 1 ค่าอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลาของระยะที่ 1

การผิดพร่องระยะที่ 1 ค่าอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลา (/(ms)^2)						
	AB	BC	CA	A-G	B-G	C-G
ABC	9.4	7.5	9.2	7.9	10.4	2.7
AB-G	9.5	3.4	3.5	8.5	11.1	0
BC-G	3.9	7	10.2	0	10.5	8.5
CA-G	4.3	4.3	9.6	8.1	0	14.8
AB	9.4	2.7	3	7.2	7.5	0
BC	2.7	6.9	0	0	7.9	1.4
CA	3.4	2.9	9.5	8.1	0	6.8
A-G	3.4	0	3.1	8.5	0	0
B-G	3.1	1.4	0	0	11.2	0
C-G	0	3.7	4.1	0	0	11.4

5. สรุป

จากการทดลอง สรุปได้ว่า ในกรณีที่เกิดความผิดพร่องค่าการอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลา มีค่าที่มากกว่ากรณีเกิดเพาเวอร์สวิง เพราะว่าในขณะที่เกิดการผิดพร่องอิมพิแดนซ์จะวิ่งผ่านเข้าสู่ระยะที่ 5และระยะที่ 6 อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ค่าการอนุพันธ์อันดับสองดังกล่าวของการผิดพร่องมีค่าดังกล่าวที่สูงกว่าเพาเวอร์สวิงมากกว่า 100 เท่า จึงสามารถแยกแยะได้ระหว่างการผิดพร่อง กับเพาเวอร์สวิงได้

ตารางที่ 2 ค่าอนุพันธ์อันดับสองของเพาเวอร์สวิง

เพาเวอร์สวิง ค่าอนุพันธ์อันดับสองเทียบกับเวลา (/(ms)^2)						
	AB	BC	CA	A-G	B-G	C-G
PS	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

เอกสารอ้างอิง

[1] Pala, Milan N and Thakar, Akash and Patel, Ankur , “Power Swing and out of step Protection using Equal area Criteria”, 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), pp. 1-7, Mar.2019 ,doi: 10.1109/i2ct45611.2019.9033717

[2] O’Donovan, Michael and Cowhey, Eoin and Barry, Noel and Connell, Joe , “Assessment of Power Swing Blocking Functions”, 2020 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC) , pp. 1-6, Sep.2020 ,doi: 10.1109/upec49904.2020.9209826

[3] Sena, C. and Franco, R. and Giusto, A., “Assessment of power swing blocking functions of line protective relays for a near scenario of the Uruguayan system”, 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America , pp. 1-6, Sep.2020 ,doi: 10.1109/upec49904.2020.9209826

[4] Qais, Mohammed H. and Alghuwainem, Saad M., “New algorithm to detect balanced three phase fault during power swing on transmission lines with communication links”, 2013 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, pp. 1-5, Oct. 2013 ,doi: 10.1109/epecs.2013.6713005

[5] Hao Wang , Xiaoning Kang and Xinzhou Dong, “A Novel Method of Power Swing Blocking in Impedance Relay”, 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), pp. 427-431, Oct. 2019 ,doi: 10.1109/APAP47170.2019.9225159

[6] Hnin Yu Lwin, U Hla Myo Htay, “Design of 230 kV Twin Bundle Double Circuit Overhead Transmission Line”, International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), pp.1967-1970, Aug. 2019, doi : 10.31142/ijtsrd27830

[7] Ganeshan, Iyer Shriram and Jena, Manas Kumar and Panigrahi, Bijaya Ketan., “An improved setting-free power swing blocking scheme using local end information”, 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT) , pp. 1-6, Mar.2018 ,doi: 10.1109/etechnxt.2018.8385300

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดินที่มีผลต่อค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

A comparative analysis of the ground grid system arrangement affecting to touch voltage and step voltage

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*] จักรพันธ์ นรเหรียญ[1] วลัญช์ ทรรศนโมไนย[1] วุฒิไกร เกตุบุตร[1] จุฑาศินี พรพุทธศรี[2]และ ธวัช ชูชิต[3]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาครุศาสตรอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
E-mail: anone@webmail.npru.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดิน โดยบทความนี้อาศัยพื้นที่การจำลองผลของสถานีไฟฟ้าย่อย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมเป็นกรณีศึกษา โดยมุ่งเน้นเปรียบเทียบค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว บทความนี้จำลองผลรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดินทั้งสิ้น 4 รูปแบบ ประกอบด้วย การวางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่ การวางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ การวางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่ และการวางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด ซึ่งผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวางระบบรากสายดินที่มีการวางรากสายดินที่ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันสัมผัส และแรงดันช่วงเก้ามีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้ามีค่าน้อยแสดงถึงโอกาสที่มนุษย์ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงจะมีความปลอดภัยต่อการเกิดลัดวงจร หรือการเกิดฟ้าผ่ากว่ารูปแบบการวางระบบรากสายดินรูปแบบอื่นๆ

คำสำคัญ: การออกแบบรากสายดิน, แรงดันสัมผัส, แรงดันช่วงก้าว, กราวด์กริด

Abstract

This article presents a comparative analysis of the layout of the grounding system. This article uses the simulation results of the substation of Nakhon Pathom Rajabhat University as a case study. It focuses on comparing the contact voltage and step voltage values. This article simulates the results of four grounding system layouts: grounding rods at the corners of the area, grounding rods at the intersection of conductors, grounding rods inside the area, and grounding rods around the perimeter of the grid. The simulation results show that the grounding system layout with the grounding rods at the intersection of conductors will result in the lowest contact voltage and step voltage values. When the contact voltage and step voltage values are low, it means that the chances of people in the high-voltage substation are safer from short circuits or lightning strikes than other grounding system layouts.

Keywords: uniformity, illumination, luminaire, automatic control

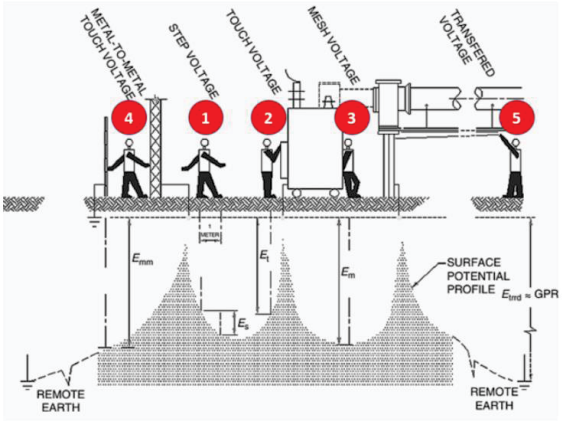
1. บทนำ

การก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อย หรือการขยายแขตเดินสายไฟ รวมถึงก่อสร้างทางด้านไฟฟ้าแรงสูงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูงต่าง ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการออกแบบระบบรากสายดินเพื่อให้สามารถรองรับค่ากระแสความผิดพร่องทางระบบไฟฟ้ากำลังได้ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อบุคลากรที่ปฏิบัติหน้าที่ภายในพื้นที่ที่เสี่ยงต่ออันตรายที่เกิดจากการลัดวงจรทางไฟฟ้า โดยบทความนี้ได้ดำเนินการเปรียบเทียบลักษณะของรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดินทั้งสิ้น 4 รูปแบบ ประกอบด้วย การวางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่ การวางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ การวางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่ และการวางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด โดยมุ่งเน้นพิจารณาค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว ซึ่งเป็นปริมาณที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบรากสายดิน

2. แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว

แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างมือที่สัมผัสกับโครงสร้าง หรืออุปกรณ์ภายในบริเวณพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าย่อย หรือบริเวณที่มีบรภัณฑ์ไฟฟ้าเทียบกับตำแหน่งที่มนุษย์ยืน ส่วนแรงดันช่วงเก้า (Step Voltage) เป็นแรงดันไฟฟ้าระหว่างเท้า ณ ตำแหน่งที่มนุษย์ยืนที่มีระยะห่างกัน 1 เมตร[1]-[3] ซึ่งเมื่อพิจารณาแรงดันที่มนุษย์สามารถสัมผัสได้ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงเมื่อพิจารณาตำแหน่งที่มนุษย์ยืนอยู่ในบริเวณของสถานีไฟฟ้าหรือบริเวณที่มีการติดตั้งระบบรากสายดิน (Grid Conductor) และมีโครงสร้างที่เป็นเหล็กหรือตัวนำชนิดอื่นอยู่ใกล้ ในขณะที่เกิดไฟฟ้าลัดวงจรลงดินที่สถานีไฟฟ้า [2] เช่น

ฟ้าผ่า เป็นต้น จะส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่พื้นดินมีค่าไม่เท่ากัน (Voltage Gradient) ส่งผลให้มนุษย์ที่อยู่ภายในพื้นที่สถานีไฟฟ้าได้รับผลกระทบจากสถานการณ์ที่แรงดันที่พื้นดินไม่เท่ากัน [3]-[4]โดยสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภท คือ แรงดันช่วงก้าว แรงดันสัมผัส แรงดันตาข่าย แรงดันสัมผัสระหว่างตัวนำโลหะกับโลหะและแรงดันถ่ายโอน [4], [6] แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สัมผัสได้ในสถานีไฟฟ้า

3. ระบบรากสายดิน

ระบบรากสายดิน (Ground Grid System) ประกอบด้วยรากสายดินซึ่งเป็นโลหะเปลือยที่ฝังหรือตอกลงไปในดินเพื่อทำหน้าที่ถ่ายเทกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสลัดวงจรลงดินก่อนจะเกิดอันตรายต่อคนและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ [3] ,[5] – [6] ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำรากสายดินต้องเป็นวัสดุที่ทนต่อการผุกร่อนและไม่เป็นสนิม เช่น แท่งทองแดง แท่งเหล็กชุบหรือหุ้มด้วยทองแดง เป็นต้น นอกจากวัสดุที่ใช้ในรากสายดินแล้วว ลักษณะของพื้นที่ก็เป็นส่วนสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบรากสายดิน โดยที่เนื้อดินบริเวณที่ตอกหลักดินควรเป็นดินแท้ๆ ไม่ถูกกั้นหรือล้อมรอบด้วยหิน ทราย กรวด คอนกรีต เพราะเป็นอุปสรรคต่อการกระจายของประจุไฟฟ้าลงสู่ดิน และทำให้ค่าความต้านทานการต่อลงดินมีค่าสูง การวางรากสายดินควรวางให้ลึกที่สุด ถ้าเป็นการต่อสายด้วยการยึดทางกลควรให้หัวต่อโผล่พ้นพื้นดินหรือระดับน้ำท่วมเพื่อหลีกเลี่ยงการผกร่อน หัวต่อชนิดหลอมละลายสามารถฝังในดินได้แต่ต้องใช้สายที่มีการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการผุกร่อน [5] – [8] แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การต่อสายดินเข้ากับระบบรากสายดิน

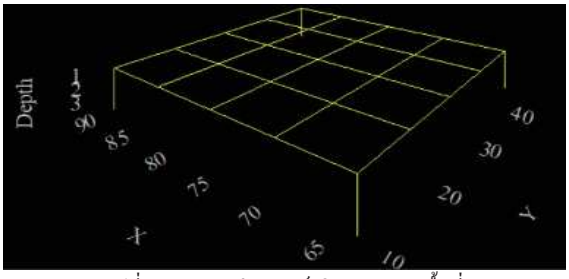
3. ระบบสำหรับการจำลองผล และพารามิเตอร์

บทความนี้อาศัยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยพิจารณาพื้นที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงของมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ซึ่งมีขนาดของพื้นที่กว้าง 40 เมตร และยาว 35 เมตร เป็นพื้นที่กรณีศึกษา โดยลักษณะของพื้นดินจะเป็นลักษณะของดินที่มีความชื้น และโรยด้วยหินบดหยาบบริเวณผิวดิน กำหนดให้ตัวนำทำจากวัสดุประเภท แท่งทองแดงชนิดแข็ง (commercial hard drawn) และรากสายดินทำจากวัสดุประเภทแท่งเหล็กชุบทองแดง (copper clad steel rod) โดยที่ขนาดและความยาวของตัวนำและรากสายดินแสดงได้ดังตารางที่ 1

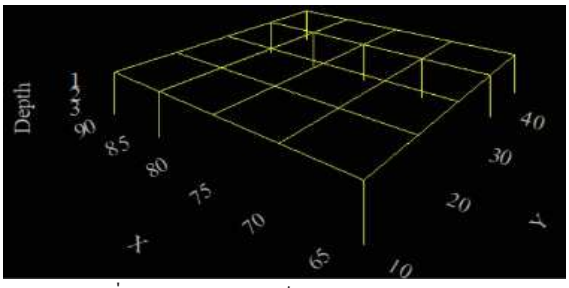
ตารางที่ 1 ขนาด และคุณสมบัติของตัวนำและรากสายดิน

Type	Conductivity (%)	Fusing Temperature	Resistivity of Ground Conductor @20	Termal Capacity Per Unit Volume
ตัวนำ	97	1084	1.78	3.42
รากสายดิน	20	1084	8.62	3.85

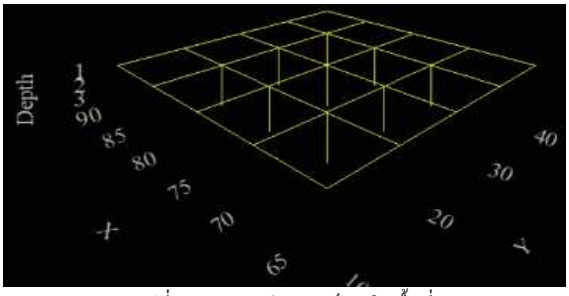
บทความนี้ดำเนินการเปรียบเทียบรูปแบบการวางระบบรากสายดินทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ การวางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่ (Rod in Grid Corner) การวางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ (Throughout Grid Area) การวางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่ (Interior Rod Only) และการวางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด (Rod Along Grid Perimeters) แสดงได้ดังรูปที่ 3-6 ตามลำดับ



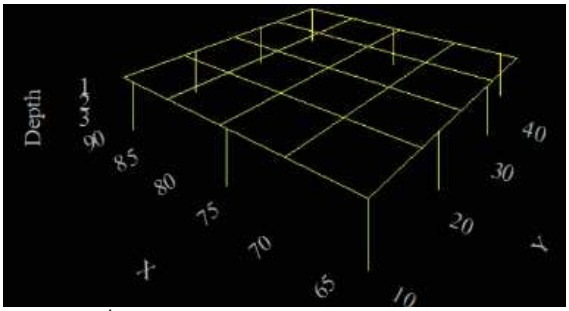
รูปที่ 3 การวางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่



รูปที่ 4 การวางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ



รูปที่ 5 การวางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่



รูปที่ 6 การวางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด

4. ผลการจำลอง

บทความนี้อาศัยข้อมูลการเกิดลัดวงจรสูงสุดที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมซึ่งได้บันทึกไว้ที่ 3.15kA เพื่อนำไปเป็นค่ากระแสลัดวงจรสำหรับการจำลองผล ทั้งนี้ได้กำหนดให้แต่ละรูปแบบการวางตัวของระบบรากสายดินมีการใช้ตัวนำชนิดเดียวกันมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 95 mm^2 วางอยู่ลึกจากระดับผิวดิน 0.50 เมตร และรากสายดินชนิดเดียวกันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.42 cm และมีความยาว 3 เมตร การออกแบบระบบรากสายดินจะอ้างอิงตามมาตฐาน IEEE 80-2000/2013 และผลที่ได้จากการจำลองจะมุ่งเน้นพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะในส่วนของแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้าโดยผลการจำลองในแต่ละกรณีแสดงได้ดังตารางที่ 2–5

ตารางที่ 2 ผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้า เมื่อรูปแบบของระบบรากสายดินแบบวางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่

จำนวนรากสายดิน	4 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน x	5 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน y	5 แท่ง
ราคาการติดตั้งรวม	116,403 บาท
ค่าความต้านทานดิน	0.057 Ω
ค่าแรงดันสัมผัส	405.2 V
ค่าแรงดันช่วงเก้า	243.5 V
ค่ากระแสลัดวงจร	3.15 kA

ตารางที่ 3 ผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้า เมื่อรูปแบบของระบบรากสายดินแบบวางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ

จำนวนรากสายดิน	10 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน x	5 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน y	5 แท่ง
ราคาการติดตั้งรวม	117,000 บาท
ค่าความต้านทานดิน	0.057 Ω
ค่าแรงดันสัมผัส	371.5 V
ค่าแรงดันช่วงเก้า	228.8 V
ค่ากระแสลัดวงจร	3.15 kA

ตารางที่ 4 ผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้า เมื่อรูปแบบของระบบรากสายดินแบบวางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่

จำนวนรากสายดิน	4 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน x	5 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน y	5 แท่ง
ราคาการติดตั้งรวม	116,403 บาท
ค่าความต้านทานดิน	0.057 Ω
ค่าแรงดันสัมผัส	461 V
ค่าแรงดันช่วงเก้า	243.5 V
ค่ากระแสลัดวงจร	3.15 kA

ตารางที่ 5 ผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้า เมื่อรูปแบบของระบบรากสายดินแบบวางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด

จำนวนรากสายดิน	4 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน x	5 แท่ง
จำนวนตัวนำแนวแกน y	5 แท่ง
ราคาการติดตั้งรวม	116,403 บาท
ค่าความต้านทานดิน	0.057 Ω
ค่าแรงดันสัมผัส	405.2 V
ค่าแรงดันช่วงเก้า	243.5 V
ค่ากระแสลัดวงจร	3.15 kA

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้าในแต่ละรูปแบบการวางตัวระบบรากสายดินแสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและค่าแรงดันช่วงเก้าเมื่อรูปแบบการจัดวางระบบรากสายดินแตกต่างกัน

รูปแบบการจัดวางระบบรากสายดิน	แรงดันสัมผัส (V)	แรงดันช่วงเก้า (V)
วางแท่งกราวด์บริเวณมุมของพื้นที่	405.2	243.5
วางแท่งกราวด์ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำ	371.5	228.8
วางแท่งกราวด์ภายในพื้นที่	461.0	243.5
วางแท่งกราวด์บริเวณเส้นรอบวงของกริด	405.2	243.5

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่ารูปแบบการวางระบบรากสายดินที่มีการวางรากสายดินที่ตำแหน่งจุดตัดของตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันสัมผัส และแรงดันช่วงเก้ามีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้ามีค่าน้อยแสดงถึงโอกาสที่มนุษย์ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงจะมีความปลอดภัยต่อการเกิดลัดวงจร หรือการเกิดฟ้าผ่ากว่ารูปแบบการวางระบบรากสายดินรูปแบบอื่นๆ

5. สรุปผล

จากผลการจำลองค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้าของการจัดวางรูปแบบระบบรากสายดินทั้ง 4 รูปแบบ โดยการกำหนดให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าคงที่ที่ 3.15kA จะเห็นว่ารูปแบบการจัดวางระบบรากสายดินเมื่อวางแท่งรากสายดินตำแหน่งจุดตัดของตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงเก้าที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นมีค่าน้อยที่สุด แสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยต่อมนุษย์ที่ทำกิจกรรมอยู่บริเวณสถานีไฟฟ้าแรงสูง แต่อย่างไรก็ตาม การจำลองนี้เป็นการจำลองโดยการกำหนดค่าพื้นที่ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ขนาดของรากสายดินและขนาดของตัวนำให้มีค่าคงที่ ซึ่งเงื่อนไขต่างๆ เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปในสภาพการณ์จริง ดังนั้นบทความนี้จึงเน้นถึงการเปรียบเทียบรูปแบบการวางรากสายดินเท่านั้น แต่บทความนี้สามารถนำไปต่อยอดในการพิจารณาถึงการออกแบบระบบรากสายดินได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] E. Kuffel and W.S. Zaengl, “High Voltage Engineering Fundamentals” Oxford Pergamon, 1984.

[2] C. L. Wadhwa, “High Voltage Engineering”, 2nd Edition., New Age International, 2007.

[3] IEEE 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding., 2003.

[4] R. Sikora and P. Markiewicz, “Reduction of step voltages of MV/LV substation grounding system based on shaping electric field,” Archives of Electrical Engineering., Vol. 70(277), No.3, 2021, pp.601-615.

[5] Z.G. Datsios and N.P. Mikropoulos, “Safety performance evalution of typical grounding configulations of MV/LV distribution substations,” Electrical Power System Research, Vol. 150, 2017, pp.36-44.

[6] J. Trifunovic and M.B. Kostic, “An Algorithm for Estimating the Grouding Resistance of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance,” IEEE Transactions on Industry Applications., Vol.51, 2015, pp.5167-5174.

[7] J. Liu and F.P. Dawalibi, “Detailed Parametric Analysis of Grounding System Performance in Two-Layer Soil Structures,” Proceedings of the seventh LASTED International Conference on Power and Energy Systems, Clearwater Beach, USA, Nov.28-Dec.1, 2004, pp.370-375.

[8] Y.L. Chow, M.M.A. Salama, and G. Djogo, “Thevenin Source Resistances of the touch, Transferred and Step Voltages of a Grounding System,” IEE Proceedings Gener. Transin. Distrib., vol.146, No.2, March 1999, pp.107-114.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวางแผนเพิ่มสมรรถนะโดยลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมตัวเปลี่ยนเฟส

Performance Planning by Reducing Power Losses in Power Transmission Systems to Control Phase Shifters

กุสุมา เนาว์ประเสริฐ วีรดา เอ่งฉ้วน นเรศ ชลังสุทธิ์ สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*
*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้วิจัยนี้นำเสนอการวางแผนเพิ่มสมรรถนะโดยลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมตัวเปลี่ยนเฟส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าปัจจุบันพบว่าการใช้พลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นถ้าเพิ่มหรือลดโหลดในระบบ จะส่งผลให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้ารับภาระโหลดทางไฟฟ้ามากเกินไป ดังนั้นจึงเสนอบทความนี้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ใช้โปรแกรมจำลอง MATLAB/ Simulink โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษาคือ กรณีที่ 1 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่เปลี่ยนเฟส และกรณีที่ 2 วงจรแบบเปลี่ยนเฟส จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กระแสไหลเข้าออโต้ทรานส์ฟอร์เมอร์ปรับตัวเปลี่ยนเฟส เฟสคงที่ และแรงดันในระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพดีขึ้น

คำสำคัญ : ลดค่ากำลังสูญเสีย, ระบบส่งกำลังไฟฟ้า, ตัวเปลี่ยนเฟส

Abstract

This research presents a performance enhancement strategy by reducing power loss in the electrical power transmission system through phase-shifting transformer control. The objective is to investigate methods for improving transmission system efficiency, as the increasing energy demand causes the system to experience excessive electrical load under fluctuating conditions. To address this issue, the study utilizes MATLAB/Simulink simulations and is divided into two case studies: Case 1 involves a circuit using an autotransformer to control power flow without phase shifting, and Case 2 applies a phase-shifting transformer. The simulation results demonstrate that the input current to the autotransformer adapts with phase-shift control, maintaining a stable phase and improving voltage stability in the power system.

Keywords: Power loss reduction, Power transmission system, Phase shifter

1. บทนำ

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าทั่วโลกกำลังอยู่ระหว่างการปรับโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง ระบบส่งกำลังไฟฟ้าปัจจุบันมีภาระทางไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการใช้ตัวเปลี่ยนเฟส เพื่อการกระชากของกระแสไฟฟ้าเมื่อต้องการใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก และทำให้ระบบเสถียรภาพขึ้นสำหรับการปรับปรุงในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อลดการสูญเสียพลังงานของระบบไฟฟ้า และลดความสูญเสียในของสายไฟฟ้าที่มีโหลดสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

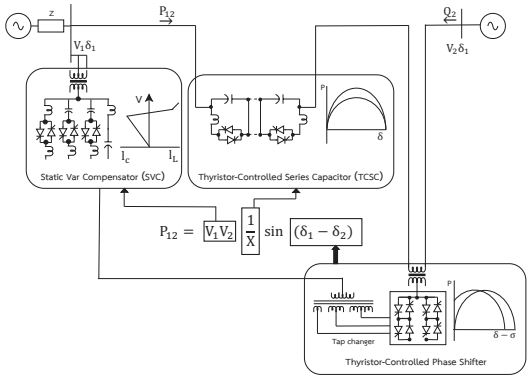
ในปี 2016 เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณดิจิตอลทางเฟส (Phase Shift Keying, PSK) เป็นการมอดูเลตชนิดหนึ่งที่ได้รับความนิยมในระบบสื่อสารข้อมูลทางดิจิตอล เช่น การสื่อสารระบบดาวเทียม การสื่อสารไร้สาย การสื่อสารแบบเคลื่อนที่ รวมถึงระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิตอลในปัจจุบัน [1] ในปี 2017 มีการจำลองสำหรับการวางตำแหน่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบการกระจายแนวรัศมีบัสแบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง 12 ซึ่งประจำอยู่ทีดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าและการสูญเสียสายส่ง ดัชนีนี้มีความคืบหน้าโดยการยอมรับแรงดันไฟฟ้าของโหลดสถานะคงที่ [2] ในปี 2019 มีการศึกษาการประยุกต์ใช้การปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าโดยฟาร์มเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทดสอบในแบบจำลองระบบการจำหน่ายไฟฟ้า 69 บัส ด้วยเทคนิคการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว ผลลัพธ์พบว่าโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถปรับปรุงแรงไฟฟ้าดันตกในระบบจำหน่ายได้ [3]

ดังนั้นในบทความนี้ได้ทำการศึกษาการวางแผนเพิ่มสมรรถนะโดยลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเพื่อควบคุมตัวเลื่อนเฟสในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องนำโปรแกรมเข้ามาช่วย จึงนำโปรแกรม MATLAB/Simulink ใช้ในการวิเคราะห์โดยจำลองวงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานโดยจำลองวงจรขึ้นมา 2 แบบ คือ วงจรที่ 1 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่เปลี่ยนเฟส และ วงจรที่2 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบเปลี่ยนเฟส โดยทำการเปรียบเทียบการเพิ่มสมรรถนะของระบบส่งกำลังไฟฟ้าออกเป็น 2 กรณีศึกษา

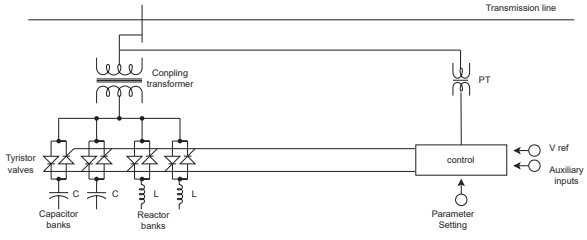
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

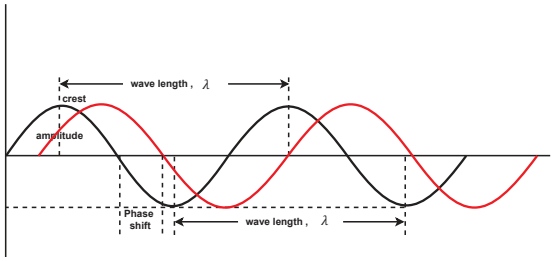
ระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบยืดหยุ่นเป็นเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และการควบคุมระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ FACTS ช่วยปรับปรุงการไหลของพลังงาน เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และลดการสูญเสียในสายส่ง อุปกรณ์ FACTS แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ตัวควบคุมแบบขนาน (SVC, STATCOM) สำหรับควบคุมแรงดันไฟฟ้าและชดเชยกำลังรีแอกทีฟ, ตัวควบคุมแบบอนุกรม (TCSC, SSSC) ที่ปรับอิมพีแดนซ์สายส่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งกำลัง, และตัวควบคุมแบบผสม (UPFC) ที่ควบคุมทั้งแรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ และมุมเฟสพร้อมกัน เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการพลังงานในระบบไฟฟ้า [4] โดยแต่ละตัวควบคุมจะมีผลต่อพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งพลังงาน เช่น แรงดันไฟฟ้า (SVC), อิมพีแดนซ์การส่งผ่าน (TCSC) และมุมเฟส (Phase-Shifter) ดังที่แสดงในรูปที่ 1 แบบใช้ไธริสเตอร์เริ่มต้นชี้สำหรับการชดเชยพลังงานและภายหลังถูกนำมาใช้ในระบบส่งพลังงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 2 โดยมีแบบ Phase shifter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับมุมเฟสของกระแสไฟฟ้าในระบบส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีบทบาทสำคัญในการควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าและช่วยปรับปรุงการกระจายโหลดในระบบไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 1 ตัวควบคุม FACTS ที่ใช้ไธริสเตอร์แบบปกติ



รูปที่ 2 ตัวชดเชยพลังงานแบบ Static Var



รูปที่ 3 มุมมองการทำงานของ Phase-Shift

2.2 หลักการลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่ง

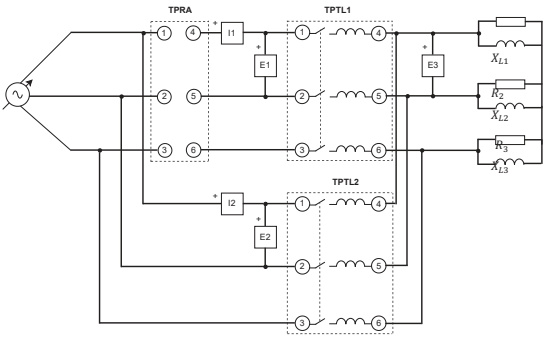
การลดค่ากำลังสูญเสียในระบบส่งไฟฟ้าเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและลดต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยมุ่งเน้นการควบคุมกำลังรีแอกทีฟผ่านการปรับแท็ปหม้อแปลง การติดตั้งตัวเก็บประจุ และการตั้งค่าแรงดันที่เหมาะสมเพื่อลดกระแสไหลเวียนที่ไม่จำเป็น [4],[5] นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยีควบคุมพลังงานขั้นสูง เช่น FACTS และตัวเลื่อนเฟส ช่วยควบคุมทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6],[7] การใช้แหล่งพลังงานแบบกระจายร่วมกับระบบควบคุมอัจฉริยะช่วยลดการพึ่งพาสายส่งหลักและเพิ่มเสถียรภาพของระบบ [8] สุดท้ายการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนและการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมขั้นสูงช่วยเพิ่มความแม่นยำในการจัดการพลังงาน ลดการสูญเสีย และรองรับระบบไฟฟ้าในอนาคตอย่างยั่งยืน [7]

2.3 ออโต้ทรานส์ฟอร์เมอร์ปรับแรงดันและตัวเปลี่ยนเฟส

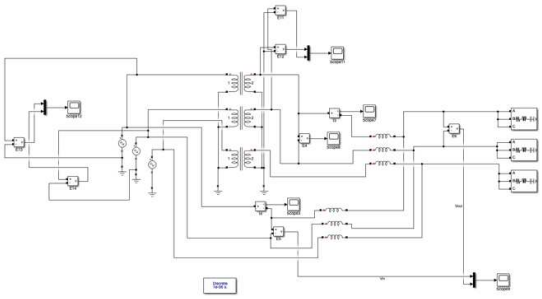
ออโต้ทรานส์ฟอร์เมอร์และตัวเปลี่ยนเฟสเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบส่งไฟฟ้าที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของโครงข่ายไฟฟ้า โดยออโต้ทรานส์ฟอร์เมอร์ใช้ขดลวดร่วมกันระหว่างด้านแรงดันสูงและต่ำ [4],[8] ช่วยลดสูญเสียของหม้อแปลง อีกทั้งสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าได้ผ่านการเปลี่ยนตำแหน่งของแท็ป [4],[6] ช่วยรักษาแรงดันให้เหมาะสมกับโหลดในระบบ ในขณะที่ตัวเปลี่ยนเฟสทำหน้าที่ควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีผลโดยตรงต่อทิศทางและปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง [5],[7] ช่วยลดการโหลดเกินของสายใดสายหนึ่งและปรับสมดุลกำลังในระบบแบบหลายเส้นทาง การใช้งานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งสองนี้ช่วยลดค่าการสูญเสียพลังงาน เพิ่มความมั่นคงของระบบ และรองรับการเชื่อมโยงโครงข่ายขนาดใหญ่ การควบคุมแรงดันและมุมเฟสอย่างแม่นยำยังส่งผลให้สามารถวางแผนการเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในยุคที่ระบบไฟฟ้าซับซ้อนและมีความต้องการสูง ความเข้าใจในหลักการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ยืดหยุ่น และยั่งยืนในระยะยาว [8]

3. กรณีศึกษา

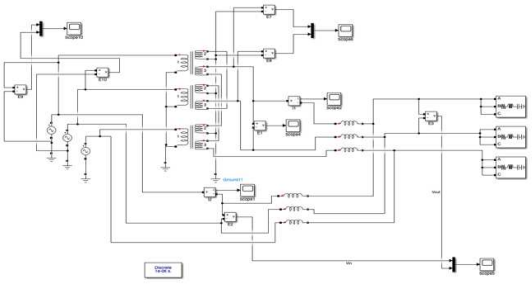
บทความนี้เป็นการทดสอบคำนวณสายส่งไฟฟ้าในโปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นการเปรียบเทียบกรณีศึกษา 2 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยจำลองวงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 4 โดยจำลองวงจรขึ้นมา 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่ปรับตัวเปลี่ยนเฟส ดังที่แสดงในรูปที่ 5 กรณีที่ 2 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบปรับตัวเปลี่ยนเฟส ดังที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 4 วงจรที่ใช้หม้อแปลงอัตโนมัติในการควบคุมการไหลของพลังงาน



รูปที่ 5 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่ปรับตัวเปลี่ยนเฟส



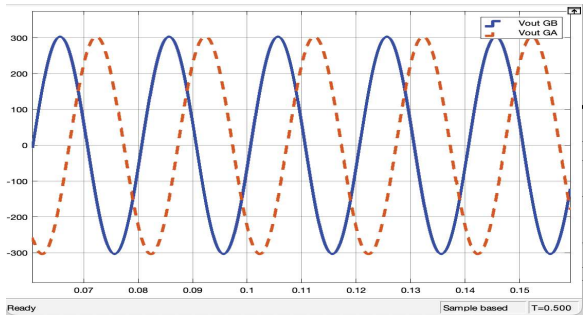
รูปที่ 6 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบปรับตัวเปลี่ยนเฟส

ตารางที่ 1 : กรณีศึกษาการทดสอบแบบจำลองวงจรใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงาน

กรณีศึกษา	ไม่ปรับตัวเปลี่ยนเฟส	ปรับตัวเปลี่ยนเฟส	ปรับตัวเหนี่ยวนำ
1	√	-	√
2	-	√	√

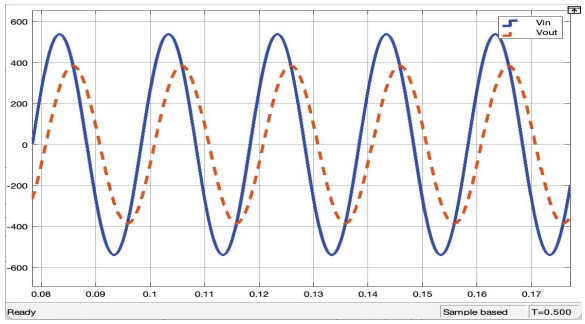
4. ผลการทดสอบ

กรณีที่ 1 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่ปรับตัวเปลี่ยนเฟส ทำการวัดออกเทียบกราวด์ ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 7 และทำการวัด $V_{in} - V_{out}$ เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$ ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 7 กราฟวัดออกเทียบกราวด์

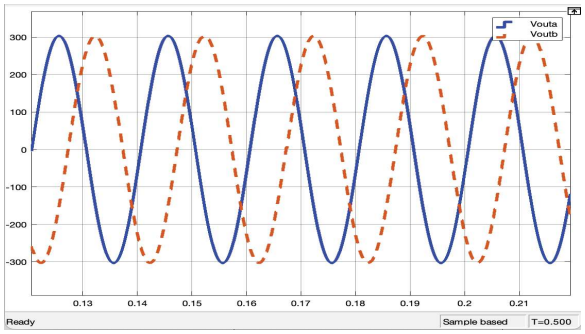
จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า $V_{out}GB$ และ $V_{out}GA$ แต่ละเฟสจะมีเฟสเหลื่อมกัน 120 องศา เพื่อให้ระบบจ่ายพลังงานแบบ 3 เฟส หมุนมอเตอร์ได้อย่างราบรื่น



รูปที่ 8 กราฟวัด $V_{in} - V_{out}$ เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$

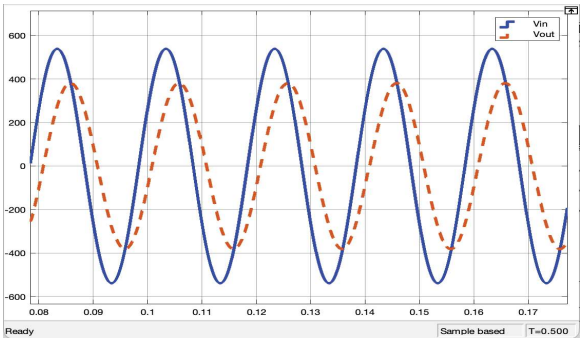
จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า เมื่อใส่ตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$ จะเห็นว่า V_{out} ช้ากว่า V_{in} (เฟสล้าหลัง) เพราะว่าตัวเหนี่ยวนำต้านการเปลี่ยนแปลงเร็ว และ V_{out} มีขนาดต่ำกว่า V_{in} เพราะว่าตัวเหนี่ยวนำลดทอนสัญญาณบางช่วงความถี่ โดย V_{out} ล่าช้ากว่า V_{in} ประมาณ 59.4 องศา

กรณีที่ 2 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบปรับตัวเปลี่ยนเฟส ทำการปรับเฟสขาออก วัดเข้าเทียบกราวด์ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 9 และทำการปรับเฟสวัด $V_{in} - V_{out}$ เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$ ดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 10



รูปที่ 9 กราฟปรับเฟสขาออก วัดเข้าเทียบกราวด์

จากกราฟรูปที่ 9 พบว่า ปรับเฟสขาออก ทำให้ V_{outa} และ V_{outb} ไม่ขึ้นพร้อมกัน (ต่างเฟส) ดังนั้นได้คลื่นไซน์เท่ากันแต่ V_{outb} มาเร็วกว่า (นำหน้า) V_{outa} อยู่ประมาณ 60 องศา



รูปที่ 10 ปรับเฟสวัด $V_{in} - V_{out}$ เพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$

จากกราฟรูปที่ 12 พบว่า เมื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$ เข้าไปทำให้ V_{out} ล่าช้ากว่า V_{in} มากขึ้น ประมาณ 53.5 องศา

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบ พบว่ากรณีที่ 1 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบไม่ปรับตัวเปลี่ยนเฟส ในกราฟ $V_{out}GB$ และ $V_{out}GA$ แสดงให้เห็นว่าเฟส A และ B มีเฟสห่างกันประมาณ 120 องศา สอดคล้องกับหลักการของระบบ 3 เฟส และเมื่อเพิ่มตัวเหนี่ยวนำเข้าไป V_{out} มีเฟสล่าช้ากว่า V_{in} ประมาณ 59.4 องศา และมีแอมพลิจูดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 วงจรที่ใช้หม้อแปลงออโตทรานส์ฟอร์เมอร์ในการควบคุมการไหลของพลังงานแบบปรับตัวเปลี่ยนเฟส ในกราฟ V_{outa} และ V_{outb} แสดงให้เห็นว่าV_{outb}นำ V_{outa} ประมาณ 60 องศา และเมื่อเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ $5e^{-3}$ เข้าไปทำให้ V_{out} ล่าช้ากว่า V_{in} มากขึ้น ประมาณ 53.5 องศา แสดงให้เห็นว่าเฟสสามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นในกรณีที่ 2 ระบบสามารถสร้างสัญญาณแรงดันได้ถูกต้องและมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

1. ทดลองกับโหลดจริง เช่น มอเตอร์ 3 เฟส เชื่อมต่อมอเตอร์หรือโหลดจำลอง 3 เฟส แล้ววัดกระแส/แรงดัน

2. นำวงจรเข้าระบบควบคุมอัตโนมัติ เพิ่มการควบคุม feedback เพื่อให้แรงดัน/เฟส คงที่แม้มีโหลดเปลี่ยน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] UmerJaved, Di He and Peilin Liu, “Performance Characterization of a Hybrid Satellite-Terrestrial System with Co-Channel Interference over Generalized Fading Channels”, Sensors, Vol. 16, 2016.

[2] R. Naskar, S. Ghosh and R. Mandal, “Estimation & Analysis of 5KWP Solar Photovoltaic Power Plant at JIS College of Engineering, Kalyani,” in International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 4, pp. 223-230, 2017.

[3] X. Zhang, Z. Chen, and L. Xie, "Phase-shift control of transients in electrical power systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 4, no. 3, pp. 151-157, 1981.

[4] Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.

[5] El-Hawary, M. E. (2008). *Electrical power systems: Design and analysis*. IEEE Press.

[6] Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press.

[7] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Pérez, H., & Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS: Modelling and simulation in power networks*. Wiley.

[8] Phitthayasiri, R. (2016). *Electric power transmission systems and voltage control* [in Thai]. King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

การศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบกราวด์กริดในรูปแบบ L - Shaped ซึ่งมีแท่งหลักดินเป็นแบบกระจายของสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยเป็นผลมาจากแรงดันเกิน

A Study of Impact on the L-Shaped Ground Grid System with Distributed Ground Rods of High Voltage Substations Resulting from Overvoltage

กรุง ลือวัฒนา
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ต.ประตูชัย อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000 โทร 035-276555
E-mail: zaraburi@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบกราวด์กริดในรูปแบบ L - Shaped ซึ่งมีแท่งหลักดินเป็นแบบกระจายของสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยเป็นผลมาจากแรงดันเกิน ซึ่งจะเป็นการจำลองระบบกราวด์กริดในรูปแบบดังกล่าวขึ้นมาโดยมีขนาดพื้นที่ซึ่งแตกต่างกัน 2 ขนาดคือ 216m^2 และ 864m^2 ซึ่งทั้งสองรูปแบบนอกเหนือจากขนาดที่ต่างกัน แต่จะมีค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่เท่ากัน ทั้งนี้ในการออกแบบระบบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 [1] โดยในการศึกษาจะเป็นการจำลองสภาวะเมื่อระบบกราวด์กริดทั้งสองเกิดกระแสผิดพร่อง (Fault Current) 25 kA ขึ้นบนระบบในกรณีที่แตกต่างกัน ต่อจากนั้นจะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าแรงดันเกิน (Over Voltage) ที่เกิดขึ้นมาว่ามีความรุนแรงมากน้อยต่างกันเพียงใดในแต่ละกรณีของการจำลอง และนำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณ ซึ่งทั้งนี้จะสามารถนำผลที่ได้จากการจำลอง ไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงให้มีเสถียรภาพและมีความเชื่อถือได้ตลอดจนรวมถึงมีความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานภายในสถานีไฟฟ้าต่อไป

คำสำคัญ: ระบบกราวด์กริด, สถานีไฟฟ้าแรงสูง, แรงดันเกิน

Abstract

This article will study the impact on the L-Shaped ground grid system with the main ground rods as the distribution of the high-voltage substation as a result of overvoltage. which will be a simulation of the ground grid system in this form with 2 different sizes: 216m^2 and 864m^2. Which are different in size but have the same important parameters. In designing the system, it will follow the IEEE 80-2000 standard [1]. The study will simulate the condition when both ground grid systems have a fault current of 25 kA on the system in different cases. After that, it will study the impact due to the overvoltage value that occurs, how severe it is in each simulation case and compare it with the calculation. The results from the simulation can be used to design the ground grid system of the high-voltage substation to be stability and reliability as well as safe for the operators in the substation.

Keywords: Ground Grid System, High Voltage Substations, Overvoltage

1. บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานหลักที่สำคัญของมนุษยชาติในการดำเนินชีวิตประจำวันต่างๆ นอกจากนั้นแล้วยังเป็นพลังงานหลักที่จำเป็นต่อการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งพลังงานไฟฟ้านั้นโดยส่วนใหญ่ผลิตมาจากโรงจักรไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโรงจักรไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro Power Plant) โรงจักรไฟฟ้ากังหันไอน้ำ (Stream Turbind Power Plant) หรือแม้กระทั่งโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (Nuclear Power Plant) ซึ่งโรงจักรไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ล้วนตั้งอยู่ห่างไกลจากศูนย์กลางโหลด ซึ่งทั้งนี้การที่โรงจักรไฟฟ้าเหล่านี้จะส่งผ่านกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไปยังผู้ใช้ไฟซึ่งอยู่ห่างไกลออกไป จำเป็นจะต้องมีส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญในการส่งจ่ายไม่ว่าจะเป็น หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า (Power Transformer), เสาส่งไฟฟ้าแรงสูง (Hight Voltage Transmission Tower) หรือสายส่งกำลังไฟฟ้า (Transmission Line) แต่มีส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งก็คือสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Hight Voltage Substation) โดยภายในสถานีไฟฟ้าดังกล่าวเป็นที่รวมของบริภัณฑ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า(TF), หม้อแปลงกระแส (CT), หม้อแปลงแรงดัน (PT) หรือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (CB) เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดล้วนมีความสำคัญต่อ

ระบบ ทั้งนี้หากเกิดกระแสผิดพร่องขึ้นบนสถานีไฟฟ้าดังกล่าวไม่ว่าจะเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงภายในสถานีทำงานผิดพลาดหรือเกิดขึ้นจากภัยธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า รวมถึงจากสัตว์ [2] ก็ตาม ซึ่งทั้งหมดดังที่กล่าวมานั้นล้วนก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่สำคัญภายในสถานีไฟฟ้า และนอกจากนั้นแล้วยังอาจส่งผลกระทบไปถึงผู้ปฏิบัติงานซึ่งอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วจึงมีความคิดในการที่จะศึกษาถึงผลกระทบอันเกิดจากแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดในรูปแบบต่างๆ ซึ่งระบบกราวด์กริดที่ดีอันมีเสถียรภาพ และมีความเชื่อถือได้นั้น [3] จะสามารถช่วยลดความรุนแรงอันเนื่องมาจากแรงดันเกินที่อาจสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และสิ่งที่สำคัญนอกเหนือไปจากนั้นแล้วยังรวมถึงจะสามารถช่วยลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นแก่เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในสถานีไฟฟ้าดังกล่าวได้

2. กรรมวิธีในการศึกษา

2.1 การออกแบบระบบกราวด์กริด

ในการออกแบบระบบกราวด์กริดจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 80-2000 โดยจะนำเอารูปแบบ L – Shaped มาใช้ และออกแบบเป็น 2 ขนาดเพื่อการศึกษา ซึ่งหลังจากการออกแบบจะทำการจำลองระบบกราวด์กริดตามรูปแบบดังกล่าวลงบนโปรแกรม ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาเรื่องดังกล่าวมากมายไม่ว่าจะเป็น Electrical Transient Analyzer Program (ETAP), Finite Element Method (FEM) [4], Grounding Grid Designer (GGD) [5] หรือ The Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) เป็นต้น แต่ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Alternative Transients Program/ Electromagnetic Transients Program) ซึ่งจะเป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อการศึกษากันโดยทั่วไปในการจำลอง หากแต่ทั้งนี้จะกำหนดให้ระบบกราวด์กริดทั้งสองมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ เท่ากัน เช่น ค่ากระแสผิดพร่อง 25 kA, ความยาวแท่งหลักดิน (Ground Rod) 3 เมตร, เนื้อดินที่ทำการจำลองเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Unifrom Soil), ค่าระยะห่างระหว่างตัวนำกริด 3 เมตร, ค่าความต้านทานดิน 10 Ω.m, ตัวนำกริด (Ground Grid) มีขนาดพื้นที่หน้าตัดคือ 95 mm^2, แท่งหลักดินมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 mm และ ระบบกราวด์กริด (Ground Grid System) ฝังลึกลงไปภายใต้ผิวดิน 0.5 m ทั้งนี้จะกำหนดให้ระบบกราวด์กริดทั้งสองมีขนาดที่แตกต่างกัน คือ [18m×9m]+[9m×6m] คิดเป็นพื้นที่ระบบคือ 216m^2 มีจำนวนแท่งหลักดิน 18 แท่ง โดยมีค่า GPR (Grid Potential rise) ซึ่งได้จากการคำนวณคือ 6.654 kV และระบบกราวด์กริดขนาด [36m×18m]+[18m×12m] คิดเป็นพื้นที่ระบบคือ 864m^2 มีจำนวนแท่งหลักดิน 60 แท่ง ซึ่งมีค่า GPR ซึ่งได้จากการคำนวณคือ 3.2285 kV ทั้งนี้สามารถแสดงสมการสำคัญต่างๆ บางส่วนที่ใช้ในการคำนวณเพื่อการออกแบบระบบกราวด์กริดได้ดังต่อไปนี้

$$R_g = \rho\left[\frac{1}{L_T}+\frac{1}{\sqrt{20A}}\left(1+\frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}}\right)\right] \quad (1)$$

$$S_f = \left[\frac{I_g}{3.I_o}\right] \quad (2)$$

$$I_G = [D_f.S_f.3I_o] \quad (3)$$

$$GPR = [I_G.R_g] \quad (4)$$

$$E_m = \frac{\rho.K_m.K_i.I_G}{\left[L_C+\left[1.55+1.22.i\left(\frac{L_r}{\sqrt{L^2x+L^2y}}\right)\right].L_R\right]} \quad (5)$$

$$E_s = \left[\frac{\rho.K_s.K_i.I_G}{0.75.L_C+0.85.L_R}\right] \quad (6)$$

เมื่อ

A = คือพื้นที่ระบบกราวด์กริด (m^2)

S_f = คือแฟกเตอร์ของการแบ่งกระแสผิดพร่อง

D_f = คือค่าแฟกเตอร์ลดสำหรับการคำนวณ I_G

GPR= คือศักยภาพของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นทางด้านกราวด์ (V)

R_g = คือค่าความต้านทานของระบบกราวด์กริด (Ω)

L_C = คือค่าความยาวรวมทั้งหมดของตัวนำกริดในระบบ (m)

L_R = คือค่าความยาวรวมทั้งหมดของแท่งหลักดินในระบบ (m)

E_m= คือค่าแรงดันเมช (V)

E_S = คือค่าแรงดันช่วงก้าว (V)

ρ = คือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω. m)

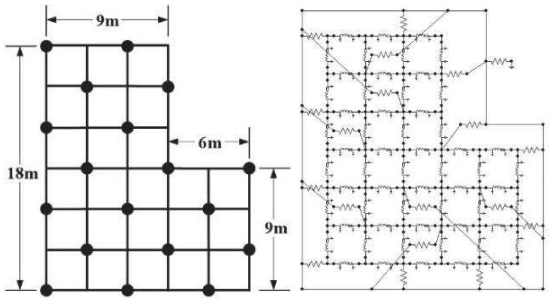
K_m= คือแฟกเตอร์ระยะห่างสำหรับวิธีลดแรงดันเมชอย่างง่าย

K_i = คือแฟกเตอร์สำหรับการลดรูปเรขาคณิตของระบบกราวด์กริด

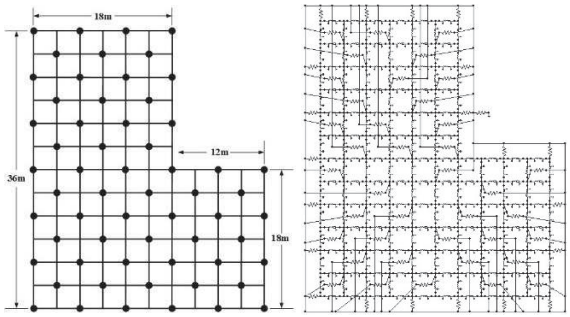
I_G = คือขนาดกระแสกริดสูงสุดที่ไหลระหว่างตัวนำกริดและไหลโดยรอบกับดิน (A)

2.2 การจำลองระบบกราวด์กริด

เมื่อได้ทำการออกแบบระบบกราวด์กริด โดยใช้สมการต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จากนั้นในลำดับขั้นตอนต่อมาจะสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณมาป้อนลงในโปรแกรมการจำลองซึ่งจะสามารถทำการจำลองสร้างระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในรูปแบบ L - Shaped โดยจะมี 2 ขนาดที่แตกต่างกันนั่นคือ [18m×9m]+[9m×6m] และ [36m×18m]+[18m×12m] ซึ่งมีแท่งหลักดินเป็นแบบกระจายได้ดังภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



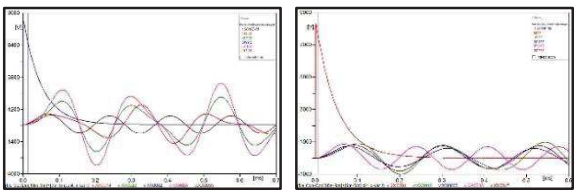
รูปที่ 1 ระบบกราวด์กริดขนาด [18m×9m]+[9m×6m]



รูปที่ 2 ระบบกราวด์กริดขนาด [36m×18m]+[18m×12m]

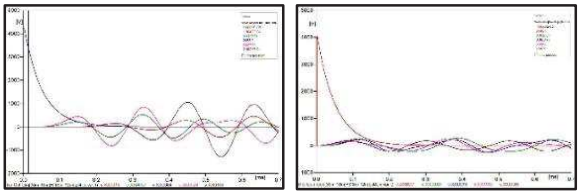
2.3 การทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในลำดับต่อมาโปรแกรมจะทำการประมวลผลซึ่งจะกำหนดพารามิเตอร์ให้มีกระแสผิดพร่องขนาด 25 kA ป้อนเข้าสู่ระบบกราวด์กริดทั้งสองที่ตำแหน่งกลางระบบ โดยวัดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในตำแหน่งทแยงมุม (Cte-Din) และวัดค่าแรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมระบบ (Cet-Con) ต่อจากนั้นป้อนกระแสผิดพร่องเข้าสู่ระบบกราวด์กริดที่ตำแหน่งมุมของระบบ โดยวัดค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในตำแหน่งทะแยงมุม (Con-Din) และวัดค่าแรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมของระบบ (Con-Con) หลังจากนั้นโปรแกรมจะสามารถทำการแสดงผลค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์กริดในกรณีต่างๆ ดังที่กล่าวมาได้ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



ก ข

รูปที่ 3 ก. แรงดันเกินที่ตำแหน่งทแยงมุมเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่กลางระบบกราวด์กริด ข. แรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่มุมระบบกราวด์กริดขนาด [18m×9m]+[9m×6m]



ก ข

รูปที่ 4 ก. แรงดันเกินที่ตำแหน่งทแยงมุมเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่กลางระบบกราวด์กริด ข. แรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่มุมระบบกราวด์กริดขนาด [36m×18m]+[18m×12m]

โดยจากการจำลองระบบกราวด์กริดทั้งสองขนาดและทำการทดลองในกรณีต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจะสามารถนำค่าที่ได้มาบันทึกผลลงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับดังนี้

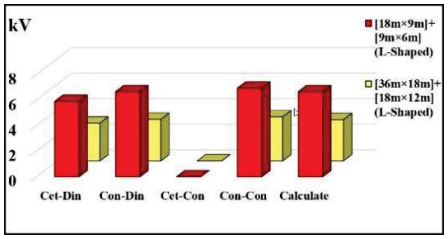
ตารางที่ 1 แรงดันเกินบนระบบกราวด์กริด [18m×9m]+[9m×6m]

แรงดันเกินบนระบบกราวด์กริด					
แรงดันเกินที่เกิดในแนวทแยงมุม			แรงดันเกินที่เกิดตำแหน่งมุม		
Node	ป้อนกลาง (kV)	ป้อนมุม (kV)	Node	ป้อนกลาง (kV)	ป้อนมุม (kV)
0014	0.12332	6.6566	0008	0.00059	6.9281
0026	0.048936	0.059751	0012	0.001562	0.019391
0002	5.8992	0.059751	0037	0.00111	0.038157
0024	0.05313	0.040243	0035	0.0004	0.057057
0035	0.16382	0.079421	0018	0.00067	0.028787

ตารางที่ 2 แรงดันเกินบนระบบกราวด์กริด [36m×18m]+[18m×12m]

แรงดันเกินบนระบบกราวด์กริด					
แรงดันเกินที่เกิดในแนวทแยงมุม			แรงดันเกินที่เกิดตำแหน่งมุม		
Node	ป้อนกลาง (kV)	ป้อนมุม (kV)	Node	ป้อนกลาง (kV)	ป้อนมุม (kV)
0013	0.00019043	3.2457	0053	0.00017548	3.4487
0057	0.000013799	0.0049474	0040	0.00013996	0.00006263
0001	2.9958	0.018969	00099	0.00018115	0.00008347
0078	0.000027331	0.004902	0110	0.00013051	0.0056568
0106	0.00024626	0.01269	0043	0.00013825	0.0056676

จากนั้นแล้วสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองในตารางไปแสดงเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลกับการคำนวณได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แรงดันเกินจากการจำลองเปรียบเทียบผลกับการคำนวณ

โดยผลที่ได้จากการจำลองระบบกราวด์กริดทั้งสองขนาด พบว่าค่าแรงดันเกินสูงสุดของระบบกราวด์กริดขนาด [18m×9m]+[9m×6m] มีค่า 6.9281 kV เมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่ตำแหน่งมุมของระบบกราวด์กริดและวัดค่าแรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมของระบบ โดยมีค่าสูงกว่าค่า GPR ที่คำนวณได้ 4.11 % นอกจากนั้นยังพบว่าค่าแรงดันเกินมีค่าต่ำสุดเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่ตำแหน่งกลางระบบกราวด์กริดและวัดแรงดันเกินที่มุมของระบบกราวด์กริดโดยมีค่า 0.00059 kV ซึ่งต่ำกว่าค่า GPR มากกว่า 90% และจากการจำลองระบบกราวด์กริดขนาด [36m×18m] + [18m×12m] ค่าแรงดันเกินสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่า 3.4487 kV เมื่อป้อนกระแสผิดพร่องและวัดค่าแรงดันเกินที่ตำแหน่งมุมของระบบ โดยมีค่าสูงกว่าค่า GPR ที่คำนวณได้ 6.82% รวมถึงพบว่าค่าแรงดันเกินมีค่าต่ำสุดเมื่อป้อนกระแสผิดพร่องที่ตำแหน่งกลางระบบกราวด์กริดและวัดแรงดันเกินในแนวทะแยงมุมของระบบกราวด์กริดโดยมีค่า 0.000013799 kV ซึ่งมีค่าต่ำกว่า GPR ที่คำนวณได้มากกว่า 90% เช่นกัน

3. สรุป

จากการออกแบบและจำลองโดยการป้อนกระแสผิดพร่องลงบนระบบกราวด์กริดทั้งสองขนาดในกรณีต่างๆ พบว่าค่าแรงดันเกินจะมีค่าสูงสุดเมื่อระบบกราวด์กริดมีพื้นที่ขนาดเล็กคือ 216m^2 และในขณะเดียวกันค่าแรงดันเกินจะมีค่าต่ำสุดเมื่อระบบกราวด์กริดมีพื้นที่ขนาดใหญ่คือ 864m^2 นอกเหนือไปจากนั้นค่าแรงดันเกินจะมีค่าสูงสุดเมื่อกระแสผิดพร่องเกิดขึ้นที่มุมระบบกราวด์กริด และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อกระแสผิดพร่องเกิดขึ้นที่กลางระบบกราวด์กริดของทั้งสองขนาด ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องด้วยระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาดใหญ่สามารถที่จะลดทอนและกระจายความรุนแรงของกระแสผิดพร่องที่เกิดขึ้นให้ไหลผ่านลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็ว กว่าระบบกราวด์กริดซึ่งมีขนาดเล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่กระแสผิดพร่องนั้นเกิดขึ้นที่ศูนย์กลางระบบกราวด์กริดที่ปริมาณกระแสผิดพร่องเท่ากัน แต่เมื่อกระแสนั้นเกิดขึ้นที่มุมของระบบซึ่งเป็นจุดที่ไม่สมมาตร จึงทำให้ปริมาณกระแสดังกล่าวไม่สามารถกระจายลงสู่ดินได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดแรงดันเกินปริมาณสูงเกิดขึ้น เมื่อเป็นเช่นนี้ดังนั้นแล้วในการออกแบบจึงต้องคำนึงถึงขนาดของระบบรวมถึงความพิธีพิถันในเรื่องของการติดตั้งโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการเชื่อมต่อด้วยกรรมวิธีการหลอมละลาย (Exothermic Welding) ที่ถูกต้องโดยเฉพาะที่ตำแหน่งมุมของระบบรวมถึงอาจเพิ่มขนาดตัวนำกริดหรือขนาดแท่งหลักดินในกรณีที่มีพื้นที่จำกัดเพื่อให้ระบบกราวด์กริดมีประสิทธิภาพและมีความเชื่อถือได้ รวมทั้งการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์รวมด้วย ทั้งนี้ผลการจำลองเป็นไปเพื่อการศึกษาและเพื่อดูแนวทางที่น่าจะเป็นของความรุนแรงจากแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งหากต้องการผลการจำลองที่แม่นยำสามารถเลือกใช้โปรแกรมเฉพาะทางที่มีประสิทธิภาพสูงเช่น CDEGS ได้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ANSI/IEEE Std. 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2000.

[2] Surya Hardi, R Andira, I Nisja, B Octrialdi and M Pinem, "Economic Design of Substation Grounding Grid using ETAP Software: A Case Study of 2 x 500 MVA Galang Substation,"The 2nd International Conference on Sciences and Technology Applications (ICOSTA) 2020, Volume 1811, 3 November 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1811/1/012055.

[3] Hachimenum Nyebuchi Amadi, "Design of Grounding System for A.C. Substations with Critcal Considertion of the Mesh, Touch and Step Potentials," European Journal of Engineering and Technolog, Vol. 5, No. 4, pp.44 - 57. November 2017. ISSN 2056-5860.

[4] Md. Shawkat Hossain, Raju Ahmed, Shahzad Hossain, "Design and Optimization of Substation Grounding Grid for Ensuring the Safety of Personnel and Equipment," Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 71 - 80, August 2021, doi: 10.26855/jepes.2021.08.001.

[5] Ankita B. Patel, Keval Velani, "Digital Application for Grouning Grid Design Calculations of Substation," International Conference on Innovations in Power and Advanced Computing Technologies [i-PACT2017], pp. 1 - 6, October 2017, doi: 10.1109/IPACT.2017.8244947.



ประวัติผู้เขียนบทความ กรุง ลือวัฒนา รองศาสตราจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง สนใจงานด้าน High Voltage Engineering and Insulation, Electrical Grounding Systems, Electromagnetic, Renewable/Alternative Energy

การออกแบบหาขนาดและตำแหน่งของ DG ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบจำหน่ายของ IEEE 33 Bus system สำหรับ PV หนึ่งจุด และ Wind Turbine สองจุด

The Optimal Design for Determining the Size and Connected Location of Distributed Generation (DG) units in the IEEE 33 Bus system includes for One Photovoltaic (PV) Unit and Two Wind Turbine Units

เสวก ประทุมเมศ, สุรศักดิ์ น้อยทับทิบ, วรรณวินิต วิจิตรเตมีย์, กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์ และ บุญยัง ปลั่งกลาง*
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: Sawek_p@mail.rmutt.ac.th and boonyang.p@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Generation: DG) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า IEEE 33 Bus โดย การศึกษาพิจารณาการติดตั้ง DG สามประเภท ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) หนึ่งจุด และกังหันลม (Wind Turbine: WT) สองจุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันในระบบ ผลการศึกษาพบว่า การติดตั้ง PV ที่บัส 14 ขนาด 1.6512 MW, WT ที่บัส 24 ขนาด 0.8479 MW และ 0.3505 MVAละ WT ที่บัส 30 ขนาด 1.2043 MW และ 0.4769 MVAR สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงได้ 69.1% จาก 211 kW เหลือ 65.12 kW นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้ง DG ร่วมกับการเปิดสายเชื่อมโยง (Tie-lines) ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันได้ดียิ่งขึ้น โดยลดจำนวนบัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์จาก 10 บัสในกรณีฐาน เหลือเพียง 2 บัส การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาคในการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

คำสำคัญ: ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์, การสูญเสียกำลังไฟฟ้า, IEEE 33 Bus, Particle Swarm Optimization

Abstract

This paper presented the optimal placement and sizing of Distributed Generation (DG) systems in the IEEE 33 Bus distribution network. The study examined the installation of three types of DG: one solar photovoltaic (PV) system and two wind turbines (WT), with the objective of reducing power losses and improving voltage profile in the system. The results show that installing a PV at bus 14 with a capacity of 1.6512 MW, a WT at bus 24 with capacity of 0.8479 MW and 0.3505 MVAR, and a WT at bus 30 with capacity of 1.2043 MW and 0.4769 MVAR can reduce real power losses by 69.1% from 211 kW to 65.12 kW. Furthermore, the impact of installing DG along with opening tie-lines was analyzed, which was found to further improve voltage profiles by reducing the number of buses with voltage below standard from 10 buses in the base case to only 2 buses. This study demonstrates the effectiveness improvement in voltage profiles by reducing the number of buses with voltage below the standard from 10 buses in the base case to only 2 buses. This study demonstrated the effectiveness of applying Particle Swarm Optimization (PSO) in solving the optimal placement and sizing problem of DG in distribution systems.

Keywords: Distributed Generation: DG, Power losses, IEEE 33 Bus, Particle Swarm Optimization

1. บทนำ

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (DG) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากประโยชน์ในการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงโปรไฟล์แรงดัน และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของ DG ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและ ขนาดที่เหมาะสม การติดตั้งในตำแหน่งไม่เหมาะสมอาจส่งผลเชิงลบ เช่น การเพิ่มการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปัญหาแรงดันเกิน หรือปัญหาด้าน การป้องกัน

การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG เป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นที่ซับซ้อน เนื่องจากมีตัวแปรตัดสินใจหลายตัว และข้อจำกัดหลายประการ วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (PSO) มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหานี้ เนื่องจากมีโครงสร้างอย่างง่าย การลู่เข้าที่รวดเร็ว และความทนทานต่อค่าเหมาะสมเฉพาะที่

บทความนี้นำเสนอการใช้ PSO ในการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ในระบบ IEEE 33 Bus โดยพิจารณาการติดตั้ง

PV หนึ่งจุด และ Wind Turbine สองจุด พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบของการเปิดสายเชื่อมโยง (Tie-lines) ร่วมกับ DG ต่อประสิทธิภาพของระบบ



รูปที่ 1: สัดส่วนการจัดหาพลังงานไฟฟ้า ม.ค.–พ.ย. 2567 [สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (EPPO), กระทรวงพลังงาน]

2. ทบทวนวรรณกรรม

El-Khattam และ Salama [1] ได้มีการนำเสนอแนวคิดพื้นฐาน DG และผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ชี้ให้เห็นว่าการติดตั้ง DG ในตำแหน่งที่เหมาะสมช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันได้

Acharya และคณะ [2] ได้นำเสนอวิธีการเชิงวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ DG พบว่า DG ที่จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริงในตำแหน่งที่เหมาะสมสามารถลดการสูญเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ

Hung และ Mithulananthan [3] ศึกษา DG หลายตัวในระบบจำหน่าย พบว่า DG ที่จ่ายทั้ง P และ Q มีประสิทธิภาพในการลดการสูญเสียมากกว่า DG ที่จ่ายเฉพาะ P

ในด้านวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด มีการใช้เทคนิคหลายแบบ เช่น GA [4], PSO [5], ABC [6] และ TS [7] โดย El-Zonkoly [5] พบว่า PSO มีประสิทธิภาพในการลู่เข้าและให้ผลลัพธ์ที่ดี อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มักพิจารณา DG ประเภทเดียวหรือเฉพาะระบบรัศมี งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการติดตั้ง DG หลายประเภทร่วมกับการเปิดสายเชื่อมโยงในระบบ IEEE 33 Bus

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ระบบทดสอบ IEEE 33 Bus

ระบบทดสอบ IEEE 33 Bus เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบรัศมีที่ประกอบด้วยบัส 33 บัส สายส่ง 32 เส้น แรงดัน 12.66 kV โหลดรวม 3.715 MW และ 2.300 MVAR มีสายแยกหลัก 4 สาย (บัส 2-18, 3-22, 6-26, 25-33) และสายเชื่อมโยง 5 เส้น (8-21, 9-15, 12-22, 18-33, 25-29)

3.2 การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์

การศึกษานี้พิจารณา DG สองประเภท 1) PV: จ่ายเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (P) ที่

$$Power\ factor = 1.0\ 0 \le \mathrm{PPV} \le 2.0\ \mathrm{MW}$$

Wind Turbine จ่ายทั้ง P และ Q 0 $\le$PWT $\le$1.5 MW0.85 $\le \cos\phi \le$0.95(lagging)

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาใช้วิธี Backward-Forward Sweep ซึ่งประกอบด้วย 1) Backward sweep: คำนวณกระแสไฟฟ้าในแต่ละสายส่งจากบัสปลายทางไปยังบัสต้นทาง 2) Forward sweep: คำนวณแรงดันที่แต่ละบัสจากบัสต้นทางไปยังบัสปลายทาง ทำซ้ำจนกว่าจะได้ค่าที่ลู่เข้า
การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงในสายส่งคำนวณจากสมการที่ 1

$$\mathrm{Ploss}(i,j) = \mathrm{Rij} \times |\mathrm{Iij}| \quad (1)$$

3.3 วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

PSO เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกที่ขอนุภาคแต่ละตัวเคลื่อนที่ในพื้นที่การค้นหาโดยปรับความเร็วและตำแหน่งตามสมการที่ 2

$$v_i^{k+1} = w \times v_i^k + c_1 \times r_1 \times (pbest_i - x_i^k) + c_2 \times r_2 \times (gbest - x_i^k) \quad (2)$$

และการปรับปรุงตำแหน่งเป็นไปตามสมการที่

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (3)$$

3.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัด

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงรวม

$$\text{Minimize} \quad P_{loss} = \sum_{l=1}^{N_1} P_{loss,1} \quad (4)$$

ภายใต้ข้อจำกัด

1) แรงดัน Vmin$\le$Vi$\le$Vmax(Vmin = 0.95p.u., Vmax = 1.05p.u.

2) ขนาด DG 0$\le$PPV$\le$2.00$\le$ PPV $\le$ 2.0 MW, 0 $\le$ PWT $\le$1.50 $\le$PWT $\le$1.5MW

3) Power factor ข อ ง Wind Turbine 0.85 $\le \cos\phi \le$ 0.95 * 0.85 $\le \cos\phi \le$ 0.95(lagging)

4) ตำแหน่งของ DG PV และ Wind Turbine ทั้งสองต้องอยู่คนละบัส

4. ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 กรณีฐาน (Base Case)

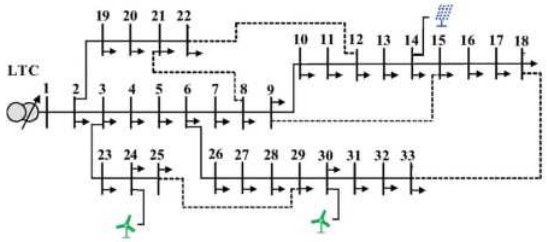
กรณีฐานเป็นการวิเคราะห์ระบบ IEEE 33 Bus ที่ไม่มีการติดตั้ง DG และไม่มีการเปิดสายเชื่อมโยง ผลการวิเคราะห์แสดงว่า การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงรวม: 211 kW การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรวม: 143 kVAR แรงดันต่ำสุด: 0.9131 p.u. ที่บัส 18 จำนวนบัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ (0.95 p.u.): 10 บัส ได้แก่ บัส 6-18 และบัส 26-33

4.2 การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG

ผลการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG โดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (PSO) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG

ประเภท DG	ตำแหน่ง (บัส)	ขนาด P (MW)	ขนาด Q (MVAR)	Power Factor
PV	14	1.6512	0	1
Wind Turbine 1	24	0.8479	0.3505	0.9239 (lag)
Wind Turbine 2	30	1.2043	0.4769	0.9296 (lag)
รวม	-	3.7034	0.8274	-



รูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้ง DG ในระบบการเปิดสายเชื่อมโยง

การเลือกตำแหน่งและขนาดของ DG มีเหตุผลทางเทคนิคดังนี้ 1) บัส 14 (PV) อยู่ในสายแยกที่ 1 (บัส 2-18) ซึ่งมีปัญหาแรงดันต่ำ การติดตั้งที่บัส 14 ช่วยปรับปรุงแรงดันที่บัส 14-18 และลดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งระหว่างบัส 1-14 2) บัส 24 (Wind Turbine 1) มีโหลดขนาดใหญ่ (420 kW, 200 kVAR) Wind Turbine สามารถจ่ายทั้ง P และ Q ซึ่งเหมาะกับโหลดที่บัส 24 ช่วยกระจายแหล่งจ่ายไฟฟ้าในระบบ ไม่ให้กระจุกตัวในสายแยกเดียวกับ PV 3) บัส 30 (Wind Turbine 2) อยู่ในสายแยกที่ 4 ซึ่งอยู่ห่างไกลจากสถานีไฟฟ้า มีโหลด Q ขนาดใหญ่มาก (600 kVAR) ซึ่ง Wind Turbine สามารถจ่ายได้ ช่วยปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันในบัส 30-33 ซึ่งมีแรงดันต่ำในกรณีฐาน

4.3 ผลกระทบต่อการสูญเสียกำลังไฟฟ้า

การติดตั้ง DG ในตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดส่งผลให้การสูญเสียกำลังไฟฟ้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในแต่ละกรณี

กรณี	การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริง (kW)	การสูญเสียกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kVAR)	การลดการสูญเสีย P (%)
กรณีฐาน	211	143	-
กรณีติดตั้ง DG	65.12	47.81	69.14
กรณีติดตั้ง DG และสายเชื่อมโยง	42.37	31.26	79.92

จากตารางที่ 2 การติดตั้ง DG สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงได้ 69.14% และเมื่อมีการเปิดสายเชื่อมโยงร่วมด้วยสามารถลดการสูญเสียได้ถึง 79.92% การลดลงของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเป็นผลมาจากปัจจัยหลายประการ ได้แก่ 1) DG ช่วยจ่ายไฟฟ้าใกล้กับจุดใช้งาน ลดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง 2) Wind Turbine ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) ที่จำเป็นต่อโหลด 3) การเปิดสายเชื่อมโยงช่วยกระจายการไหลของกำลังไฟฟ้า ลดความแออัดในสายส่งบางเส้น

4.4 ผลกระทบต่อโปรไฟล์แรงดัน

การติดตั้ง DG และการเปิดสายเชื่อมโยงส่งผลให้โปรไฟล์แรงดันในระบบดีขึ้น ตารางที่ 3 กราฟเปรียบเทียบแรงดันที่บัสในแต่ละกรณี

จากตารางที่ 3 สังเกตได้ว่า 1) ในกรณีฐาน แรงดันต่ำสุดอยู่ที่ 0.9131 p.u. (บัส 18) และมี 10 บัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ 2) หลังการติดตั้ง DG แรงดันต่ำสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.9642 p.u. และจำนวนบัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ลดลงเหลือ 3 บัส 3) หลังการติดตั้ง DG และเปิดสายเชื่อมโยง แรงดันต่ำสุดเพิ่มขึ้นเป็น 0.9486 p.u. และจำนวนบัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ลดลงเหลือเพียง 2 บัส การปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันเป็นผลมาจาก 1) การจ่ายกำลังไฟฟ้าจาก DG ช่วยลดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่ง ทำให้แรงดันตกลดลงลดลง 2) Wind Turbine จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ช่วยปรับปรุงแรงดัน 3) การเปิดสายเชื่อมโยงช่วยกระจายการไหลของกำลังไฟฟ้า ทำให้แรงดันสม่ำเสมอขึ้น

ตารางที่ 3 กราฟเปรียบเทียบแรงดันที่แต่ละบัส



4.5. การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (PSO) ที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้มีการเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA), การหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาคประดิษฐ์ (ABC) และการค้นหาแบบต้องห้าม (TS) ผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด

วิธีการ	การสูญเสียกำลังไฟฟ้า (kW)	จำนวนรอบในการลู่เข้า	เวลาการคำนวณ (วินาที)	ความเสถียรของคำตอบ (%)
PSO	65.12	78	156	94
GA	67.85	105	247	90
ABC	66.24	86	203	92
TS	69.37	124	185	88

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG ที่เป็น PV 1 จุด และ Wind Turbine 2 จุด ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า IEEE 33 Bus ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า

1. การติดตั้ง PV ที่บัส 14 ขนาด 1.6512 MW, Wind Turbine ที่บัส 24 ขนาด 0.8479 MW และ 0.3505 MVAR และ Wind Turbine ที่บัส 30 ขนาด 1.2043 MW และ 0.4769 MVAR เป็นตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุด

2.การติดตั้ง DG สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงได้ 69.14% (จาก 211 kW เหลือ 65.12 kW) และปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.การเปิดสายเชื่อมโยงร่วมกับการติดตั้ง DG สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงได้ถึง 79.92% (เหลือ 42.37 kW) และลดจำนวนบัสที่มีแรงดันต่ำกว่าเกณฑ์ลงเหลือเพียง 2 บัส

4. PSO มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ DG เมื่อเทียบกับวิธีการ GA, ABC และ TS

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการติดตั้ง DG ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และความสำคัญของการเลือกตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสม ตลอดจนการพิจารณาโครงสร้างของระบบ เช่น การเปิดสายเชื่อมโยง เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

[1] W. El-Khattam and M.M.A. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," Electric Power Systems Research, vol. 71, no. 2, pp. 119-128, 2004.

[2] N. Acharya, P. Mahat, and N. Mithulananthan, "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 10, pp. 669-678, 2006.

[3] D.Q. Hung and N. Mithulananthan, "Multiple distributed generator placement in primary distribution networks for loss reduction," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp. 1700-1708, 2013.

[4] M.H. Moradi and M. Abedini, "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 34, no. 1, pp. 66-74, 2012.

[5] A.M. El-Zonkoly, "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 5, no. 7, pp. 760-771, 2011.

[6] [12] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," Journal of Global Optimization, vol. 39, no. 3, pp. 459-471, 2007.

[7] [13] K.Y. Lee and M.A. El-Sharkawi, Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems, John Wiley & Sons, 2008.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การจัดการพลังงานผสมผสานแบบฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์สำหรับชุมชนพื้นที่ห่างไกลด้วยระบบ PV-HP-BESS ด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

Hybrid Energy Management based on Multi-Objective Function in Remote Area Community installed Hybrid PV-HP-BESS Integrated System using Particle Swam Optimization Technique

อสิวุฒิ บุญเจียม[1] ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1] พิมพ์นภัส ภูมิกิตติพิชญ์[2] ณัฏฐกิตติ์ เอี่ยมสมบูรณ์[2] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

[2]สาขาสัมคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

[*]Corresponding author e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ศักยภาพการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันเพิ่มขึ้นจากพลังงานหมุนเวียนและการผลิตแบบกระจาย แต่พื้นที่ห่างไกลยังประสบปัญหาการเข้าถึงไฟฟ้า บทความนี้นำเสนอการจัดการพลังงานแบบหลายวัตถุประสงค์โดยใช้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กังหันพลังน้ำขนาดเล็ก และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ ด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค เพื่อปรับปรุงเสถียรของแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดระบบไฟฟ้า การทดสอบใช้ระบบไฟฟ้ามาตราฐาน IEEE 15 บัส 3 กรณี ได้แก่ กรณี 1: ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กังหันพลังน้ำขนาดเล็ก และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่แบบสุ่ม กรณี 2: ติดตั้งระบบในตำแหน่งที่เหมาะสมและควบคุมพารามิเตอร์พีไอด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และกรณี 3: ทดสอบไฟฟ้าลัดวงจรในกรณี 2 ผลการทดสอบผ่าน Hardware-in-the-Loop (HIL) แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอช่วยเพิ่มเสถียรระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าแบบกระจาย, ชุมชนพื้นที่ห่างไกล, ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่

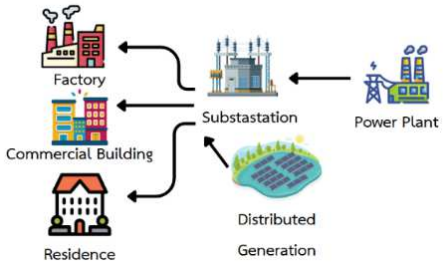
Abstract

The potential for electricity distribution has significantly increased compared to the past, driven by the rise of renewable energy sources and distributed generation (DG), making electricity more accessible. However, remote area communities (RAC) still face challenges in accessing electricity due to difficult terrain and complex power plant installations. This paper proposes hybrid energy management based on multi-objective function approach for RACs, integrating Photovoltaic (PV), small hydropower, and battery energy storage systems (BESS) alongside particle swarm optimization (PSO) technique to enhance voltage stability in compliance with grid codes. The approach was tested on an IEEE 15-bus test system under three scenarios: Case 1 — random installation of PV-Hydro-BESS with PI parameter control for the BESS; Case 2 — optimized PV-Hydro-BESS placement with PSO-based PI control; and Case 3 — sudden short-circuit fault in Case II setup. The results, validated through Hardware-in-the-Loop (HIL) testing, demonstrated significant improvements in power quality and stability, even under disturbance conditions.

Keywords: Distributed generation, remote area community, BESS

1. บทนำ

การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (Diesel Generator Resources: DGR) เป็นวิธีดั้งเดิมในการจ่ายไฟให้ชุมชนห่างไกล แต่ทำให้เกิดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีต้นทุนสูงและค่าไฟแพงขึ้น [1] ปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปสู่การผสานพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Sources, RES) เช่น แสงอาทิตย์ (Photovoltaic, PV) กังหันน้ำขนาดเล็ก (Small Hydropower, HP) และกังหันลม (Wind Turbine, WT) [2] ร่วมกับระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System, BESS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โครงการจริงหลายแห่งพิสูจน์แล้วว่าช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิต ระบบไมโครกริด (Microgrid, MG) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและต้นทุนพลังงานหมุนเวียนที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 การติดตั้งแหล่งพลังงานหมุนเวียน (RES) ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เอกสารฉบับนี้นำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมขนาดของระบบ PV-HP-BESS และการควบคุมพารามิเตอร์ BESS เพื่อปรับปรุงคุณภาพและเสถียรภาพของพลังงานในชุมชนห่างไกล โดยใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) ซึ่งพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น การกระจายโหลด ความแปรปรวนของการผลิตพลังงานจาก DER และข้อกำหนดตามโค้ดของ

ระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อพัฒนาโซลูชันที่แข็งแกร่งและปรับใช้ได้กับโครงข่ายไฟฟ้าหลายรูปแบบ

2. ข้อกำหนดปัญหา (Problem statements)

เอกสารฉบับนี้นำเสนอวิธีการกำหนดตำแหน่ง ขนาดของระบบ PV-HP-BESS และการควบคุมพารามิเตอร์การออกแบบของ BESS เพื่อปรับปรุงคุณภาพและเสถียรภาพของพลังงานในชุมชนห่างไกล โดยใช้เทคนิค PSO ซึ่งพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น การกระจายโหลด ความแปรปรวนของการผลิตพลังงานจาก DER และข้อกำหนดของโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อพัฒนาโซลูชันที่แข็งแกร่งและปรับใช้ได้กับโครงข่ายหลากหลายรูปแบบ

2.1 การกำหนดรูปแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์

1) การลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power loss reduction) ฟังก์ชันประสงค์ที่หนึ่ง คือ ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ให้น้อยที่สุด (P_{loss}) ดังแสดงในสมการ (1)

$$f_1 = \min\left(P_{loss}\right) \tag{1}$$

เมื่อ f_1 คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่หนึ่ง และ P_{loss} คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้า โดยสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2)

$$\min\ P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} a_{ij}\left(P_i P_j - P_i Q_j\right) + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}\left(Q_i P_j + Q_i Q_j\right) \tag{2}$$

เมื่อ P_i และ P_j คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่โหนด i และ j. Q_i และ Q_j คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่โหนด i และ j. สุดท้าย a_{ij} และ b_{ij} คือ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับบัสตามลำดับ

2) การลดต้นทุนเชื้อเพลิง (Fuel cost reduction) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สองคือการลดต้นทุนเชื้อเพลิงให้น้อยที่สุด ซึ่งแสดงในสมการ (3)

$$f_2 = \min\left(C_f\right) \tag{3}$$

โดยที่ f_2 แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สองและ C_f แทนต้นทุนเชื้อเพลิงรวมของระบบไฟฟ้า ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (4)

$$\min \quad C_f = \sum_{i=i}^{N_{gen}} \left(a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i\right) \tag{4}$$

โดยที่ N_{gen} แทนจำนวนจุดที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า P_{gi} แทนกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบเพื่อรองรับโหลดและ a_i, b_i *and* c_i แทนข้อจำกัดด้านต้นทุนเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าของโครงข่ายตามลำดับ

3) ดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สาม คือการลดดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง (Line Voltage Stability Index Reduction) ซึ่งแสดงในสมการที่ (5)

$$f_3 = \min\left(LVIS\right) \tag{4}$$

โดยที่ f_3 แทนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สาม และ $LVIS$ แทนดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง (Line Voltage Stability Index) ดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง สามารถวิเคราะห์ได้จากสมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$\min \quad LVIS = \sum_{i=1}^{N_{line}} LVSI_i \tag{5}$$

$$LVSI = \frac{4RP_r}{\left(V_s \cos\left(\theta - \delta\right)\right)^2} \tag{6}$$

โดยที่ N_{line} แทนจำนวนสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างบัส R แทนความต้านทานของสายส่ง P_r แทนกำลังไฟฟ้าจริงที่บัสรับ V_s แทนแรงดันไฟฟ้าที่บัสส่ง θ แทนมุมอิมพีแดนซ์ของสายส่ง และ δ แทนมุมความต่างเฟสของแรงดันไฟฟ้าระหว่างบัสเริ่มต้นและบัสปลายทาง

2.2 ข้อจำกัดของระบบไฟฟ้าที่เสนอ

ข้อจำกัดของการศึกษาแบ่งออกเป็นสี่กลุ่ม โดยสรุปได้ดังนี้

1) สมการสมดุลกำลังไฟฟ้า สมการสมดุลกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าถูกกำหนดโดยใช้สมการที่ (7) ในขณะที่ความต้องการกำลังไฟฟ้าแสดงโดยสมการที่ (8)

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} + \sum_{i=1}^{N_G} P_{DRI} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Di}^0 + P_{loss} \tag{7}$$

$$P_{demand} = sum\left(P_{Gi}\right) - P_{loss} \tag{8}$$

โดยที่ P_{Gi} แทนกำลังไฟฟ้าจริงของระบบกริด P_{DRI} แทนความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดในระบบ P_{Di}^0 แทนความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมดในการวิเคราะห์ครั้งแรก และ N_G แทนหมายเลขบัสในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ

2) ข้อจำกัดจำนวนบัสสำหรับ PV, HP และ BESS จำนวนบัสสูงสุดสำหรับหน่วย PV, Hydro และ BESS สามารถจัดการได้ผ่านข้อจำกัดตำแหน่งที่กำหนดโดยสมการที่ (9) ถึง (11)

$$2 \le Hydro_{location} \le n_{buses} \tag{9}$$

$$2 \le PV_{location} \le n_{buses} \tag{10}$$

$$2 \le BESS_{location} \le n_{buses} \tag{11}$$

3) ข้อจำกัดโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้า โปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าที่บัสต้องถูกกำหนดเพื่อให้เป็นไปตามขีดจำกัดความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าที่ระบุในข้อกำหนดระบบไฟฟ้ากำลัง (Grid Code) ตามสมการที่ (12) ถึง (14)

$$V_{\min}^{0.95p.u.} \le V_i \le V_{\max}^{1.05p.u.} \quad (12)$$

$$LVSI_{\max} \le LVSI_{\lim it} \quad (13)$$

$$LVSI_{\max} = \max(LVSI_i);\ i = 1,2,...,N_{line} \quad (14)$$

โดยที่ $LVSI_{\lim it}$ แทนขีดจำกัดของดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง ซึ่งตั้งไว้ที่ 0.9 ในการศึกษานี้ และ $LVSI_{\max}$ แทนค่าดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่งสูงสุดภายในระบบกริด ตามลำดับ

4) ข้อจำกัดการผลิตกำลังไฟฟ้า ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก PV, Hydro และ BESS ต้องถูกควบคุมให้อยู่ในขีดจำกัดขั้นต่ำและขั้นสูงสุดที่กำหนดโดยข้อกำหนดของระบบกริด ตามสมการที่ (15) ถึง (17)

$$P_{PV}^{\min} < P_{PV} < P_{PV}^{\max} \quad (15)$$

$$P_{Hydro}^{\min} < P_{Hydro} < P_{Hydro}^{\max} \quad (16)$$

$$P_{BESS}^{\min} < P_{BESS} < P_{BESS}^{\max} \quad (17)$$

2.3 การกำหนดฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์

ตำแหน่งที่เหมาะสมและขนาดของหน่วย PV, Hydro และ BESS ภายในระบบจำหน่ายสามารถกำหนดได้ ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ถูกกำหนดไว้ในสมการที่ (18)

$$\min\ f(x) = f_1 + f_2 + f_4 \quad (18)$$

$$g(x,u) = 0 \quad (19)$$

$$h(x,u) \le 0 \quad (20)$$

3. ตัวควบคุมระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ (BESS)

ตัวควบคุม BESS ที่ผสานรวมกับ PV และ Hydro ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า แสดงประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมความถี่ของระบบ การจัดการคำขอการชาร์จ และการบริหารจัดการแบตเตอรี่ผ่านวิธีการสมดุลสถานะประจุ (State of Charge, SOC) ดังนั้น การใช้ลักษณะการทำงานคุณสมบัติของดรูป (Droop Characteristics) กำลังไฟฟ้าของ BESS จึงถูกควบคุมเพื่อตอบสนองต่อการเบี่ยงเบนของความถี่

$$P_{BESS} = \begin{cases} K_{BESS}\Delta f & if\ \ |K_{BESS}|\Delta f \le P_{\max} \\ P_{\max} & if\ \ (P_{\max} < K_{BESS}\Delta f) \end{cases} \quad (21)$$

$$K_{BESS} = K_{\max}\left(1 - \left(\frac{SOC - SOC_{low(high)}}{SOC_{\max(\min)} - SOC_{low(high)}}\right)\right) \quad (22)$$

4. เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

การศึกษานี้ใช้ PSO เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์เฉพาะ ค่าที่เหมาะสมที่สุดได้มาจากการค้นหาค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคแต่ละตัว (Individual Particle's Best: *pbest*)

$$P_i = [P_{Gi},...,P_{NG}\,|V_{Gi}|,...,|V_{NG}|,P_{pi},...P_{NP},\ |V_{pi}|,...,|V_{NP}|,DR_1,...,DR_{NB}] \quad (28)$$

ความเร็วใหม่ของอนุภาคถูกคำนวณโดยสมการที่ (29)

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(pbest_i^t - p_i^t) + c_2r_2(gbest_i^t - p_i^t) \quad (29)$$

ตำแหน่งใหม่ของอนุภาคสามารถคำนวณได้ตามที่แสดงในสมการที่ (30)

$$P_i^{t+1} = P_i^t + v_i^{t+1} \quad (30)$$

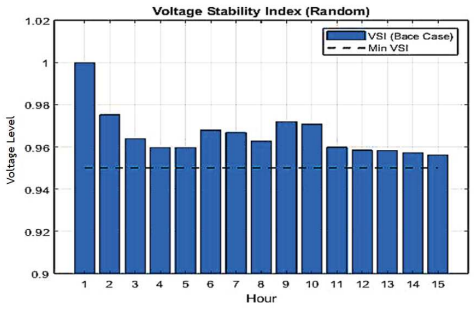
5. ผลการจำลอง

เอกสารนี้เสนอผลการค้นพบสำคัญสามประการ ได้แก่ การติดตั้ง PV-Hydro-BESS และการควบคุมพารามิเตอร์ PI ของ BESS แบบสุ่ม , ผลลัพธ์จากตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของการควบคุม PV-Hydro-ESS และพารามิเตอร์ PI ของ BESS โดยใช้ PSO, และผลลัพธ์จากการลัดวงจรกะทันหันของสายส่งในกรณีที่ 2 โดยกำหนดขนาดประชากร 30 ตัว และจำนวนการวนซ้ำ 100 ครั้งพร้อมวิเคราะห์การไหลของพลังงานด้วยเทคนิคการกวาดไปข้างหน้า-ข้างหลัง ก่อนใช้ PSO หาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของ PV, Hydro และ BESS.

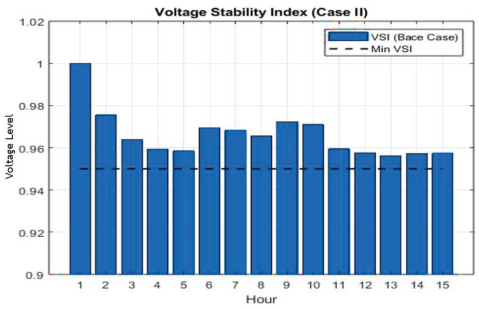
ตารางที่ 1 ตำแหน่งและขนาดของการติดตั้งในสองกรณีเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้งสามในบทความนี้ พบว่ากรณีที่ 2 ซึ่งใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุด ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่ากรณีที่ 1 ที่ ผลลัพธ์จากการติดตั้งแบบสุ่มแสดงให้เห็นว่าไม่สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบ IEEE 15 บัสได้ ดังนั้น ผลลัพธ์เหล่านี้ไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของบทความนี้ ดังรูปที่ 5 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (Base Case) การติดตั้งแบบสุ่มของ PV, Hydro, และ BESS ในตำแหน่งที่ 13, 12, และ 5 ตามลำดับ ด้วยขนาด 90.86, 62.41, และ 65 kW ตามลำดับ ดังรูปที่ 6

ตารางที่ 1 ผลการจำลองตำแหน่งและขนาด

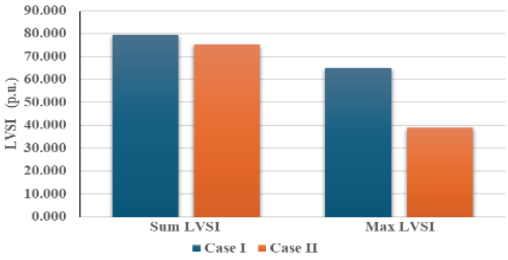
Unit	Case 1			Case 2		
	PV	Hydro	BESS	PV	Hydro	BESS
	1	1	1	1	1	1
Location	13	5	12	8	12	15
Size (kW)	65	90.86	62.41	65	100	80
P_{loss} (kW)	44.237			42.761		
C_f ($/h)	3832.1			3825.7		
max LVSI	65.012			38.89		



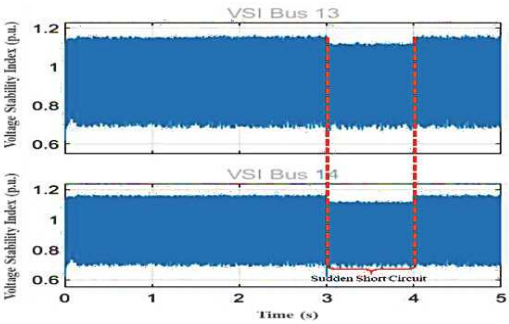
รูปที่ 5 ระดับแรงดันไฟฟ้าของกรณีที่ 1 ซึ่งเป็นการติดตั้งแบบสุ่ม



รูปที่ 6 ระดับแรงดันไฟฟ้าของกรณีที่ 2 หลังจากการกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบดัชนีความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในสายส่ง



รูปที่ 8 ระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่ 3

สามารถลดการสูญเสียพลังงานในระบบกริดได้ 44.23 kW และลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ 3,832.1 USD/hr โดยตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ PV-HP-BESS ช่วยรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในช่วงโหลดเพิ่มขึ้น ตำแหน่งสุ่มที่ 13, 12 และ 5 ขนาด 90.86 kW, 62.41 kW และ 65 kW ลดการสูญเสียได้ 42.761 kW และลดต้นทุนเชื้อเพลิงได้ 3,825.7 USD/hr ผลการเปรียบเทียบด้วย LVSI (รูปที่ 7) แสดงว่ากรณีที่ 2 มีค่าต่ำกว่ากรณีที่ 1 ยืนยันโดยการทดสอบฮาร์ดแวร์อินเดอะลูปว่าตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ PV-Hydro-ESS รักษาแรงดันที่บัส 13 และ 14 ซึ่งเป็นบัสที่อ่อนที่สุดในกรณีไฟฟ้าลัดวงจร จึงสรุปได้ว่าการปรับตำแหน่ง ขนาด PV-Hydro-BESS และการควบคุม BESS ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพระบบ IEEE 15 บัสได้ตามเป้าหมาย (รูปที่ 8)

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอระบบไฮบริด PV-Hydro-BESS ที่ใช้ PSO ช่วยลดการสูญเสียพลังงานลง 3.3% จาก 44.237 kW เป็น 42.761 kW และลดต้นทุนเชื้อเพลิงลง 0.17% จาก 3,832.1 USD/hr เป็น 3,825.7 USD/hr เมื่อเทียบกับระบบเดิม นอกจากนี้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า (LVSI) ยังดีขึ้น 40.2% จาก 65.012 p.u. เหลือ 38.89 p.u. วิธีการกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมช่วยปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า พร้อมทั้งชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของระบบซื้อขายพลังงานแบบกระจายศูนย์และระบบกักเก็บพลังงานในการพัฒนาระบบไฟฟ้าอัจฉริยะในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Badamshina, A. Klokov and E. Loktionov, "Case Study of Microgeneration for Power Supply in Remote Island Communities," 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479866.

[2] C. Pengtem, S. Deeum, N. Janjamraj, S. Romphochai, P. Bhumkittipich and K. Bhumkittipich, "Optimal Placement and Sizing of Distribution Generator in Active Distribution System with Solar Farm using Grey Wolf Optimization Technique," 2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC57400.2023.10561962.

[3] F. Mthethwa, C. Gomes and D. Dorrell, "Development of Optimal Algorithm to Interconnect Multiple Microgrids in an Agricultural-based Remote Community," 2021 IEEE AFRICAN, Arusha, Tanzania, United Republic of, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/AFRICON51333.2021.9571000.

การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม

Improvement of Voltage Stability with Optimal Capacitor Banks Installation using Genetic Algorithm

Sokban Sek[1] อสิวุฒิ บุญเจียม[1] ชัยมงคล เพ็งเต็ม[1] ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ[1] ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย[1] พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล[1]
พิมพ์นภัส ภูมิกิตติพิชญ์[2] ณัฏฐกิตติ์ เอี่ยมสมบูรณ์[2] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
[2]สาขาสัมคมศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
*Corresponding author e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยการติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 2ตัว 3ตัว 4ตัว กับระบบมาตรฐาน IEEE 15 บัส โดยใช้เทคนิคอัลกอริทึมพันธุกรรม เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟและปรับปรุงระบบโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าให้มีเสถียรภาพในพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ที่มีความเสี่ยมต่อการขาดเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเทียบกับก่อนปรับปรุงสามารถปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้ดีขึ้น ลดอัตราการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามาตราฐาน IEEE 15 บัสได้ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 2 ตัวลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ 9.53% ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 3 ตัวลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ 16.41% ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 4 ตัวลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้ 12.18% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ระบบกำลังไฟฟ้า, อัลกอริทึมพันธุกรรม, คาปาซิเตอร์แบงค์

Abstract

This article presents an improvement in voltage stability by installing 2, 3, and 4 capacitor banks in the IEEE 15-bus standard system using a genetic algorithm technique. The aim is to reduce active power losses and enhance voltage profile stability, particularly in remote areas or regions susceptible to power system instability. The experimental results demonstrate that, compared to the system before the improvement, voltage stability can be significantly enhanced. Additionally, power losses in the IEEE 15-bus distribution system are effectively reduced: with 2 capacitor banks, losses are reduced by 9.53%; with 3 banks, by 16.41%; and with 4 banks, by 12.18%, respectively.

Keywords: power system, genetic algorithm, capacitor bank

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตัวคาปาซิเตอร์แบงค์จะทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟ ตัวคาปาซิเตอร์แบงค์จะต้องติดตั้งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยเหตุผลหลายประการได้แก่ การลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า การปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าของบัส การกำจัดความจุของสายส่ง และการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า กระบวนการติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ต้องพิจารณาตำแหน่ง และขนาดของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ ให้เหมาะสม สำหรับตัวคาปาซิเตอร์แบงค์จะช่วยรักษาโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้า และลดกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟในระบบกำลังไฟฟ้า [1]

มีเทคนิคมากมายที่เสนอขึ้นโดยอิงจากวิธีการทางคณิตศาสตร์ทั่วไปในเอกสารทางวิชาการเพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟ และปรับปรุงเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยการหาตำแหน่งและขนาดที่ดีที่สุดของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ ในเอกสารทางวิชาการจำนวนมากที่ได้รับในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมาเกี่ยวกับอัลกอริทึมการปรับปรุงประสิทธิภาพเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสำหรับระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างเช่น แนะนำให้ใช้วิธีการตามอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพกลุ่มอนุภาค (PSO) อัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพวาฬ (WOA) การเพิ่มประสิทธิภาพฝูงอนุภาคแบบเร่ง (APSO) การเพิ่มประสิทธิภาพหมาป่าสีเทาดัดแปลง (MGWO) อัลกอริทึมพันธุกรรม (GA) เพื่อแก้ไขปัญหาการวางตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ นำเสนอตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ในระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง[1]

ส่วนที่เหลือของบทความนี้จัดเป็นดังนี้ในส่วนถัดไปการกำหนดปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปัจจัยความไวในการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและการจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกกำหนดไว้ในส่วนนี้ ขั้นตอนของวิธีการอธิบายไว้ในส่วนที่ 3 และผลลัพธ์ที่ได้รับจะนำเสนอในส่วนที่ 4 ในที่สุดส่วนที่ 5 สรุปเอกสาร

2.การกำหนดปัญหา

2.1 ข้อจำกัดของกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟ

กำลังรีแอ็กทีฟที่ฉีดเข้าที่บัส ในแต่ละบัสต้องอยู่ในช่วงจำกัดที่อนุญาตให้ที่แสดงไว้ดั้งต่อไปนี้ [2]

$$Q_{c(i)}^{\min} \le Q_{c(i)} \le Q_{c(i)}^{\max} \quad (1)$$

เมื่อ $Q_{c(i)}^{\min}$ คือเป็นขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้ารีเอ็กทีฟที่ต่ำกว่าบัสชดเชย i, $Q_{c(i)}$ คือคือปริมาณกำลังไฟฟ้ารีเอ็กของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ที่ติดตั้งที่บัส i และ $Q_{c(i)}^{\max}$ เป็นขีดจำกัดของกำลังไฟฟ้ารีเอ็กทีฟสูงของบัสชดเชย i และ $Q_{c(i)}^{\min}$ คือถูกจำกัดไว้ที่ขนาด 150kVar $Q_{c(i)}^{\max}$ คือถูกจำกัดไว้ที่ขนาดสูงสุดที่1200kVar

2.2 ข้อจำกัดค่าชดเชยรวมสูงสุด

การชดเชยสูงสุด $Q_c(i)$ โดยใช้ตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ถูกจำกัดไว้ที่ความต้องการของกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟโหลดทั้งหมด $Q_D(i)$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_c(i) \le \sum_{j=1}^{l} Q_D(i) \tag{2}$$

โดยที่ $Q_c(i)$ คือปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ที่ติดตั้งที่บัส i และ $Q_D(i)$ คือความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟของโหลดที่บัส i

2.3 ข้อจำกัดของแรงดันไฟฟ้า

ในระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้า $V_i^{\min} = 0.95$ pu และ $V_i^{\max} = 1.05$ pu ในกรณีที่ $V_i^{\min}$ คือขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า $V_i^{\max}$ คือขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าที่สูง

$$V_i^{mim} \le V_i \le V_i^{\max} \tag{3}$$

2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการจัดวางตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ที่เหมาะสมที่สุดคือการลดการสูญเสียพลังงานทั้งหมดของระบบที่กำหนดโดยสมการ :

$$\min \ P_{loss} = \sum_{(i,j)\in liine} \frac{\left(P_{i,j}^2 + (Q_{i,j} - Q_{c,j})^2\right) R_{i,j}}{V_i^2} \tag{4}$$

Subject to
$$Q_{gen,i} - Q_{load,i} - Q_{c,j} = \sum Q_{i,j} \tag{5}$$

$$Q_{Cj}^{min} \le Q_{Cj} \le Q_{Cj}^{\max} \tag{6}$$

$\min$ Cost *(\$/Year)* ค่าใช้จ่ายของการสูญเสียพลังงานและตำแหน่งคาปาซิเตอร์แบงค์ดังต่อไปนี้:

$$\min \text{Cost} = K_e \sum_{i=1}^{br} P_{loss(i)} + \sum_{j}^{j} (K_j^c \times Q_j^c) \tag{7}$$

Subject to
$$Q_j^c = \sum_{j=1}^{c} Q_j X_j \tag{8}$$

$$Q_{demand} - Q_{cj} \ge Q_{\min} \tag{9}$$

$$Q_{demand} - Q_{cj} \le Q_{\max} \tag{10}$$

$$Q_{Cj}^{min} \le Q_{Cj} \le Q_{Cj}^{\max} \tag{11}$$

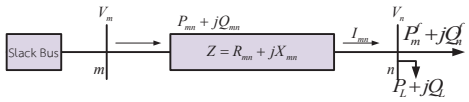
$$Q_C^{Total} \le Q_L^{Total} \tag{12}$$

เมื่อ X_j คือตัวแปรการตัดสินใจ (1 = ติดตั้ง, 0 = ไม่ติดตั้ง), K_e คือต้นทุนต่อปีที่เทียบเท่าต่อหน่วยของการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟเป็น (168\$/kW-ปี) $P_{loss(i)}$ คือการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟทั้งหมด j คือจำนวนที่เลือกติดตั้งของบัสสำหรับติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ K_j^c คือราคาของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์เป็น (\$/kVar) ที่ขึ้นอยู่กับประเภทขนาดตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ Q_j^c และการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) สามารถคำนวณได้ตามสมการนี้

$$Payback\ Period = \frac{\sum_{j}^{j} (K_j^c \times Q_j^c)}{\text{Annual savings}} \tag{13}$$

เมื่อ $Annual\ Savings = Cost\ Before - Cost\ After$ (14)

2.5 การจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 1 แบบจำลองสาขาระบบการกระจายระหว่างสองโหนด m และ n

พิจารณาเส้นกระจายระหว่างโหนดสอง โหนดm และ n ที่มีความต้านทานและรีแอกแตนซ์คือ R_{mn} และ jX_{mn} ตามลำดับ และยังมีโหลด $P_L + jQ_L$ ที่แสดงในรูปที่ 1 การไหลของกำลังไฟฟ้าจริงที่ใช้งานและกำลังไฟฟ้ารีแอ็กทีฟระหว่างโหนดทั้งสองคำนวณโดยสมการที่แสดงต่อไปนี้

$$P_{mn} = P_m^f + P_L + R_{mn} \frac{P_{mn}^2 + Q_{mn}^2}{V_m^2} \tag{15}$$

$$Q_{mn} = Q_m^f + Q_L + X_{mn} \frac{P_{mn}^2 + Q_{mn}^2}{V_m^2} \tag{16}$$

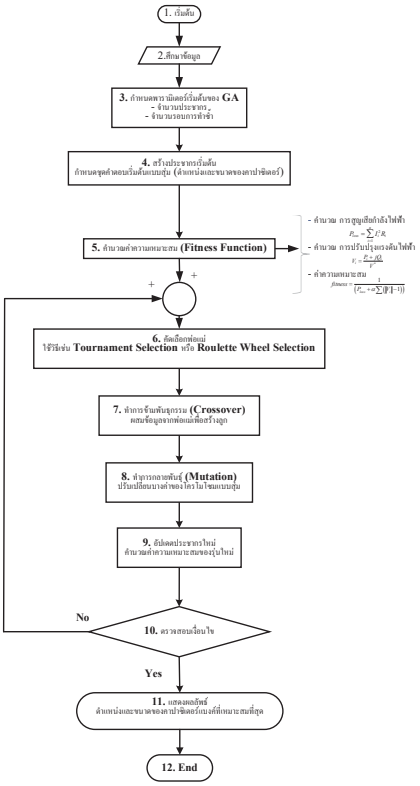
$$V_n^2 = V_P^2 - 2\left(P_{mn}R_{mn} + Q_{mn}X_{mn}\right) + \left(R_{mn}^2 + X_{mn}^2\right) \frac{(P_{mn}^2 + Q_{mn}^2)}{V_P^2} \tag{17}$$

3.วิธีการ

3.1 เทคนิคอัลกอริทึมพันธุกรรม

เทคนิคอัลกอริทึมพันธุกรรมเป็นอัลกอริธึมการติดตามตามกระบวนการวิวัฒนาการทางชีวภาพ GA ใช้การแสดงโครโมโซมโดยที่โครโมโซมแสดงถึงยีนหรือตัวแปรการตัดสินใจ ความยาวของโครโมโซมมีจำกัดขึ้นอยู่กับตัวแปรการตัดสินใจจำนวนมาก และวิธีการเข้ารหัสของยีนโครโมโซม และค่าวัตถุประสงค์ที่ได้แสดงถึงบุคคล บุคคลจะปฏิบัติตามกระบวนการวิวัฒนาการเพื่อผลิตบุคคลที่ดีที่สุด บทความนี้ ยีนหรือตัวแปรการตัดสินใจจะถูกเข้ารหัสด้วยจำนวนเต็ม และโครโมโซมเป็นเวกเตอร์จำนวนเต็ม และความยาวของโครโมโซมเท่ากับ 2 เท่าของจำนวนตำแหน่งตัวเก็บประจุที่มีศักยภาพ จำนวนโครโมโซมประกอบด้วยสององค์ประกอบที่ต่อเนื่องกันบนโครโมโซมแสดงถึงตำแหน่งของตำแหน่งตัวเก็บประจุ และขนาดของตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ที่มีศักยภาพ

3.2 การออกแบบขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสม



รูปที่ 2 ขั้นตอนการหาตำแหน่งและขนาดติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ อัลกอริทึมพันธุกรรม [3]

4.ผลการจำลอง

4.1 กรณีศึกษา การติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 2ตัว

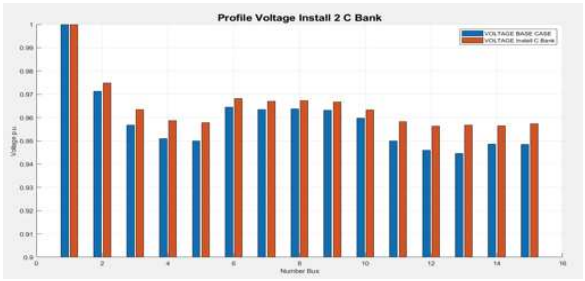
การสูญเสียของกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด 60.098 kW ที่สูญเสียไปดีเป็นราคา 10096.46$ และการลงทุนในการซื้อตัวคาปาซิเตอร์แบงค์เอามาติดตั้งเข้ากับระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้ากำลัง เพื่อปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้า ลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าจริง จากตารางที่4.1 คือขนาดและราคาของคาปาซิเตอร์แบงค์ การหาตำแหน่ง และขนาดติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 2 ตัวที่ใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุ์กรรม เพื่อหาตำแหน่งและขนาดคือได้ ตำแหน่งที่บัส 15 กับ 12 และขนาด 150 kVAr 2 ตัว ดังนั้นเราสามารถดูจากตาราง4.2 ต่อไปนี้ หลังจากทำการวิเคราะห์การติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ เห็นว่าเราซื้อคาปาซิเตอร์ 2ตัว ขนาด 300 kVAr มาทำการติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่ 15 และบัส 12 ที่ราคา 1500$ ได้ลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟที่เกิดขึ้นบนระบบส่งจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจาก 60.098 kW เหลือ 45.44 kW และการใช้จ่ายในระยะเวลาหนึ่งปีจาก 10096.46$ มาเหลือ 9133.92$ ถ้าคิดเป็นร้อยละ 9.53 ในหนึ่งปีและโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าที่ตกต่ำถูกปรับปรุงจาก0.94 p.u มาเป็น0.95 p.u ถ้าเทียบกับโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้ากรณีฐาน ดูได้จากรูปที่ 3

ตารางที่ 1 ขนาดตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ที่มีจำหน่ายและต้นทุนต่อปี [4]

ขนาด (kVAr)	150	300	450	600	900	1200
Cost ($)	750	975	1140	1320	1650	2040

ตารางที่4.2 วิเคราะห์ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 2ตัว

ก่อนติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
Bus No.	(kVAr)	ราคา Cbank	P_{Loss}	ลดต้นทุน
-	-	-	60.09	10096.46
หลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
15 12	150 150	750 750	45.44	9133.92
Annual Saving				962.54
Cost saving percent (%)				9.53
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)				1.56 ปี ≈18.7 เดือน



รูปที่ 3 โปรไฟล์ของแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 2 ตัว เทียบกับโปรไฟล์แรงดันกรณีฐาน

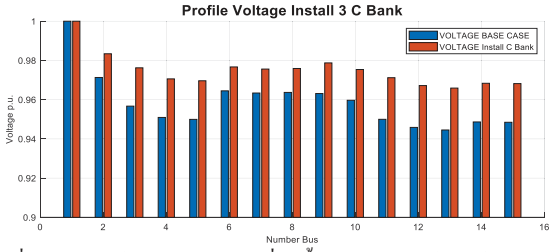
4.2 กรณีศึกษา การติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 3ตัว

การหาตำแหน่ง และขนาดติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 3 ตัวที่ใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุ์กรรม เพื่อหาตำแหน่งและขนาดคือได้ ตำแหน่งที่บัส 3 11 กับ 9 และขนาด 600kVAr 150kVAr กับ 300kVAr ดังนั้นเราสามารถดูจากตาราง4.3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 2 วิเคราะห์ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 3ตัว

ก่อนติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
Bus No.	(kVAr)	ราคา Cbank	P_{Loss}	ลดต้นทุน
-	-	-	60.09	10096.46
หลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
3 11 9	600 150 300	1320 975 750	32.11	8439.48
Annual Saving				1,656.98
Cost saving percent (%)				16.41
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)				1.84 ปี≈22.08 เดือน

หลังจากทำการวิเคราะห์การติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ เห็นว่าซื้อคาปาซิเตอร์ 3ตัว ขนาด 600kVAr 150kVAr และ 300kVAr มาทำการติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่ 3 11 และบัส 9 ที่ราคารวม 3045$ ได้ลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าจริงที่เกิดขึ้นบนระบบส่งจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจาก 60.098 kW เหลือ 32.11kW และการใช้จ่ายในระยะเวลาหนึ่งปีจาก 10096.46$ มาเหลือ 8439.48$ ถ้าคิดเป็นร้อยละ 16.41 ในหนึ่งปีและโปรไฟล์ของแรงดันไฟฟ้าถูกปรับปรุงจาก0.94 p.u มาเป็น0.96 p.u ถ้าเทียบกับโปรไฟล์ของแรงดันไฟฟ้ากรณีฐาน ดูได้จากรูปที่4.2



รูปที่4.2 โปรไฟล์ของแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 3 ตัว เทียบกับโปรไฟล์แรงดันกรณีฐาน

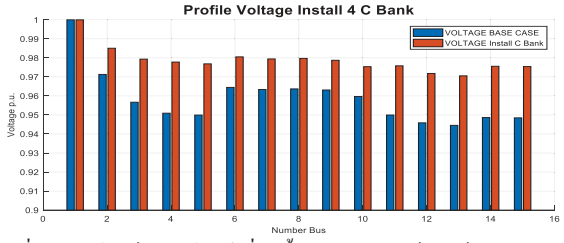
4.3 กรณีศึกษา การติดตั้งคาปาซิเตอร์แบงค์ 4ตัว

การหาตำแหน่ง และขนาดติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 4 ตัวที่ใช้อัลกอริทึมเชิงพันธุ์กรรม เพื่อหาตำแหน่งและขนาดคือได้ ตำแหน่งที่บัส 6 9 11 กับ 4 และขนาด 150kVAr 150kVAr 300kVAr กับ 600kVAr ดังนั้นสามารถดูจากตาราง4.4 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ก่อนติดตั้ง และหลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 4ตัว

ก่อนติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
Bus No.	(kVAr)	ราคา Cbank	P_{Loss}	ลดต้นทุน
-	-	-	60.09	10096.46
หลังติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์				
6 9 11 4	150 150 300 600	750 750 975 1320	30.19	8866.92
Annual Saving				1,229.54
Cost saving percent (%)				12.18(%)
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)				3.086 ปี≈ 37.032เดือน

หลังจากทำการวิเคราะห์การติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ เห็นว่าซื้อคาปาซิเตอร์ 4 ตัว ขนาด 150kVAr 150kVAr 300kVAr และ 600kVAr มาทำการติดตั้งที่ตำแหน่งบัสที่ 6 9 11 และบัส 4 ที่ราคารวม 3795$ ได้ลดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟที่เกิดขึ้นบนระบบส่งจำหน่ายกำลังไฟฟ้าจาก 60.098 kW เหลือ 30.19kW และลดต้นทุนในระยะเวลาหนึ่งปีจาก 10096.46$ มาเหลือ 8866.92$ คือได้การประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปี 1,229.54$ ถ้าคิดเป็นร้อยละ 12.18 ในหนึ่งปี และโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าถูกปรับปรุงจาก0.94 p.u มาเป็น0.97 p.u ถ้าเทียบกับโปรไฟล์ของแรงดันไฟฟ้ากรณีฐาน ดูได้จากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบงค์ 4 ตัวกับโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้ากรณีฐาน

5.สรุป

ผลลัพธ์ที่ทำกาติดตั้งตัวคาปาวิเตอร์แบงค์ 2ตัว 3ตัว 4ตัวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลสามารถทำได้โดยใช้การเข้ารหัสจำนวนเต็มอัลกอริทึมพันธุกรรมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้า ลดสูญเสียกำลังไฟฟ้า จึงเสนอให้ใช้วิธีนี้เพื่อติดตั้งตัวคาปาซิเตอร์แบ่งค์ที่เหมาะสม สามารถลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าแอ็กทีฟที่ใช้งาน และต้นทุนประจำปีของระบบจำหน่ายและเป็นผลให้มันปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าที่บัส ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายรายปีได้มากขึ้นและดัชนีความเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้าน้อยลงเมื่อเทียบกับอัลกอริทึมเชิงพันธุ์กรรม

เอกสารอ้างอิง

[1] S. H. Sulaiman et al., "Optimal Capacitor Sizing and Siting in a Radial Distribution System Using Particle Swam Optimization Algorithm," 2024 IEEE 5th International Conference on Electro-Computing Technologies for Humanity (NIGERCON), Ado Ekiti, Nigeria,2024,pp.1-5,doi: 10.1109/NIGERCON62786.2024.10927092.

[2] S. Lohia, O. P. Mahela and S. R. Ola, "Optimal capacitor placement in distribution system using genetic algorithm," 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077355.

[3] N. A. Basyarach, O. Penangsang and A. Soeprijanto, "Optimal capacitor placement and sizing in radial distribution system using accelerated particle swarm optimization," 2017 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya,Indonesia,2017,pp.93-97,doi: 10.1109/ISITIA.2017.8124061.

[4] I. K. Suryawan and I. Dwijaya Saputra, "Optimization of Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Integer Encoding Genetic Algorithm," iCAST, Indonesia, 2020, pp. 544-548.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การตรวจจับความผิดพร่องของแบริ่งและขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบอัตโนมัติ

Experimental Set for Automation Fault Detection of bearing and Stator Winding in Three Phase Induction Motor

พิทักษ์ บุญนุ่น[1*] คนโท ปานทองคำ[1] ตุลยวัต นวลมุล[1] และอนุวรรตน์ ศิริเพ็ชร[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: pituk.b@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาและออกแบบเพื่อสร้างชุดทดลองการตรวจจับความผิดพร่องของแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสอัตโนมัติ ซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อวินิจฉัยความผิดพร่องที่เกิดขึ้นกับขดลวดสเตเตอร์และแบริ่งได้ ชุดทดลองการตรวจจับความผิดพร่องของแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบอัตโนมัตินี้ได้ถูกออกแบบโดยใช้ชุด Data Acquisition (DAQ) ในการรับส่งสัญญาณกระแสเข้ามาให้กับโปรแกรมวิเคราะห์ขั้นสูงในส่วนที่เป็นการวิเคราะห์สัญญาณกระแสและใช้วิธีการฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) ผลการทดลองปรากฏว่าการแจ้งเตือนโดยใช้สัญญาณกระแสนำมาวิเคราะห์ความถี่สามารถระบุความผิดพร่องของขดลวดและแบริ่ง ได้อย่างละ 2 อาการ คือความผิดพร่องของขดลวดสเตเตอร์กรณีการลัดวงจรระหว่างรอบและกรณีการลัดวงจรระหว่างเฟส ส่วนความผิดพร่องของแบริ่งได้สองกรณีเช่นกันคือ กรณีลูกปืนชำรุดและกรณีรางในชำรุด โดยทั้งหมดสามารถแจ้งเตือนความผิดพร่องที่เกิดขึ้นได้ภายในเวลาไม่เกิน 3 วินาที

คำสำคัญ: การลัดวงจร, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, สเปคตรัม, แบริ่ง, ขดลวดสเตอร์

Abstract

This article is a study and design of an automatic three-phase induction bearing and stator coil fault detection experimental set, which can be used to diagnose the faults of the stator coil and bearing. The automatic three- phase induction motor bearing and stator coil fault detection experimental set is designed using a Data Acquisition (DAQ) set to receive the current signal into the advanced analysis program in the current signal analysis section and uses the Fast Fourier Transform (FFT) method. The experimental results show that the alarm using the current signal to analyze the frequency can identify two faults of the coil and the bearing, which are the faults of the stator coil in the case of short- circuit between turns and the case of short- circuit between phases. As for the faults of the bearing, there are two cases as well, which are the case of damaged bearings and the case of damaged inner rails. All of them can warn of the faults within 3 seconds.

Keywords: Short circuit, Induction motor, Spectrum, Bearing, Stator coil

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส (3 phase induction motor) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีความสำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในงานขนาดเล็กไปจนถึงงานขนาดใหญ่ในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ด้วยราคาที่ไม่แพงมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน มีความทนทานและง่ายต่อการดูแลบำรุงรักษา ซึ่งตอบโจทย์งานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ได้เป็นอย่างดี แต่มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสก็มีอายุการใช้งานเหมือนเครื่องจักรอื่น ๆ ซึ่งหากขาดการดูแลที่ดีหรือไม่ทำการตรวจสอบสภาพการใช้งานของมอเตอร์เป็นประจำอาจทำให้มอเตอร์ดังกล่าวเกิดการเสียหายหรือเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีประสิทธิภาพในการใช้งานลดน้อยลง และหากเกิดความผิดปกติจนถึงขั้นลุกลามจนมอเตอร์เสียหายไม่สามารถใช้การได้ก็จะส่งผลกระทบกับภาคอุตสาหกรรมที่ใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นหลัก ทำให้การดำเนินงานในสายการผลิตหยุดชะงัก เกิดความสูญเสียในด้านต่าง ๆ ทั้งเวลา ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง การวินิจฉัยและการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสโดยเร็วที่สุดในช่วงแรกของความผิดปกติจะช่วยป้องกันปัญหาที่อาจจะลุกลามจนทำให้มอเตอร์เสียหายและแก้ไขความผิดปกติเหล่านี้ได้ทันท่วงที

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการตรวจจับการเกิดความผิดพร่องในเครื่องจักรกลไฟฟ้าประเภทมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เช่น งานวิจัย [1] นำเสนอการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าแบบแอคทีฟและรีแอคทีฟแบบทันทีทันใดสำหรับการวินิจฉัยความผิดพลาดของสเตเตอร์ในมอเตอร์

เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกสามเฟสที่ใช้งานได้ทั้งแบบเชื่อมต่อโดยตรงกับไฟหลักหรือแบบป้อนจากอินเวอร์เตอร์ งานวิจัย [2] นำเสนอแอปพลิเคชั่นมือถือเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีการพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยซ์ ซึ่งสามารถแปลงโทรศัพท์มือถือที่มีเครื่องวัดความเร่งในตัวให้กลายเป็นเครื่องมือวินิจฉัยความผิดพลาดของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (SCIM) ได้เพื่อตรวจจับความผิดพลาด จำเป็นต้องเชื่อมต่อโทรศัพท์มือถือเข้ากับมอเตอร์ และแอปพลิเคชันจะบันทึกสัญญาณการสั่นสะเทือนของมอเตอร์โดยใช้เครื่องวัดความเร่งในตัว หลังจากบันทึกแล้ว แอปพลิเคชันจะตรวจจับความผิดพลาดโดยระบุความถี่ของความผิดพลาดในสเปกตรัมการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นยังสามารถตรวจจับความผิดพลาดของมอเตอร์จากไฟล์ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้ได้อีกด้วย งานวิจัยที่ [3] นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์สำหรับ squirrel cage induction motors (SCIMs) ซึ่งสามารถแสดงความผิดพลาดของ Stator winding inter-turn (SWI) และ broken rotor bar (BRB) ที่เกิดขึ้นพร้อมกันหรือแยกกันโดยมีความรุนแรงที่แตกต่างกันได้

บทความที่นำเสนอนี้เป็นการสร้างชุดทดลองในการตรวจจับความผิดพร่องของแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสแบบอัตโนมัติที่ช่วยเพิ่มความสะดวกในการตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในระยะเริ่มแรกของความผิดปกติ อันเนื่องมาจากแบริ่งและการลัดวงจรของขดลวดสเตเตอร์ ก่อนที่ความผิดปกติจะลุกลามจนทำให้มอเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพลดเวลาของการวินิจฉัยอาการเสียของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องและยังช่วงในการป้องกันมอเตอร์ได้อีกทางหนึ่ง

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเบื้องต้น

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลนี้พลังงานไฟฟ้าไม่ได้เข้าสู่โรเตอร์โดยตรง แต่ได้จากการเหนี่ยวนำ (Induction) จึงนิยมเรียกมอเตอร์ไฟฟ้ากระสลับแบบนี้ว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ซึ่งตามหลักการคือเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสให้กับขดลวดสเตอร์เตอร์จะเกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นที่สเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส (N_s) สนามแม่เหล็กหมุนนี้จะเคลื่อนที่ตัดขดลวดที่โรเตอร์ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำบนโรเตอร์ตามสมการที่ 1

$$N_s = \frac{120f}{P} \tag{1}$$

เมื่อ N_s คือความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุน มีหน่วยเป็น RPM., f คือ ความถี่ของแหล่งจ่ายมีหน่วยเป็น Hz และ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก (*Pole*)

2.2 ความผิดพร่องในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

บทความนี้จะนำเสนอความผิดพร่องหลัก ๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยครั้งดังนี้คือ

1.ความผิดพร่องของแบริ่ง ซึ่งแบริ่งเป็นอุปกรณ์ลดแรงเสียดทานที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ กันอย่างแพร่หลาย และถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและส่งผลโดยตรงกับการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องจักร การที่แบริ่งเกิดความผิดปกติหรือชำรุดเสียหายนั้นนอกจากจะทำให้เครื่องจักรต้องเสียเวลาและมูลค่าในการผลิตที่เกิดจากการหยุดเพื่อซ่อมแล้ว ในอุปกรณ์บางอย่างที่เกี่ยวกับความปลอดภัยอาจทำให้เกิดอันตรายแก่บุคคลได้ ในสภาวะการทำงานปกติเมื่อภาระสมดุลและการวางแนวแกนเพลาที่ดีจะเกิดรอยสึกหรอขึ้นเล็กน้อยขอวงแหวนทั้งสองและลูกกลิ้งเม็ดกลม การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่นโดนน้ำกรด การติดตั้งที่ขาดความระมัดระวังมีคราบสกปรกขึ้นที่แบริ่งหรือจารบี หรืออื่น ๆ เช่น ความร้อน การสั่นสะเทือน การกระแทก กระแสไฟฟ้าและแรงเฉือน สิ่งเหล่านี้อาจนำไปสู่ความเสียหายของแบริ่งได้ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความถี่ค่าหนึ่งที่ใช้ระบุความผิดปกติของแบริ่งที่ปะปนมากับสัญญาณกระแสสเตเตอร์ระตามสมการที่ 2

$$f_b = |f_1 \pm m f_{i,o}| \tag{2}$$

ซึ่ง f_b คือความถี่ของสัญญาณกระแสที่เกิดจากแบริ่งชำรุด, f_1 คือความถี่หลักของแหล่งจ่าย ($50\ Hz, 60\ Hz$), m คือ จำนวนจริง 1,2,3,4,5,.... และ $f_{i,o}$ คือความถี่สั่นสะเทือนที่เกิดจากรางนอกหรือรางในอย่างใดอย่างหนึ่งชำรุด โดยทั่วไปแบริ่งจะมีลูกปืน 6, 8 หรือ 12 ลูก โดยเราสามารถประมาณความถี่ที่ใช้ระบุความผิดพร่องจากชิ้นส่วนแบริ่งชำรุดได้โดย

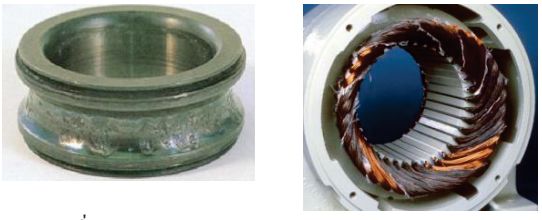
$$f_o = 0.4 N_b f_r \tag{3}$$

$$f_i = 0.6 N_b f_r \tag{4}$$

โดยที่ f_o คือความถี่รางนอกแบริ่งชำรุด, f_i คือความถี่รางในแบริ่งชำรุด, N_b คือ จำนวนลูกปืนในแบริ่ง และ f_r คือ ความถี่ในการหมุนของโรเตอร์

2.ความผิดพร่องของขอลวดสเตเตอร์ จากการทบทวนวรรณกรรมของงานวิจัยจะพบว่า ไม่น้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของความผิดพร่องของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสคือเกิดจากขดลวดในสเตเตอร์เบรกดาวน์เสื่อมสภาพของฉนวน ทำให้เกิดการลัดวงจรในรอบเดียวกัน (Stator turn fault, turn to turn, short turn fault) ซึ่งเป็นความผิดปกติเริ่มแรกของความผิดพร่องของขดลวดสเตเตอร์ เมื่อเกิดการลัดวงจรในมอเตอร์จะมีปริมาณกระแสไหลมากเข้าสู่ขดลวดในเฟสที่เกิดความผิดปกติ นำไปสู่

ความร้อนสะสมในจุดที่เกิดการลัดวงจร จึงทำให้เกิดความเสียหายกับขดลวดของมอเตอร์ส่งผลให้เกิดการลัดวงจรตามมา



ก) รางแบริ่งชำรุด ข) ขดลวดลัดวงจร

รูปที่ 1 ตัวอย่างรางแบริ่งชำรุดและขดลวดลัดวงจร

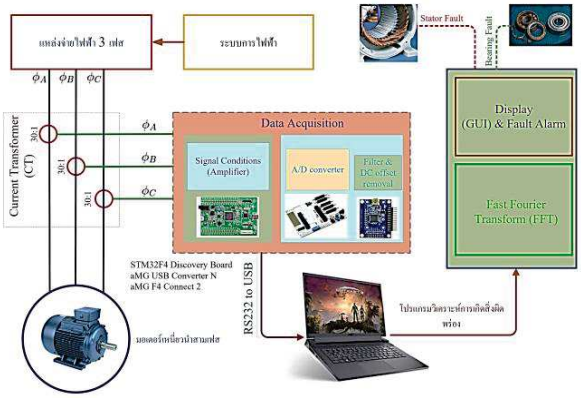
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเก็บข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การทดสอบเก็บข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสของชุดทดลองดำเนินการโดยการเก็บข้อมูลพิกัดแรงดัน กระแส ความเร็วรอบ รูปคลื่นแรงดันผ่านออสซิลโลสโคป และรูปคลื่นแรงดันที่ได้จากชุด DAQ ทั้งการต่อขดลวดมอเตอร์ต่อขดลวดแบบเดลต้าและแบบสตาร์ โดยทำการเก็บข้อมูลในสภาวะปกติ No-load ขนาด 1 แรงม้า และขนาด 5 แรงม้า โดยการจ่ายโหลด และเก็บข้อมูลเมื่อจ่ายโหลด 30%, 60% และ 100% ในการทดลองได้เก็บข้อมูลมอเตอร์ในสภาวะลัดวงจรขณะไร้โหลดที่แรงดันสามระดับคือ 80 โวลต์ 190 โวลต์ และ 220 โวลต์ โดยการต่อขดลวดแบบเดลต้าและแบบสตาร์

3.2 การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์

การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสหรือที่เรียกว่า Motor Current Signature Analysis (MCSA) จะใช้ตัวกรองจับกระแส (Current Sensor) ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณกระแสของมอเตอร์ทั้งสามเฟสทั้งขณะที่ไม่มีภาระและมีภาระ ดังรูปที่ 2 หลังจากนั้น

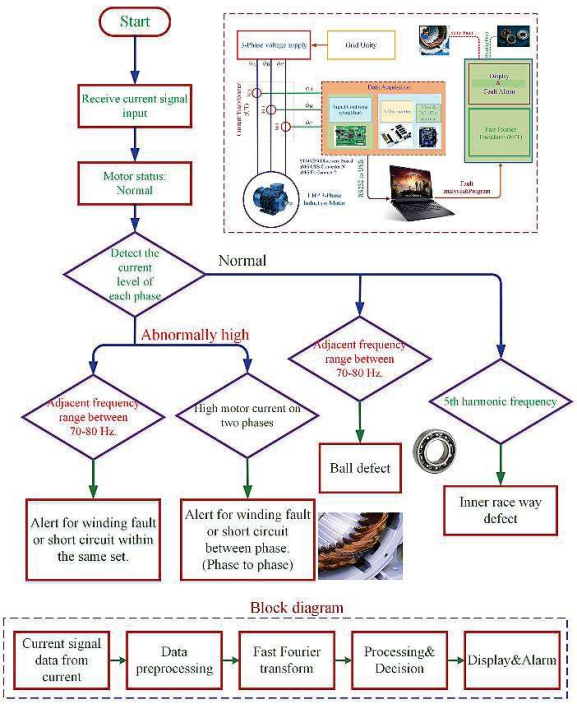


รูปที่ 2 การวิเคราะห์สัญญาณกระแสมอเตอร์



รูปที่ 3 การเก็บข้อมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

สัญญาณกระแสจะถูกส่งต่อไปยังชุด Signal conditioning เพื่อทำการปรับปรุงสัญญาณและแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นสัญญาณจะส่งผ่าน DAQ เพื่อทำการประมวลผลบนโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณกระแสสเตเตอร์ โปรแกรมจะทำการเปลี่ยนสัญญาณกระแสที่อยู่ในรูปของโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่หรือสเปกตรัม โดยใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็วแล้วจึงทำการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมเพื่อวินิจฉัยความผิดพร่องของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยสามารถดูจากขั้นตอนการทำงานตามรูปที่ 4

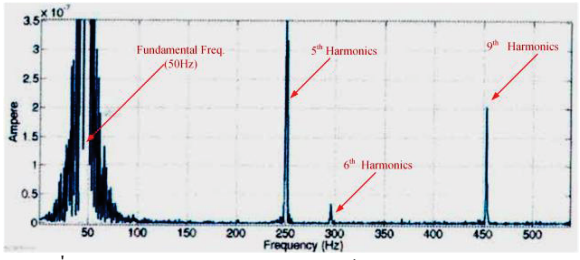


รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

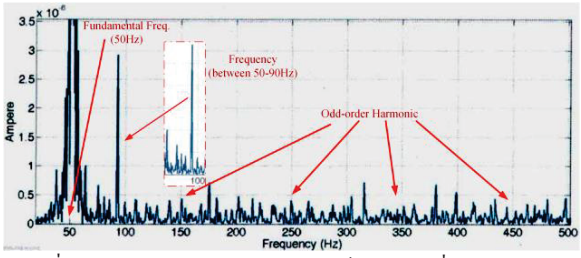
มอเตอร์ขณะที่ทำงานในสภาวะปกติสเปคตรัมของสัญญาณกระแสจะประกอบไปด้วยความถี่หลักมูล 50 Hz หรือความถี่ของแหล่งจ่ายที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์โดยอาจจะมีฮาร์มอนิกส์ปะปนมากับแหล่งจ่ายบ้างในระดับที่น้อย และบางครั้งจะมีความถี่ไซด์แบนแต่หากเป็นความถี่ของร่องสลอตในโรเตอร์ปรากฏอยู่บ้างซึ่งเป็นความถี่ปกติที่มอเตอร์ทุกตัวมี

ผลการวิเคราะห์สเปคตรัมของสัญญาณกระแสในกรณีของความผิดพร่องของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรระหว่างเฟส (Phase to phase fault) จะไม่แสดงไซด์แบนของความไม่สมมาตรของสนามแม่เหล็กแต่สเปคตรัมจะเกิดฮาร์มอนิกส์ที่อันดับสูง ๆ และกระแสของสองเฟสที่ลัดวงจรจะสูงขึ้นพร้อมกัน ดังรูปที่ 5



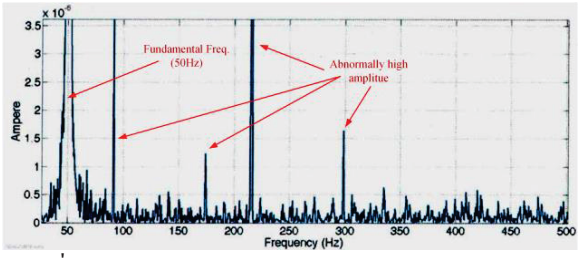
รูปที่ 5 สเปคตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์ในขณะลัดวงจรเฟส A-B

ผลการทดสอบความผิดปกติของแบริ่งลูกปืนหลวมหรือมีตำหนิ (Ball defect) สเปคตรัมของสัญญาณกระแสพบว่าในช่วงที่เกิดความผิดขณะ No load จะเกิดไซด์แบนขนาบข้างความถี่ 50 Hz ในช่วงความถี่ 70-90 Hz และฮาร์มอนิกส์ลำดับเลขคี่ แต่ในช่วงที่เกิดความผิดพร่องขณะ Full load ไซด์แบนขนาบข้าง 50 Hz จะหายไปแต่ฮาร์มอนิกส์อันดับเลขคี่ยังคงอยู่ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สเปคตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์ในขณะแบริ่งลูกปืนหลวม

ผลการทดสอบความผิดพร่องของแบริ่งที่รางในชำรุด และมีตำหนิ (Inner race way defect) ทั้ง No load และ Full load จะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ และมีแอมพลิจูดที่สูงกว่าปกติ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 สเปคตรัมสัญญาณกระแสมอเตอร์ในขณะรางในแบริ่งชำรุด

5. สรุป

ผลการทดสอบสัญญาณกระแสมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้าแสดงให้เห็นถึงหลายประเภทของความผิดพร่องที่แตกต่างกัน โดยในกรณีของความผิดพร่องของขดลวดสเตเตอร์ลัดวงจรในรอบเดียวกัน (Short turn) จะเกิดไซด์แบนที่ความถี่ 70-80 Hz ขนาบข้างความถี่ 50 Hz และความสูงของสเปคตรัมเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ขณะที่ความผิดพร่องระหว่างเฟส (Phase to phase fault) ไม่แสดงไซด์แบน แต่มีฮาร์มอนิกส์ที่อันดับสูง ๆ พร้อมการแจ้งเตือนภายใน 3 วินาที สำหรับความผิดพร่องของแบริ่งลูกปืนหลวมหรือมีตำหนิ (Ball defect) จะมีไซด์แบนในช่วงไร้โหลดแต่หายไปในช่วงโหลดเต็มพิกัด ขณะที่ความผิดพร่องของแบริ่งรางในชำรุด (Inner race way defect) จะเกิดฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่ที่แอมพลิจูดสูงเกิดขึ้นทั้งสองสถานะโหลด จากการทดสอบมอเตอร์ 5 ตัว พบว่ามีการตรวจจับได้ทั้งสองอาการคือแบริ่งลูกปืนหลวมและแบริ่งรางในชำรุด โดยต้องใช้มอเตอร์ที่มีแรงดันเท่ากัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และงบประมาณ

เอกสารอ้างอิง

[1] M' hamed Drif, and Antonio J. Marques Cardoso, "Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analysis," *IEEE Trans. Ind. Informat*, vol.10, no.2, pp. 1348-1360, May 2014.

[2] Arunava Naha, Korada Ravisri Thammayyabbabu, Anik Kumar Samanta, Aurobinda Routray, and Alok Kanti, "Mobile application to detect induction motor faults," *IEEE Embedded systems letters*, vol. 9, no.4, pp. 1-11, Dec. 2017.

[3] Mansour Ojaghi, Mahdi Sabouri, and Jawad Faiz, "Performance analysis of squirrel-cage induction motors under broken rotor bar and stator inter-turn fault conditions using analytical modeling," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 8203705-8203705, Nov. 2018.

ผลกระทบจากสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV

Impacts of EV Charging Stations in 22kV Distribution Systems

ศิริพงษ์ วัฒนศักดิ์ศิริ[1*] พินิจ ศรีธร [1] มงคล ด่านบำรุงตระกูล[1] ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[1] และนายณฐพล ชูสกุล[2]
[1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
[2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเขต 3 (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) จังหวัดนครราชสีมา
E-mail: siripong.wat@pea.co.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจสอบผลกระทบของสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบชาร์จเร็วในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 kV มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบต่อระบบ เลือกใช้โปรแกรม DigSILENT จำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ระบบตัวอย่างในสถานีไฟฟ้าโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาทั้งกรณีที่มีสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันและกรณีที่เป็นไปได้ของสถานีชาร์จที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาที่เป็นโปรไฟล์ของแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูญเสียแล้ว พบว่าสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าส่งผลกระทบที่เป็นทั้งปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม โดยเฉพาะปัญหาแรงดันตกบริเวณปลายสายป้อน

คำสำคัญ: สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า, ผลกระทบของการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า, ระบบจำหน่าย 22 kV, โปรไฟล์แรงดัน, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

Abstract

This paper presents an investigation into the impact of EV charging stations in a 22 kV high-voltage power distribution systems, fast charging type. The objective is to analyze the impact on the overall system. The DigSILENT program was used to simulate the operation of a sample system in Chokchai district, Nakhon Ratchasima Province; the study was conducted in both the case of the current EV charging stations and the possible case of the additional charging stations in the future. Considering the results in terms of voltage and power loss profiles, it is found that the EV charging stations have affected on both the power quality and efficiency of the overall system, especially the voltage drop problem at the end of the feeder line.

Keywords: EV charging station, Impacts of EV charge, 22kV distribution system, Voltage profile, Power loss

1. บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงเป็นระบบที่สำคัญต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวม มักจะเกี่ยวข้องกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่เป็นประชาชนทั่วไปและธุรกิจที่มีความหลากหลาย เช่น โรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดกลางที่เป็นฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โรงโม่หิน ธุรกิจชุมชน เป็นต้น ดังนั้นการบริหารจัดการระบบนี้จึงต้องเป็นไปเพื่อความพึงพอใจที่จะส่งผลต่อการพัฒนาธุรกิจและเศรษฐกิจโดยรวมของชาติได้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าดังกล่าวนี้ต้องมีความมั่นคง มีสเถียรภาพ และมีคุณภาพไฟฟ้าเป็นที่ยอมรับได้ ต้องมีการจัดการระบบที่สามารถกำกับดูแลและควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาทางเทคนิคภายในระบบที่ผลกระทบในวงกว้าง โดยเฉพาะในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้นี้ ที่รถยนต์ไฟฟ้าจะเข้ามามีบทบาทโดยตรงในระบบไฟฟ้ามากขึ้น [1] ซึ่งเชื่อได้ว่าจะมีผลกระทบต่อระบบและส่วนที่เกี่ยวข้องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การใช้รถยนต์ไฟฟ้าจะเป็นที่นิยมมากขึ้นในอนาคต มีความต้องการไฟฟ้ามากขึ้น เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้ามากขึ้น การจัดการระบบไฟฟ้าจึงต้องมีการปรับปรุงให้สามารถรองรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดผลกระทบรุนแรง กรณีการชาร์จที่บ้านพักอาศัยเป็นแบบชาร์จช้าที่เกี่ยวข้องกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ ส่วนการชาร์จที่สถานีชาร์จเป็นแบบชาร์จเร็ว ใช้กำลังไฟฟ้าสูงในช่วงเวลาสั้น [2-3] ส่งผลกระทบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงโดยตรง และในที่สุดแล้ว จะกลายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ กล่าวได้ว่าสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าจะกลายเป็นภาระหลักที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง [4-6] ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและความมั่นคงของระบบโดยรวม การศึกษารายละเอียดเพื่อวางแผนการปรับปรุงให้ระบบสามารถรองรับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้จึงเป็นเรื่องที่จำเป็น

บทความนี้จึงนำเสนอเกี่ยวกับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากติดตั้งสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มจำนวนมากขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง โดยเน้นที่รายละเอียดเป็นโปรไฟล์ของแรงดัน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และการจ่ายโหลดของหม้อแปลงของระบบที่มีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า โดยศึกษาจากข้อมูลเชิงลึกจากการชาร์จจริงที่เป็นปัจจุบัน เพื่อคาดการณ์ความรุนแรงของผลกระทบในอนาคต

2. สถานีชาร์จในระบบจำหน่ายแรงสูง 22 kV

สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเป็นระบบที่ติดตั้งและเชื่อมต่อเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ผลกระทบใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากการชาร์จในสถานีชาร์จก็จะส่งผลโดยตรงต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV นั้น ๆ และอาจจะกระจายออกไปสู่ระบบอื่น ๆ รวมถึงระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำบริเวณใกล้เคียงได้ พิจารณาได้จากรายละเอียดพอสังเขปดังนี้

2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 kV

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) รับไฟฟ้าแรงดันขนาด 115 kV จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และแปลงเป็น 22 kV และ 33 kV ที่สถานีไฟฟ้าแต่ละพื้นที่ เพื่อจ่ายไฟให้ผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ โดยโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าแรงดัน 22 kV ขณะที่บ้านเรือนใช้ไฟฟ้าแรงดัน 230/400 V ผ่านหม้อแปลง

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้ามีบทบาทเพิ่มขึ้นในระบบจำหน่ายแรงสูง เนื่องจากจำนวนผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งต้องการการชาร์จที่รวดเร็วเพื่อลดผลกระทบต่อการเดินทาง ทำให้สถานีชาร์จเป็นที่นิยมใช้เครื่องชาร์จเร็ว ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่แบตเตอรี่โดยตรง การรองรับโหลดจากเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบเร็วจึงกลายเป็นความท้าทายของระบบ เพราะต้องใช้พลังงานสูงในระยะเวลาสั้น และที่สำคัญไม่สามารถคาดการณ์เวลาการใช้งานได้ ส่งผลให้การบริหารจัดการระบบเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ระบบ เพื่อหาแนวทางบริหารจัดการที่เหมาะสมอยู่เสมอ

2.2 สถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

การเพิ่มขึ้นของจำนวนรถยนต์ไฟฟ้านำไปสู่การขยายตัวของสถานีชาร์จเพื่อรองรับการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน รวมถึงการลดระยะเวลาในการชาร์จและการแข่งขันทางธุรกิจ กำลังในการชาร์จของเครื่องชาร์จเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกติดตั้งเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า เครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบชาร์จเร็ว (Fast Charge) จึงได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยมีตัวอย่างการจัดว่างสถานีชาร์จดังในรูปที่ 1 ที่อาจจะมีโซล่าร์เซลล์มาช่วยแบ่งภาระของหม้อแปลง

โครงสร้างและการทำงานของระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้ามีแหล่งจ่ายพลังงานหลักที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่รับไฟฟ้าแรงดันสูงมาจากสถานีไฟฟ้า ซึ่งขนาดของหม้อแปลงจะขึ้นอยู่กับขนาดพิกัดโดยรวมของเครื่องชาร์จ หม้อแปลงจะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากขนาด 22 kV ให้เป็นขนาด 230/400 V และในระบบจะมีอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ที่เหมาะสม เช่น สวิตช์ตัดตอน (Dropout Fuse Cut out) ในส่วนของแรงสูง เพื่อป้องกันกระแสเกินและกระแสลัดวงจร ส่วนในระบบแรงต่ำจะใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์ในการป้องกันกระแสเกินและกระแสลัดวงจรแรงดันต่ำ [7-9]



รูปที่ 1 ตัวอย่างการจัดวางสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า [10]

นอกจากนี้ยังต้องมีอุปกรณ์ป้องกันไฟรั่วเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน หลังจากนั้นกระแสไฟฟ้าจะถูกจ่ายเข้าสู่เครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบชาร์จเร็ว โดยที่เครื่องชาร์จจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อชาร์จแบตเตอรี่ภายในรถยนต์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าในการชาร์จจะขึ้นอยู่กับความสามารถของรถยนต์ไฟฟ้าแต่ละคันว่าจะรองรับการชาร์จได้มากน้อยเท่าไร แต่จะไม่เกินขนาดพิกัดของเครื่องชาร์จนั้น ๆ

2.3 ผลกระทบจากการชาร์จ

การเพิ่มจำนวนของสถานีชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่ต่าง ๆ ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า เนื่องจากการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้ามีรูปแบบที่ไม่แน่นอน เป็นไปในลักษณะของการบริโภคพลังงานที่สูงมากในช่วงเวลาที่ไม่นาน ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาได้ เช่น ขนาดของแรงดันตกต่ำกว่าค่ามาตรฐาน กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นจำนวนมาก เกิดความไม่สมดุลเฟสและความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าแต่ละเฟสดังสมการที่ 1 [11-12] และปริมาณทางไฟฟ้าเกินขีดความสามารถของอุปกรณ์ในระบบนั้น ๆ

$$\%\mathrm{Ub} = \frac{P_{\max} - P_{\mathrm{avg}}}{P_{\mathrm{avg}}} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อมีจำนวนรถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้น ความต้องการการชาร์จก็จะแปรตาม และสถานีชาร์จก็ต้องมากขึ้นตามมาด้วย ทำให้ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นมีความรุนแรงมากขึ้น และมีความถี่ในการเกิดสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV จึงมีความจำเป็น ซึ่งจะช่วยทำให้สามารถประเมินสถานการณ์เพื่อวางแผนจัดการผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถคาดการณ์ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าจำนวนมากได้ ทำให้สามารถวางแผนรองรับและลดผลกระทบดังกล่าวได้ นอกจากนี้แล้ว

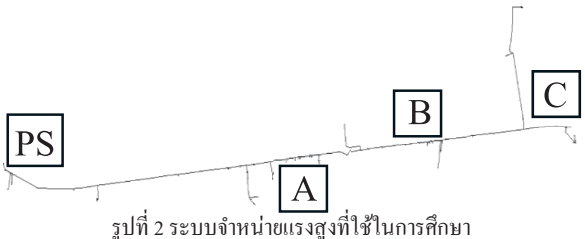
การตรวจสอบและวิเคราะห์ระบบที่นำเสนอนี้ ยังช่วยให้สามารถออกแบบและวางแผนการพัฒนาระบบไฟฟ้าในพื้นที่ที่สอดคล้องกันได้

3. การดำเนินงาน

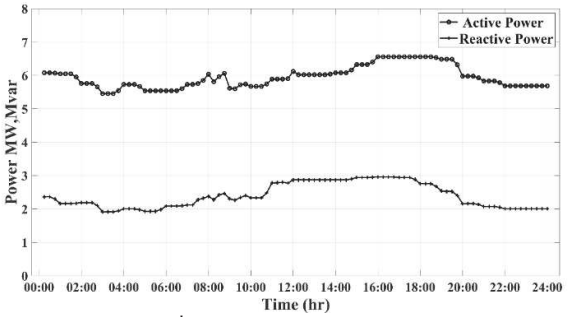
การตรวจสอบผลกระทบจากสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 kV นี้ใช้ข้อมูลตัวอย่างระบบที่เป็นโครงสร้างและโหลดโปรไฟล์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงของสถานีไฟฟ้าโชคชัย จังหวัดนครราชสีมา ดังที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสถานีต้นทางอยู่ที่ตำแหน่ง PS โดยที่ความยาวของสายป้อนหรือฟีดเดอร์ (Feeder) นี้ประมาณ 14 km และมีหม้อแปลงทั้งหมดจำนวน 44 เครื่อง รวมแล้วมีขนาด 15.69 MVA ซึ่งมีตัวอย่างรายละเอียดของโหลดรวมในแต่ละเวลาเป็นกราฟโหลดในรูปที่ 3 ที่เห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็น 6.5 MW ณ เวลา 15.45 น.

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงนี้มีสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่ที่ตำแหน่ง A และ B (รูปที่ 2) ในสถานีมีเครื่องชาร์จแบบเร็ว จำนวนรวมกันแล้วไม่เกิน 3 MW (ข้อกำหนดตามระเบียบของ กฟภ.) [13] และมีตัวอย่างข้อมูลโหลดที่ได้จากการวัด แสดงเป็นกราฟโหลดโปรไฟล์ของสถานีชาร์จ ดังในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานีชาร์จนี้มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดขนาด 119.5 kW ณ เวลา 18.45 น.

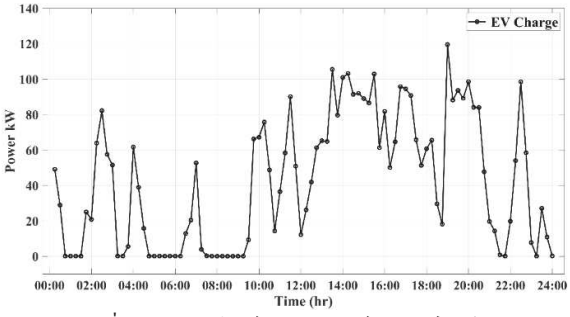
การศึกษานี้จึงได้นำข้อมูลของระบบดังกล่าวมากำหนดรายละเอียดของแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DigSILENT Power Factory โดยกำหนดขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของสถานีชาร์จรวมสูงสุดเป็น 3 MW แล้วทำการจำลองการทำงานใน 4 กรณีศึกษา คือ 30%, 50%, 80%, 100% ของพิกัดสูงสุดนี้ เพื่อตรวจสอบผลกระทบที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าปลายสายที่ตำแหน่ง C และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายแรงสูงที่ใช้ในการศึกษา



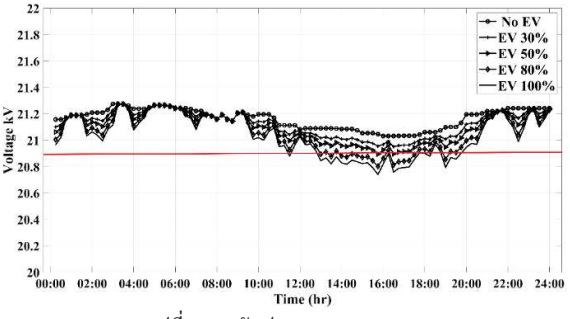
รูปที่ 3 โหลดโปรไฟล์ระบบไฟฟ้า



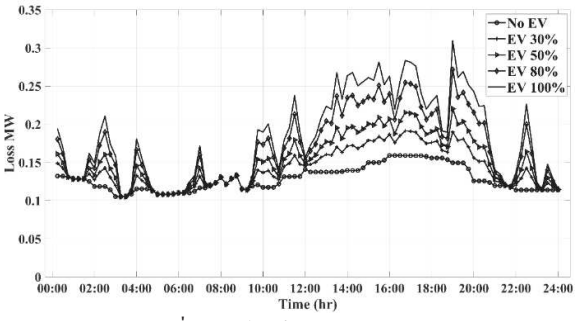
รูปที่ 4 โหลดโปรไฟล์ของสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการจำลองการทำงานของระบบ เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการติดตั้งสถานีชาร์จ พบว่าแรงดันไฟฟ้าปลายสายที่ตำแหน่ง C กรณีที่มีการชาร์จ 30 % ของพิกัดสายป้อน จะไม่ส่งผลต่อขนาดของแรงดัน โดยที่แรงดันปลายสายยังอยู่ในค่ามาตรฐาน แต่เมื่อมีการชาร์จรถยนต์มากขึ้นเป็น 50%, 80%, 100% พบว่าขนาดของแรงดันปลายสายลดลงต่ำว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ 20.90 kV [13] และจะยิ่งลดลงเมื่อกำลังไฟฟ้าของการชาร์จสูงขึ้น และพบว่าแรงดันปลายสาย ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 20.74 kV ถึง 20.89 kV ดังในรูปที่ 5 และกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้นตามกำลังการชาร์จ ดังในรูปที่ 6



รูปที่ 5 แรงดันปลายสายของระบบ



รูปที่ 6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ

5. สรุป

การตรวจสอบผลกระทบจากสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูง 22 kV ในบทความนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการทำงานของระบบที่มีสถานีชาร์จ โดยกำหนดให้ภาพรวมของการชาร์จใช้กำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 30% ถึง 100% ของพิกัดสายป้อน (3 MW) แล้วตรวจสอบขนาดของแรงดันและกำลังไฟฟ้าสูญเสีย ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่สื่อถึงคุณภาพไฟฟ้าและประสิทธิภาพของสายป้อนตามลำดับ โดยสามารถสรุปจากผลการดำเนินงานได้ดังนี้

เมื่อสถานีชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในระบบมีขนาดตั้งแต่ 50% ของสายป้อน พบว่าการชาร์จจะส่งผลต่อขนาดของแรงดันในระบบ ทำให้แรงดันลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อาจจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าได้ และเมื่อมีการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แรงดันตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลต่อความสามารถในการรองรับโหลดของระบบไฟฟ้าโดยรวม และสภาพการจ่ายโหลดของหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสื่อถึงความร้อนสะสมที่จะเพิ่มมากขึ้น จำนวนของรถยนต์ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และจะมีผลกระทบต่อภาพรวมการใช้ไฟฟ้า แนวทางหรือวิธีบรรเทาจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Inci, M.; Çelik, Ö.; Lashab, A.; Bayındır, K.Ç.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Power System Integration of Electric Vehicles: A Review on Impacts and Contributions to the Smart Grid. Appl. Sci. 2024, 14, 2246. https://doi.org/10.3390/app14062246

[2] T. Yuvaraj, K. R. Devabalaji, J. A. Kumar, S. B. Thanikanti and N. I. Nwulu, "A Comprehensive Review and Analysis of the Allocation of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution Networks," in IEEE Access, vol. 12, pp. 5404-5461, 2024

[3] Ziyue Jiang, Jingzuo Han, Yetong Li, Xinyu Chen, Tianduo Peng, Jianliang Xiong, Zhan Shu, Charging station layout planning for electric vehicles based on power system flexibility requirements, Energy, Volume 283, 2023, 128983, ISSN 0360-5442, https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128983.

[4] P. Roy et al., "Impact of Electric Vehicle Charging on Power Distribution Systems: A Case Study of the Grid in Western Kentucky," in IEEE Access, vol. 11, pp. 49002-49023, 2023,

[5] Olcay, K.; Çetinkaya, N. Analysis of the Electric Vehicle Charging Stations Effects on the Electricity Network with Artificial Neural Network. Energies 2023, 16, 1282.

[6] B. V. Kumar and A. F. M. A, "Optimal Simultaneous Allocation of Electric Vehicle Charging Stations and Capacitors in Radial Distribution Network Considering Reliability," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 12, no. 5,

[7] M. Rashed Hassan Bipu et al., "Design, Control, and Protection of a 13.2 kV, 1 MVA Solid State Transformer for Electric Vehicle Extreme Fast Charging Station," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 11,

[8] S. S. G. Acharige, M. E. Haque, M. T. Arif, N. Hosseinzadeh, K. N. Hasan and A. M. T. Oo, "Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations," in IEEE Access, vol. 11

[9] P. Shukl and B. Singh, "Distributed Energy Resources Based EV Charging Station With Seamless Connection to Grid," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 3

[10] https://www.vecteezy.com/vector-art/40531676-isometric-charging-electric-cars

[11] J. Then, A. P. Agalgaonkar and K. M. Muttaqi, "Coordinated Charging of Spatially Distributed Electric Vehicles for Mitigating Voltage Rise and Voltage Unbalance in Modern Distribution Networks," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 59, no. 4, pp. 5149-5157, July-Aug. 2023,

[12] G. Pisano et al., "Impact of Electrical Vehicle Private Charging Stations on the Quality of the Low Voltage Network Supply," in IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 10, pp. 351-362, 2023, doi: 10.1109/OAJPE.2023.3258254.

[13] ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อสถานีอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า พ.ศ. 2563

การป้องกันไมโครกริดแบบโครงข่าย: สถาปัตยกรรม ความท้าทาย และแนวโน้มการวิจัยในอนาคต

Networked Microgrid Protection: Architectures Challenge and Future Research Direction

สุรชา พนันชัย[1] บุญเติม อุ่นวิเศษ[2] สิทธเดช หมอกมีชัย[3] ณัฐชนันท์ ปลายเนตร[4] และ ศุภชัย ปลายเนตร[5]
[1,3]บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
[4]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
[2,5]สาขาวิชาไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
[5*]Corresponding Author: prainetr@npu.ac.th

บทคัดย่อ

การออกแบบและการเลือกใช้ระบบป้องกันขั้นสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความน่าเชื่อถือและปลอดภัยของไมโครกริดแบบเชื่อมต่อโครงข่าย (Networked micro grid) ระบบป้องกันต่างๆ ช่วยให้ระบบไมโครกริดทำงานได้อย่างถูกต้อง บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรม เพื่อชี้ให้เห็นถึงความท้าทายในการพัฒนาระบบป้องกันสำหรับไมโครกริดแบบเชื่อมต่อโครงข่าย แนวทางพัฒนา และการวิจัยที่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อการพัฒนา การอภิปรายเกี่ยวกับระบบป้องกันที่มีอยู่ในปัจจุบัน ความท้าทายการวิจัยในปัจจุบัน และแนวทางพัฒนาระบบป้องกันในไมโครกริดแบบเชื่อมต่อโครงข่ายสำหรับอนาคต

คำสำคัญ: การป้องกันแบบปรับตัว, การรวมกลุ่มไมโครกริด, ความซับซ้อนระบบไมโครกริด, การจำลองแบบเวลาจริง, ระบบสมาร์ทกริด

Abstract

Advanced protection system design and implementation are crucial for the reliability and security of networked microgrids. These protection systems ensure the proper operation of the microgrid. This paper presents a literature review to highlight the challenges in developing protection schemes for networked microgrids, potential solutions, and research areas requiring further investigation to advance the field. The discussion encompasses existing protection systems, current research challenges, and future development directions for protection systems in networked microgrids.

Keywords: Adaptive Protection, Clusters, Microgrid, Multi-Microgrid, Networked Microgrid, Real-Time Simulation, Smart Grid

1. บทนำ

ไมโครกริดแบบเชื่อมต่อโครงข่าย (Networked Microgrids: NMG) เป็นการรวมกลุ่มของไมโครกริดที่มีการเชื่อมต่อกันทางกายภาพด้วยโหนดในระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) หรือกระแสสลับ (AC) โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันและสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างกันผ่านระบบจำหน่ายไฟฟ้า [1] ทำให้ระบบ NMG สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการปรับปรุงและการจัดการคุณภาพไฟฟ้า [2] และความยืดหยุ่น [3-4] การเพิ่มความยืดหยุ่น [5-7] และเพิ่มความพร้อมใช้งานของโครงข่ายไฟฟ้า [8], [9] ดังนั้นจึงคาดว่าในอนาคตระบบ NMG จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะในอนาคต [5-6], [10] อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อ NMG เหล่านี้ในโหนดต่างๆ ทำให้เกิดรูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่ายในแบบต่างๆ ที่ใช้เพื่อรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์(Network topology) อิเล็กทรอนิกส์ และเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมอุปกรณ์ในระบบเครือข่าย [9] ส่งผลให้เพิ่มการเกิดความผิดพร่องในเครือข่าย และทำให้การทำงานของการป้องกันระบบและเครือข่ายซับซ้อนยิ่งขึ้น [11-12] นอกจากนี้ การทำงานของไมโครกริดเดี่ยวหรือแบบแยกขยายไปสู่ NMG รวมถึงการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบสองทิศทาง การเปลี่ยนแปลงกระแสลัดวงจร และการผสานแหล่งพลังงานแบบกระจาย (Distributed energy resources: DER) จากหลายแหล่งพลังงาน นอกจากนี้ การป้องกัน NMG จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อไมโครกริดเดี่ยวในระดับแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน หลายโหนดและอาจเกิดกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้นในโหมดเชื่อมต่อ ระบบป้องกันมีความสำคัญเพื่อสร้างความปลอดภัยและการทำงานที่น่าเชื่อถือของระบบปัจจุบัน ระบบป้องกันใช้เทคนิคการป้องกันแบบดั้งเดิมมีราคาไม่แพงและใช้งานง่าย อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีประสิทธิภาพเฉพาะความผิดพร่องบางกรณี เนื่องจากพลวัตและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของ MG ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น [13-16] ระบบป้องกันที่ใช้รีเลย์ที่มีเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพ [17] มีลักษณะการตัดวงจรแบบผสม ระบบสื่อสารและการพัฒนาโปรแกรมหรืออัลกอริทึมที่สามารถปรับตัวตามสถานการณ์ นอกจากนี้ เทคโนโลยีการป้องกันอื่นๆ ยังถูกนำมาใช้ เช่น หน่วยวัดเฟสเซอร์ขนาดเล็ก (Micro phasor measurement units) และตัว

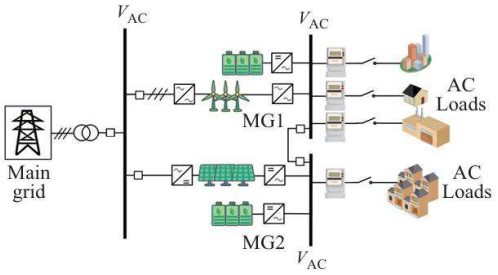
จำกัดกระแสตัวนำยิ่งยวด (Superconducting current limiters) อย่างไรก็ตาม การนำเสนอการวิจัยพัฒนาการตรวจจับความผิดพร่อง (Fault detection) ภายในและภายนอก ของระบบป้องกันอื่นๆ การใช้อัลกอริทึมขั้นสูงเพื่อระบุโทโพโลยีของระบบ การแสดงสภาวะการทำงาน ระดับกระแสลัดวงจร การป้องกันแบบปรับตัวส่วนกลางด้วยรีเลย์กระแสเกินและรีเลย์อเนกประสงค์ที่มีการสื่อสารและการบูรณาการตั้งค่าการป้องกันจึงเป็นการวิจัยที่มีความสำคัญและน่าสนใจ วิธีการจัดกลุ่ม (Clustering methods) [19] ได้อภิปรายวิธีการที่ใช้การจัดกลุ่มเพื่อลดจำนวนกลุ่มการปรับแต่งสำหรับการประสานงานแบบปรับตัวของรีเลย์กระแสเกิน (Overcurrent relays: OCR) โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบ k-means ระบบป้องกันที่ใช้วิธีการประสานงานนี้อาจสามารถทำงานได้อย่างอิสระจากการทำงานของศูนย์ควบคุม ซึ่งตอบสนองการป้องกันแบบกระจาย (Decentralized protection) การศึกษาการป้องกันที่ใช้รีเลย์กระแสเกินแบบมีทิศทางเชิงตัวเลข (Numerical directional overcurrent relays: DOCR) ที่มีการตั้งค่าเดี่ยวและคู่ได้กำหนดการประสานงานเป็นปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพที่แก้ไขโดยวิธีการจุดภายใน (Interior point method) การทดสอบแสดงให้เห็นว่าโครงร่างนี้เป็นระบบประสานงานการป้องกันที่มีประสิทธิภาพ มีการศึกษาวิจัยล่าสุดได้กล่าวถึงความต้องการในอนาคตสำหรับการออกแบบ NMG ได้เน้นย้ำถึงความจำเป็นในการออกแบบระบบป้องกันที่ให้เกณฑ์หลักเพื่อรับประกันความปลอดภัยและประสิทธิภาพการประสานงานของ NMG ดังนั้น การป้องกันที่เหมาะสมสำหรับระบบเหล่านี้มีประโยชน์ที่สำคัญยิ่งสำหรับเครือข่ายระบบพลังงานที่เชื่อมต่อกันในอนาคต[18-20]

บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมของสถาปัตยกรรมและการเชื่อมต่อโครงข่ายพลังงานระบบไมโครกริด (Network topology) และการป้องกันที่สอดคล้องกัน รวมถึงการอภิปรายถึงความท้าทายและแนวทางการพัฒนาวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันไมโครกริดและการให้ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต เนื้อหาของบทความ การแนะนำแนวคิดของไมโครกริดหลายระบบและสถาปัตยกรรมการทำงาน การอภิปรายถึงความท้าทายในการป้องกันและประเด็นสำคัญการวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

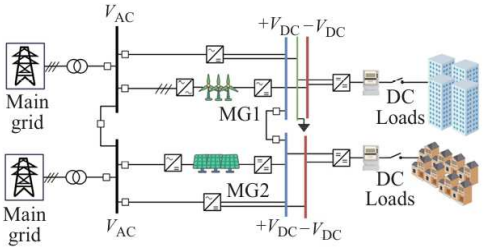
2. โครงข่ายไมโครกริด

2.1 สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยีการเชื่อมต่อ

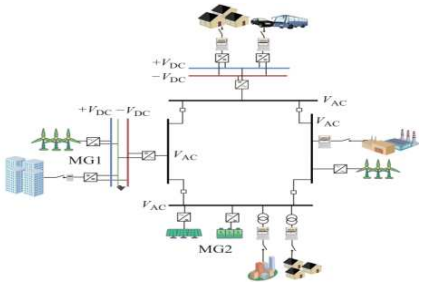
สถาปัตยกรรม NMG พื้นฐานได้แก่ ระบบอนุกรมตัวป้อนเดียว ระบบแบบขนานบนตัวป้อนเดียว และ ระบบที่เชื่อมต่อระหว่างกันกับตัวป้อนหลายตัว อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สถาปัตยกรรมในรูปแบบระบบ AC, DC หรือ ผสมผสาน (Hybrid) การจำแนกระดับแรงดันไฟฟ้าได้แก่ แรงดันไฟฟ้าต่ำ (LV) แรงดันไฟฟ้าระดับปานกลาง (MV) หรือ MV/LV แบบผสมผสาน การวิจัย[17-18] ผู้เขียนกล่าวถึงการจำแนกระบุและวิเคราะห์ระบบที่แตกต่างกันของสถาปัตยกรรมในรูปแบบต่างๆ ตามการเชื่อมต่อและการส่งกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบสถาปัตยกรรมค่าใช้จ่ายความยืดหยุ่นการป้องกันความน่าเชื่อถือ ความเสถียร และรูปแบบที่แตกต่างกัน การทำงานในอนาคตของ NMG สิ่งที่ควรพิจารณาสถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี ที่มีการใช้งานแบบหลากหลาย (AC และ DC) การวิจัยอย่างต่อเนื่องสำหรับการป้องกันความล้มเหลวของระบบหลักและอุปกรณ์ในระบบโครงข่ายพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 1 การเชื่อมต่อไมโครกริดแบบขนาน



รูปที่ 2 การเชื่อมต่อไมโครกริดแบบตาข่าย



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อโครงข่ายผสมผสานแบบวงแหวน

รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อไมโครกริดแบบขนาน รูปที่ 2 การเชื่อมต่อไมโครกริดแบบตาข่าย และรูปที่ 3 การเชื่อมต่อโครงข่ายผสมผสานแบบวงแหวน

3. การป้องกันโครงข่ายระบบไมโครกริดและการวิจัย

3.1 ความท้าทายวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบป้องกัน

การพัฒนาวิจัยด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงอัลกอริทึมอัจฉริยะ การเพิ่มประสิทธิภาพ เทคนิคการควบคุม ระบบสื่อสาร และอุปกรณ์อัจฉริยะ อย่างไรก็ตามเนื่องจากระบบมีการรับพลังงานจากหลายแหล่งกำเนิด จึงทำให้โครงสร้างการป้องกันมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากต้องสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพทั้งสำหรับไมโครกริดเดี่ยวและชุดของไมโครกริดที่เชื่อมต่อกัน นอกจากนี้การวิจัยพัฒนาระบบป้องกันสามารถทำงานได้เร็วขึ้นและมีประสิทธิภาพ

3.2 ความท้าทายการปรับตัวตามรูปแบบการทำงาน ได้แก่ โหมดเชื่อมต่อกับกริด (Grid connected), โหมดการจ่ายไฟแบบแยกตัวเป็นอิสระจากโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Island mode) และโหมดไมโครกริดหลายระบบ (Multi micro grid mode)

3.3 ความท้าทายการป้องกันโหมดเชื่อมต่อกับกริด ได้แก่ ความผิดพร่อง (Fault) ส่งผลให้เกิดระดับกระแสไฟฟ้าสูง และการเกิดอาร์กแฟลช (Arc flash) อาจเป็นปัญหาที่ต้องให้ความสำคัญ [19]

1. การตัดวงจรโดยไม่พึงประสงค์อาจเกิดจากการไหลของพลังงานแบบสองทิศทาง (Bidirectional power flows) [20]
2. การสูญเสียการเชื่อมต่อระหว่างกริดหลักและไมโครกริด (Loss of mains) [21]
3. การเลือกอุปกรณ์ป้องกันต้องพิจารณาตัวแปรที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น ลักษณะของโหลด ระดับกระแสผิดพร่องที่แปรผัน ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และช่วงเวลาการตัดวงจรที่เร็วขึ้น [21]

4. การอภิปราย

โครงสร้างการป้องกันของเครือข่ายไมโครกริด (Network Microgrid: NMG) การวิจัยจำเป็นต้องสามารถรองรับการทำงานของไมโครกริดที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อที่แตกต่างกัน ได้แก่ ไมโครกริดแบบกระแสสลับ (AC-NMG) ไมโครกริดแบบกระแสตรง (DC-NMG) และไมโครกริดแบบไฮบริด (Hybrid-NMG) การออกแบบสถาปัตยกรรมการป้องกันต้องคำนึงถึงโหมดการดำเนินงานที่แตกต่างกัน ได้แก่ การเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก (Grid connected mode) การทำงานแบบแยกตัว (islanded mode) และการทำงานแบบหลายไมโครกริดที่เชื่อมต่อกัน (Multi micro grid mode) หนึ่งในความท้าทายหลักของการป้องกันระบบคือ การเปลี่ยนแปลงของทิศทางกระแสไฟฟ้า (Bidirectional power flow) ซึ่งส่งผลให้การตรวจจับความผิดพร่องเป็นไปได้ยากขึ้น นอกจากนี้ การแยกโหลดผิดพลาดอาจนำไปสู่การตัดไฟโดยไม่จำเป็น (Unwanted tripping) ทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ อีกทั้งการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันต้องคำนึงถึงระดับแรงดันและกระแสผิดพร่องที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในกรณีที่เกิดความผิดพร่องรุนแรง เช่น อาร์กแฟลช (Arc flash) อาจส่งผลกระทบร้ายแรงต่อความปลอดภัยของระบบ หากไม่สามารถตัดกระแสผิดพร่องได้อย่างรวดเร็ว เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว มีการพัฒนาแนวทางการป้องกันที่อาศัยเทคโนโลยีอัจฉริยะ เช่น การใช้อัลกอริทึมอัจฉริยะ (Intelligent algorithm) ซึ่งรวมถึงปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) นอกจากนี้ เทคนิคการควบคุมและการป้องกันที่มีประสิทธิภาพ เช่น การป้องกันแบบปรับตามสถานการณ์(Adaptive protection) และ การป้องกันในระบบแรงดันไฟฟ้าหลายระดับ (Differential protection ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบ รวมถึงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านการสื่อสารและการใช้มาตรฐาน IEC 61850 เพื่อให้ระบบสามารถประสานงานและตอบสนองต่อความผิดพร่องได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

5. สรุป

การป้องกันระบบไมโครกริดสมัยใหม่ (Model protection smart grid) มีความซับซ้อนมากกว่าการป้องกันไมโครกริดแบบเดี่ยว เนื่องจากระบบต้องสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างการเชื่อมต่อและการทำงานที่เป็นพลวัต การนำอัลกอริทึมอัจฉริยะและระบบควบคุมที่ยืดหยุ่นมาใช้จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้แบบเวลาจริง (Realtime) เทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญ ได้แก่ AI, ML และ IoT ซึ่งช่วยเพิ่มขีดความสามารถของระบบป้องกันให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ การออกแบบการป้องกันต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของระบบ แนวโน้มในอนาคตของการพัฒนาระบบป้องกันใน NMG ควรมุ่งเน้นไปที่การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน (Renewable Integration) และการจัดการโหลดอัจฉริยะ (Smart load management) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ นอกจากนี้ การใช้ Edge Computing และ Cloud-based Protection Systems จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการตรวจจับและตอบสนองต่อความผิดพร่องได้อย่างรวดเร็ว การประสานงานของอุปกรณ์ป้องกัน (Protection coordination) ควรได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับโครงข่ายไมโครกริดที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ในขณะเดียวกัน จำเป็นต้องมีการกำหนดมาตรฐานสากล

(International Standards) และกฎระเบียบที่รองรับการออกแบบและการใช้งานในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและมหาวิทยาลัยนครพนมที่ได้สนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Moradi and A. Akbari Foroud, “Operation management of microgrid clusters,” in Microgrids: Advances in Operation, Control, and Protection, A. Anvari-Moghaddam, H. Abdi, B. Mohammadi-Ivatloo, and N. Hatziargyriou, Eds. Cham: Springer, 2021, pp. 17–59, doi: 10.1007/978-3-030-59750-4 2.

[2] P. Roy Chowdhury, P. K. Sahu, S. Essakiappan, M. Manjrekar, K.Schneider, and S. Laval, “Power quality and stability in a cluster of microgrids with coordinated power and energy management,” in Proceedings of 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334828.

[3] S. Chanda and A. K. Srivastava, “Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2859–2868, Nov. 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2561303.

[4] Z. Y. Li, M. Shahidehpour, F. Aminifar, A. Alabdulwahab, and Y. Al-Turki, “Networked microgrids for enhancing the power system resilience,” Proceedings of the IEEE, vol. 105, no. 7, pp. 1289–1310, Jul. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2685558.

[5] Z. Y. Wang, B. K. Chen, J. H. Wang, and C. Chen, “Networked microgrids for self-healing power systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 310–319, Jan. 2016, doi: 10.1109/TS G.2015.2427513.

[6] D. T. Ton and M. A. Smith, “The U.S. department of energy’s microgrid initiative,” The Electricity Journal, vol. 25, no. 8, pp. 84–94, Oct. 2012 doi: 10.1016/j.tej.2012.09.013.

[7] M. Higginson, M. Payne, K. Moses, P. Curtiss, and S. Costello, “North bay hydro microgrid: innovative protection of a complex system,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, no. 3, pp. 70–82, May/Jun. 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057954.

[8] L. X. Meng, Q. Shafiee, G. F. Trecate, H. Karimi, D. Fulwani, X. N. Lu, and J. M. Guerrero, “Review on control of DC microgrids and multiple microgrid clusters,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 928–948, Sep. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2690219.

[9] M. N. Alam, S. Chakrabarti, and A. Ghosh, “Networked microgrids: state-of-the-art and future perspectives,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 3, pp. 1238–1250, Mar. 2019, doi:10.1109/TII.2018.2881540.

[10] J. Wei, R. Roche, A. Koukam, and F. Lauri, “Decentralized coordination for mutual rescue in microgrid clusters,” in Proceedings of 2018 IEEE International Energy Conference, 2018, pp. 1–6, doi:10.1109/ENERGYCON.2018.8398769.

[11] M. N. Alam, S. Chakrabarti, and X. D. Liang, “A benchmark test system for networked microgrids,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 10, pp. 6217–6230, Oct. 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2976893.

[12] M. A. Yaqobi, H. Matayoshi, M. S. S. Danish, M. E. Lotfy, A. M. Howlader, and S. Tomonobu, “Low-voltage solid-state DC breaker for fault protection applications in isolated DC microgrid cluster,” Applied Sciences (Switzerland), vol. 9, no. 4, Feb. 2019, doi: 10.3390/app9040723.

[13] K. El-Arroudi and G. Jo´os, “Performance of interconnection protection based on distance relaying for wind power distributed generation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 620–629, Apr. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2693292.

[14] A. Sinclair, D. Finney, D. Martin, and P. Sharma, “Distance protection in distribution systems: How it assists with integrating distributed resources,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp. 2186–2196, May/Jun. 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2288426.

[15] S. Beheshtaein, R. Cuzner, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, “Review on microgrids protection,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, no. 6, pp. 743–759, Mar. 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5212.

[16] A. K. Barnes and A. Mate, “Implementing admittance relaying for microgrid protection,” in Proceedings of the 2021 IEEE/IAS 57th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2021, pp. 1–9, doi: 10.1109/ICPS51807.2021.9416600.

[17] E. Dehghanpour, H. Kazemi Karegar, R. Kheirollahi, and T. Soleymani,“Optimal coordination of directional overcurrent relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 2, pp. 1365–1375,Mar. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2587725.

[18] P. Thararak and P. Jirapong, “Implementation of optimal protection coordination for microgrids with distributed generations using quaternary protection scheme,” Journal of Electrical and Computer Engineering,vol. 2020, pp. 2568652, Jan. 2020, doi: 10.1155/2020/2568652.

[19] M. E. Ropp and M. J. Reno, “Influence of inverter-based resources on microgrid protection: part 2: secondary networks and microgrid protection,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, no. 3, pp. 47 57, May/Jun. 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057952.

[20] B. Patnaik, M. Mishra, R. C. Bansal, and R. K. Jena, “AC microgrid protection– a review: current and future prospective,” Applied Energy,vol. 271, pp. 115210, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115210.

[21] A. Dagar, P. Gupta, and V. Niranjan, “Microgrid protection: a comprehensive review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 149, pp. 111401, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111401.

Adaptive Successive Over-Relaxation Approach for Unbalanced ZIP Load Power Flow Analysis in Non-Radial Networks

Nattavit Piamvilai[1*] Tosapon Intaraumnauy [2] and Touchakorn Loedchayakan[2]

[1*]Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok,
[2] Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
E-mail: nattavit.p@cit.kmutnb.ac.th*

Abstract

This paper proposes an Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR) iterative method for solving non-radial, unbalanced power flow problems with ZIP loads and a Pi feeder model. The study compares ASOR with conventional iterative methods, evaluating voltage error rates and convergence behavior. Using the modified non radial IEEE 13-bus system, results show that ASOR dynamically adjusts the relaxation factor at each iteration, significantly reducing error rates and accelerating convergence. This adaptive strategy ensures stable power flow solutions while preventing divergence. Numerical simulations further confirm ASOR's effectiveness in minimizing voltage discrepancies and improving computational efficiency, making it a robust approach for complex distribution networks.

Keywords: Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR), Unbalanced Power Flow, Non-Radial Distribution Networks, ZIP Load Model, Pi Based Distribution Line Model

1. Introduction

In power system analysis, employing various iterative techniques can greatly enhance the accuracy of power flow calculations. Among these techniques, the Gauss-Seidel and Newton-Raphson methods stand out as effective choices [1]. In distribution networks, the challenges are quite different: loads are usually unbalanced, and the networks often have a radial structure. The Backward-Forward Sweep method is often employed in power system analysis, particularly due to its efficiency and simplicity in managing radial configurations. This approach works effectively in scenarios where the system's flow is unidirectional, making it a preferred choice for radial systems. However, its utility reduces significantly when applied to non-radial configurations, such as meshed systems, which feature multiple pathways for current flow. Additionally, as the resistance to reactance (R/X) ratio increases, the method's effectiveness further declines, highlighting the challenges posed by more complex network topologies [2].

While the Gauss-Seidel method can be adapted to non-radial networks, doing so requires considerably more computational time, especially when incorporating complex models such as unbalanced ZIP loads, delta–star load conversions, and the detailed pi model of distribution lines which accounts for resistance, inductance, mutual inductance, as well as phase-to-phase and phase-to-ground capacitances.

To address these challenges, this paper presents a novel modified Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR) iterative method. The proposed method improves convergence performance in power flow calculations for non-radial, unbalanced networks with ZIP load models. We validate our approach using a modified non-radial IEEE 13-bus unbalanced system, demonstrating that our adaptive SOR technique achieves lower voltage error per iteration than conventional Gauss-Seidel and conventional fixed-parameter SOR methods.

2. System Component Modeling

2.1 ZIP Load Model

In power flow analysis, buses within a network are typically classified into three categories: slack, PV, and PQ buses. Load buses are generally represented as PQ buses, where both active and reactive power values are predefined and remain constant throughout the iterative process. Nevertheless, in real-world and complex systems, the power consumption of a load can vary with changes in bus voltage and current. To more accurately capture this behavior, several studies, including [3 – 4], have utilized a ZIP model. This model characterizes the load as a combination of three distinct components.

1. Constant Impedance (Z): The power consumed by the load is proportional to the square of the voltage magnitude.

2. Constant Current (I): The power varies linearly with changes in voltage, meaning that the current remains constant while power adjusts according to the voltage.

3. Constant Power (P): The power remains fixed regardless of voltage variations, ensuring a stable power demand under different operating conditions.

In three-phase load analysis, loads can be classified as either delta-connected or star-connected, depending on their wiring configurations. These connections impact how the power consumption characteristics translate into line currents. In power flow studies, loads are often represented in terms of line currents rather than directly in terms of power. The ZIP load model can be formulated in

matrix form for both star- and delta-connected loads. These matrix representations, as given in (1) and (2), define the relationship between power consumption and the injected current in each phase of the bus. By incorporating the ZIP load model in this manner, power flow analysis can more accurately capture the interactions between voltage variations and load behavior.

2.2 PI Based Distribution line Model

In power flow analysis of distribution systems, precise modeling of feeders is essential, considering resistance (R), inductance (L), and capacitance (C) parameter of each line. One widely accepted approach for representing these characteristics is the pi model, as outlined in [5 – 6]. In our study, we employ this model to compute the bus admittance matrix or $\overline{Y_{bus}}$ as demonstrate in Fig. 1 For each phase, the current injected into the network divides into two distinct components: the shunt current and the series current. The shunt current traverses the line-to-ground and line-to-line capacitances, whereas the series current passes through the series elements, including resistance, inductance, and mutual inductance. To accurately determine the bus admittance, each current component is evaluated separately. The shunt current is determined by applying Ohm's law alongside Kirchhoff's Current Law (KCL), as illustrated in (3). In a similar manner, the series current, which indicates the current directed toward other buses, is calculated using Kirchhoff's Voltage Law (KVL), as detailed in (4). The impedance matrix derived from Equation is subsequently transformed into an admittance matrix, as presented in (5). The overall bus admittance matrix is formed by combining these two contributions, referred to as $\overline{Y_{Shunt}}$ and $\overline{Y_{Serie}}$, as described in (6). To further illustrate the relationship between the current injected from two buses and their respective phase voltages, the bus admittance matrices for each bus are merged into a single overall bus admittance matrix $\overline{Y_{bus}}$, as given in (7).

$$\begin{bmatrix} I_A^i \\ I_B^i \\ I_C^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\left(S_{A,0}^i\left(\dfrac{|V_A^i|}{|V_{A,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_A^i\right)^*} \\ \dfrac{\left(S_{B,0}^i\left(\dfrac{|V_B^i|}{|V_{B,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_B^i\right)^*} \\ \dfrac{\left(S_{C,0}^i\left(\dfrac{|V_C^i|}{|V_{C,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_C^i\right)^*} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_A^i \\ I_B^i \\ I_C^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\left(S_{AB,0}^i\left(\dfrac{|V_{AB}^i|}{|V_{AB,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{AB}^i\right)^*} - \dfrac{\left(S_{CA,0}^i\left(\dfrac{|V_{CA}^i|}{|V_{CA,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{CA}^i\right)^*} \\ \dfrac{\left(S_{BC,0}^i\left(\dfrac{|V_{BC}^i|}{|V_{BC,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{BC}^i\right)^*} - \dfrac{\left(S_{AB,0}^i\left(\dfrac{|V_{AB}^i|}{|V_{AB,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{AB}^i\right)^*} \\ \dfrac{\left(S_{CA,0}^i\left(\dfrac{|V_{CA}^i|}{|V_{CA,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{CA}^i\right)^*} - \dfrac{\left(S_{BC,0}^i\left(\dfrac{|V_{BC}^i|}{|V_{BC,0}^i|}\right)^n\right)^*}{\left(V_{BC}^i\right)^*} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A,shunt}^i \\ I_{B,shunt}^i \\ I_{C,shunt}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA}^i + Y_{AB}^i + Y_{AC}^i & -Y_{AB}^i & -Y_{AC}^i \\ -Y_{AB}^i & Y_{BB}^i + Y_{BC}^i + Y_{BA}^i & -Y_{BC}^i \\ -Y_{AC}^i & -Y_{BC}^i & Y_{CC}^i + Y_{CB}^i + Y_{CA}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A^i \\ V_B^i \\ V_C^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A^{ij} \\ \Delta V_B^{ij} \\ \Delta V_C^{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{Aa} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{Bb} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{A,Series}^i \\ I_{B,Series}^i \\ I_{C,Series}^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_{A,Series}^i \\ I_{B,Series}^i \\ I_{C,Series}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{Aa}^{se} & Y_{AB}^{se} & Y_{AC}^{se} \\ Y_{BA}^{se} & Y_{Bb}^{se} & Y_{BC}^{se} \\ Y_{CA}^{se} & Y_{CB}^{se} & Y_{Cc}^{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A^i \\ V_B^i \\ V_C^i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{Aa}^{se} & Y_{AB}^{se} & Y_{AC}^{se} \\ Y_{BA}^{se} & Y_{Bb}^{se} & Y_{BC}^{se} \\ Y_{CA}^{se} & Y_{CB}^{se} & Y_{Cc}^{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^j \\ V_b^j \\ V_c^j \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I_A^i \\ I_B^i \\ I_C^i \end{bmatrix} = [\overline{Y_{Shunt,ABC}} + \overline{Y_{Series}} \vdots -\overline{Y_{Series}}] \begin{bmatrix} V_A^i \\ V_B^i \\ V_C^i \\ V_a^j \\ V_b^j \\ V_c^j \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_A^i \\ I_B^i \\ I_C^i \\ I_a^j \\ I_b^j \\ I_c^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y_{Shunt,ABC}} + \overline{Y_{Series}} & -\overline{Y_{Series}} \\ -\overline{Y_{Series}} & \overline{Y_{Shunt,abc}} + \overline{Y_{Series}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A^i \\ V_B^i \\ V_C^i \\ V_a^j \\ V_b^j \\ V_c^j \end{bmatrix} \quad (7)$$

where

I_Y^X = Y-phase current of bus X

$S_{Y,0}^X$ = nominal Y-phase complex power for star connected load of bus X

V_Y^X = Y-phase voltage for star connected load of bus X

$V_{Y,0}^X$ = nominal Y-phase voltage for star connected load of bus X

$S_{Yy,0}^X$ = nominal Yy-phase complex power for delta connected load of bus X

V_{Yy}^{X} = Yy - phase voltage for delta connected load of bus X

$V_{Yy,0}^{X}$ = nominal Yy - phase voltage for delta connected load of bus X

$I_{Y,shunt}^{X}$ = Y - phase shunt current of bus X

Y_{Yy}^{X} = shunt admittance from phase Y to y of bus X

ΔV_{Y}^{Xx} = different voltage of phase Y from bus X to x

Z_{Yy} = series impedance from phase Y to y

$I_{Y,Series}^{X}$ = Y - phase series current of bus X

Y_{Yy}^{se} = series admittance from Y to y

$n \in [0,1,2]$ = ZIP load factor

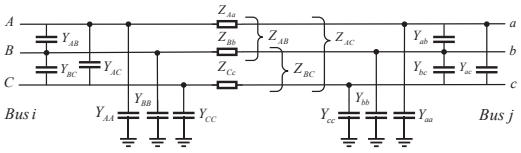


Fig. 1 pi model of distribution feeder

3. Adaptive Successive Over-Relaxation

Although multiple iterative techniques exist for solving power flow analysis, the Successive Over-Relaxation (SOR) method stands out for its superior convergence performance compared to the Gauss–Seidel method. SOR significantly accelerates the convergence process toward an accurate parameter. Since SOR builds on the Gauss–Seidel method, our approach begins by calculating the phase voltage at each bus iteratively. As illustrated in (8), during each iteration cycle, the updated phase voltage for a given bus, along with the most recent voltage data from other buses, is used to compute the voltage for the next phase and for the next bus within the same iteration. To fully leverage the acceleration provided by the SOR method, the voltage is updated once more before being utilized in the next iteration, as indicated in (9). The acceleration factor, denoted as ω, is defined to fall within the range $0 < \omega < 2$, which is a standard criterion for SOR methods [7]. However, rather than using a fixed ω, our research develops an approach called Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR) to dynamically adjust ω to its optimal value in each iteration. The optimal value is derived from the error vector, which represents the discrepancy between the current and preceding iterations, as delineated in (10). This approach facilitates the assessment of convergence and guides the iterative process toward improved accuracy.

$$\begin{bmatrix} V_A^{X(itr)} \\ V_B^{X(itr)} \\ V_C^{X(itr)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_{bus,AA}^{XX}} \left[I_A^{X(itr-1)} - Y_{bus,AB}^{XX} V_B^{X(itr-1)} - Y_{bus,AC}^{XX} V_C^{X(itr-1)} - \sum_{N=1}^{X-1} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,AP}^{XN} V_P^{X(itr)} - \sum_{N=X+1}^{NB} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,AP}^{XN} V_P^{X(itr-1)} \right] \\ \frac{1}{Y_{bus,BB}^{XX}} \left[I_B^{X(itr-1)} - Y_{bus,BA}^{XX} V_A^{X(itr)} - Y_{bus,BC}^{XX} V_C^{X(itr-1)} - \sum_{N=1}^{X-1} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,BP}^{XN} V_P^{X(itr)} - \sum_{N=X+1}^{NB} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,BP}^{XN} V_P^{X(itr-1)} \right] \\ \frac{1}{Y_{bus,CC}^{XX}} \left[I_C^{X(itr-1)} - Y_{bus,CA}^{XX} V_A^{X(itr)} - Y_{bus,CB}^{XX} V_B^{X(itr)} - \sum_{N=1}^{X-1} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,CP}^{XN} V_P^{X(itr)} - \sum_{N=X+1}^{NB} \sum_{P=A,B,C} Y_{bus,CP}^{XN} V_P^{X(itr-1)} \right] \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_A^{X(itr)} \\ V_B^{X(itr)} \\ V_C^{X(itr)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\omega) V_A^{X(itr-1)} + \omega V_A^{X(itr)} \\ (1-\omega) V_B^{X(itr-1)} + \omega V_B^{X(itr)} \\ (1-\omega) V_C^{X(itr-1)} + \omega V_C^{X(itr)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\omega = \frac{2}{1+\sqrt{1-(\max(\overline{V}^{(itr)} - \overline{V}^{(itr-1)}))^2}} \quad (10)$$

where

$Y_{bus,Yy}^{Xx}$ = bus admittance from phase Y to y of bus X to x

itr = Iteration factor

NB = number of total buses in network

ω = relaxation factor

$\overline{V}$ = matrix of network phase voltage

4. Simulation and Results

To validate the performance of the proposed algorithm, we tested it on a modified unbalanced IEEE-13 bus distribution system using data from [8]. The network was reconfigured to demonstrate a non-radial topology, as illustrated in Fig. 2. The ASOR algorithm was compared against the conventional Gauss–Seidel method and a standard SOR technique with fixed ω values. For the fixed SOR method, ω was set to 1.5, and 1.8, respectively.

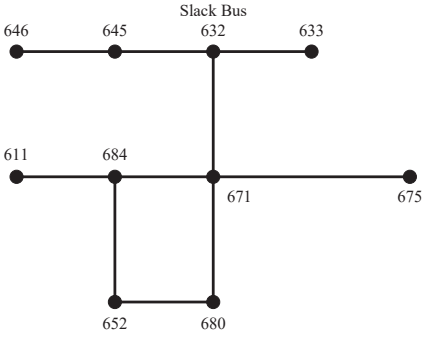


Fig. 2 modified non radial IEEE 13 bus network

We evaluated the performance of various iterative methods by conducting simulations across multiple iteration cycles and recording the maximum phase voltage difference at each iteration, referred to as the error rate, as shown in Table 1. The results reveal significant differences in convergence behavior among the tested methods. The Gauss–Seidel method exhibited the slowest error reduction, making it the least effective approach in terms of convergence speed. Among the fixed SOR methods, the rate of error reduction varied based on the chosen ω value—some values improved convergence, while others performed worse than the Gauss–Seidel method.

In contrast, the ASOR algorithm demonstrated superior convergence characteristics. The error rate decreased significantly faster compared to fixed SOR with ω = 1.8 and achieved performance comparable to fixed SOR with ω = 1.5 This advantage stems from ASOR's ability to dynamically adjust ω in each iteration based on the error vector, rather than relying on a predetermined fixed value. By continuously optimizing ω, ASOR effectively enhances stability and accelerates convergence, making it a more efficient and robust approach for solving non-radial, unbalanced power flow problems.

Furthermore, Fig. 3 illustrates the evolution of the computed error at each iteration using the Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR) method. As the number of iterations increases, the error consistently decreases, demonstrating a steady convergence toward the target solution. Unlike conventional fixed-relaxation methods, ASOR dynamically adjusts the relaxation factor (ω) at each iteration, optimizing the balance between convergence speed and numerical stability. This adaptive approach ensures that the solution progresses efficiently without the risk of divergence or excessive oscillations.

These findings confirm the superior convergence properties of ASOR, particularly in handling non-radial, unbalanced power flow problems. By minimizing voltage discrepancies more effectively than traditional iterative methods, ASOR enhances computational efficiency and stability, making it well-suited for complex power system analyses involving ZIP loads and Pi feeder models.

Table 1 Comparison of voltage error in each iteration from different iterative methods

Iteration	Gauss	SOR (ω = 1.5)	SOR (ω = 1.8)	ASOR
10	8.9911	16.8283	580.2499	11.1928
100	0.2309	0.0302	12.5220	0.2077
200	0.0052	2.42×10^{-5}	4.8941	0.0004
500	1.11×10^{-7}	9.47×10^{-9}	0.3325	9.66×10^{-9}

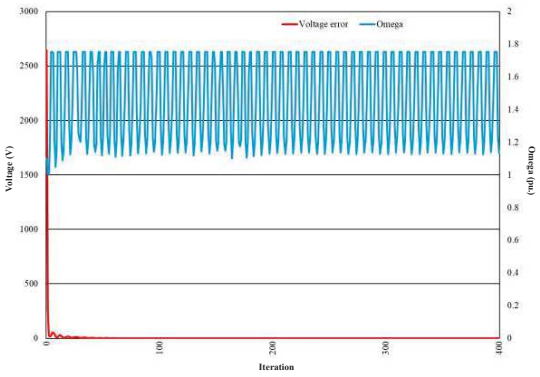


Fig. 3 voltage error and omega value of each iteration using ASOR

5. Conclusion

This research introduces a novel approach for power flow analysis in non-radial unbalanced distribution systems, termed the Adaptive Successive Over-Relaxation (ASOR) method. The proposed method was validated using a modified IEEE 13-bus network, which features a non-radial topology. The results show that ASOR converges significantly faster than Gauss–Seidel and fixed-SOR with ω = 1.8. A well-tuned fixed-SOR (ω = 1.5) does reduce error slightly faster than ASOR during the first 10–200, but by the 500th iteration both methods reach nearly identical error levels. ASOR's key strength is its automatic, iteration-by-iteration adjustment of ω, eliminating manual tuning. This study is limited to one small test system and does not benchmark ASOR against other advanced solvers or larger, more complex networks. Future work will therefore evaluate ASOR across diverse distribution configurations to confirm its scalability and competitiveness.

References

[1] W. D. Stevenson and J. J. Grainger, Power System Analysis. McGraw-Hill, USA.
[2] B. Jangid and S. Ghosh, "Load Flow Using Backward Forward Sweep," IJCA, ICAET 2017, no. 5, 2017.
[3] S. S. Ram et al., "ZIP Load Modeling in Transmission System," Int. J. Control Autom., vol. 11, pp. 11–24, 2018.
[4] B. Sereeter et al., "Newton Method for 3-Phase Networks," Energies, vol. 10, no. 10, p. 1658, 2017.
[5] S. Bozhko et al., "Accelerated Simulation of Aircraft Power Systems," SAE AeroTech, Toulouse, France, Oct. 2011.
[6] M. Mo and N. Hang, "Fault Analysis Using Iterative Method," J. Electr. Eng. Technol., vol. 14, no. 3, pp. 1429–1440, 2019.
[7] N. Ahmad and F. Shaheen, "SOR Algorithm for Linear Systems," Commun. Math. Appl., vol. 12, pp. 853–867, 2021.
[8] A. Garces, "Three-Phase Load Flow for Distribution," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, pp. 827–828, 2016.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

แบบจำลองการใช้งานบล็อกเชนกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ภายใต้แนวคิด ความเป็นกลางทางคาร์บอน

A Simulation of Solar Power Plant by using Blockchain at Thammasat University Under Carbon Neutrality

เบญจมาภรณ์ ภูมี[1*] นรุตม์ชัย ทรัพย์เจริญกูล[1] ปุรเชษฐ์ ตราหยก[1] พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[1] และ วรรัตน์ ปัตรประกร[2]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

E-mail: Benjamaporn.pum@dome.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop)ตามอาคารต่างๆที่มีขนาดกำลังการผลิต 9,492.46 kWp แต่ด้วยข้อจำกัดเงื่อนไขข้อจำกัดระเบียบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทำให้บางช่วงเวลามีการผลิตไฟฟ้าได้เกินความต้องการ โดยคิดเป็นร้อยละ 7.48 ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ ดังนั้นบทความนี้เป็นการนำเสนอแบบจำลองการใช้งานบล็อกเชนกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ภายใต้แนวความคิดความเป็นกลางทางคาร์บอน เพื่อนำพลังงานส่วนเกินมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ผลจากการใช้แบบจำลองพบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 5.98 และยังส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยอยู่ที่ 3.91 บาทต่อหน่วย จากราคาเดิม 4.17 บาทต่อหน่วยซึ่งมีค่าลดลงจากค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยเดิมอยู่ที่ร้อยละ 6.01

Abstract

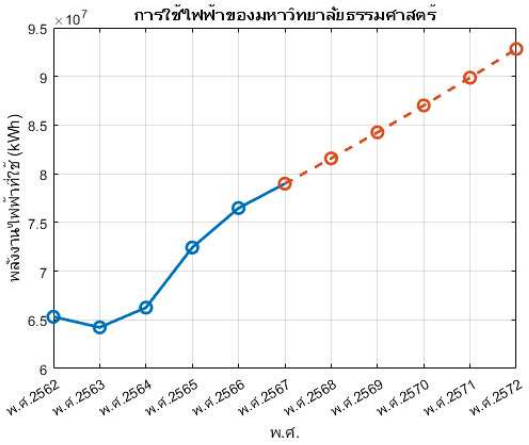
Thammasat University, Rangsit Campus, has installed a solar power generation system (Solar Rooftop) on various buildings with a total capacity of 9,492.46 kWp. However, due to the limitations imposed by the Provincial Electricity Authority and internal regulations at Thammasat University, there are periods when the electricity generation exceeds demand, accounting for 7.48% of the total generated electricity. Therefore, this article presents a model for utilizing blockchain technology with the solar power generation system at Thammasat University, Rangsit Campus, under the concept of carbon neutrality. The aim is to make the most of excess energy. The results of using the model show that electricity consumption decreased by up to 5.98%, and the average electricity bath per kWp was 3.91 THB, compared to the original price of 4.17 THB per unit, reflecting a reduction of 6.01%.

1. บทนำ

ปัจจุบันแนวโน้มการใช้พลังงานสะอาดมีมากขึ้น เพื่อส่งเสริมการผลิตและใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนโดยส่งเสริมให้มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนและลดปัญหาโลกร้อน ตามนโยบายรัฐบาลและสอดคล้องกับ แผนอนุรักษ์พลังงาน ในปี พ.ศ. 2561-2580 (Energy Efficiency Plan: EEP2018) มีเป้าหมายในการลดความเข้มข้นการใช้พลังงาน(Energy Intensity : EI) ในประเทศลงร้อยละ 36 ของประเทศไทย [1] และนโยบายรัฐบาลสอดคล้องกับ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในระยะยาว 15 -20 ปี (Thailand Power Development Plan: PDP) [2] เพื่อสร้างความมั่นคงและความเพียงพอของกำลังการผลิตไฟฟ้า โดยคำนึงถึงนโยบายพลังงานของประเทศและปัจจัยต่าง ๆ และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อผลประโยชน์ร่วมในด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกในปี พ.ศ. 2561-2580 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2018) มีเป้าหมายในการส่งเสริมการผลิตพลังงานทดแทนที่มีอยู่ภายในประเทศให้ได้เต็มตามศักยภาพด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม เพื่อผลประโยชน์ร่วมในมิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน [3] และ พ.ร.บ.ใบประกอบกิจการพลังงาน ปี พ.ศ. 2550 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตมีแนวคิดติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดย

เริ่มติดตั้งปี พ.ศ. 2559 มีขนาดกำลังการผลิต 9,492.46 kWp อย่างไรก็ตามมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตมีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 1 แต่จะมีในช่วงปี พ.ศ. 2563 ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเนื่องจากสถานการณ์โควิด-19 ที่ส่งผลให้มหาวิทยาลัยไม่สามารถเปิดทำการเรียนแบบปกติได้ แต่เปลี่ยนรูปแบบการเรียนการสอนเป็นออนไลน์แทน หลังจากนั้นจากในปี พ.ศ.2563-2566 ก็จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 3.28 และในปี พ.ศ. 2566 มีการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 76.48 ล้านหน่วย มีค่าไฟฟ้าปีละ 324.85 ล้านบาท คิดเป็นร้อยละ 0.038 ของประเทศไทย โดยได้รับไฟฟ้าจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar rooftop) ทั้งหมด 15.80 ล้านหน่วย

อาคารในมหาวิทยาลัยประกอบด้วยกลุ่มอาคารทั้งหมด 50 กลุ่มอาคาร โดยพบว่ามีกลุ่มอาคารที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 17 กลุ่มอาคาร และ11 กลุ่มอาคารที่มีปริมาณไฟฟ้าเหลือจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเงื่อนไขข้อจำกัดระเบียบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต เพื่อเป็นการพัฒนาการบริการด้านพลังงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้พลังงานส่วนเกินมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการนำพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินจากการใช้งานมาจัดทำระบบการซื้อ-ขายพลังงานไฟฟ้าระหว่างอาคารโดยมีบล็อกเชนเข้ามาเป็นสื่อกลางในการเก็บข้อมูลและมีความยุติธรรมกับผู้ซื้อไฟฟ้าและผู้ขายไฟฟ้า



รูปที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตในปี พ.ศ.2562 -พ.ศ.2567 และการประมาณการใช้ไฟฟ้าจนถึงปี พ.ศ. 2572

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์จะมีการคิดค่าใช้จ่ายในแต่ละรายเดือนตามอัตราค่าไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยที่จะไม่มีการคิดค่าใช้จ่ายในของค่าความต้องการไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 1

$$Total\ cost_{sm} = \sum_{b=1}^{17}[((E_p * r_p) + (E_{op} * r_{op})) * d_r * vat_r] \quad (1)$$

โดยที่ $Total\ cost_{sm}$ = ค่าไฟฟ้าของโซล่าเซลล์ (บาท)

E_p = หน่วยของพลังงานไฟฟ้าของโซล่าเซลล์ที่ใช้ในช่วง Peak (หน่วย)

r_p = ราคาในช่วง Peak 4.1839 (บาท/หน่วย)

E_{op} = หน่วยของพลังงานไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่ใช้ในช่วง Off – Peak (หน่วย)

r_{op} = ราคาในช่วง Off – Peak 2.6037 (บาท/หน่วย)

vat_r = 1.07 (คิดที่ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 %)

d_r = ส่วนลดที่ทางผู้ติดตั้ง Solar Rooftop ให้กับแต่ละอาคาร ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 0.9

สำหรับการคำนวณค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ 2

$$\text{ราคาเฉลี่ยต่อหน่วย} = \frac{Total\ cost_{sm} + Total\ cost_{PEA}}{E_p + E_{op} + E_{PEA}} \quad (2)$$

โดยที่ $Total\ cost_{PEA}$ = ค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้า (บาท)

E_{PEA} = หน่วยของพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้า (หน่วย)

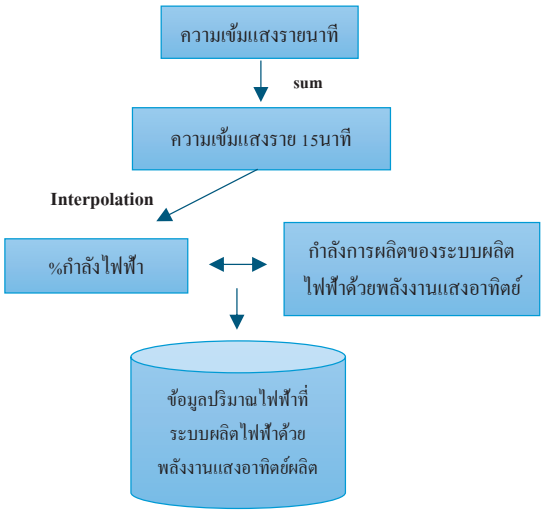
2.2 เทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain)

เทคโนโลยีบล็อกเชนปัจจุบันได้มีการนำบล็อกเชนมาใช้งานมากขึ้น เช่น การซื้อ-ขายหุ้น สถาบันการศึกษา [4] ในการศึกษานี้จึงนำความสามารถของเทคโนโลยีบล็อกเชนมาประยุกต์ใช้การจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเป็นแพลตฟอร์มในการซื้อ-ขายไฟฟ้าที่ไม่ผ่านคนกลาง จึงมีความยุติธรรมกับผู้ซื้อไฟฟ้าและผู้ขายไฟฟ้าในการกำหนดราคาในการซื้อ-ขาย และมีความปลอดภัยสูง

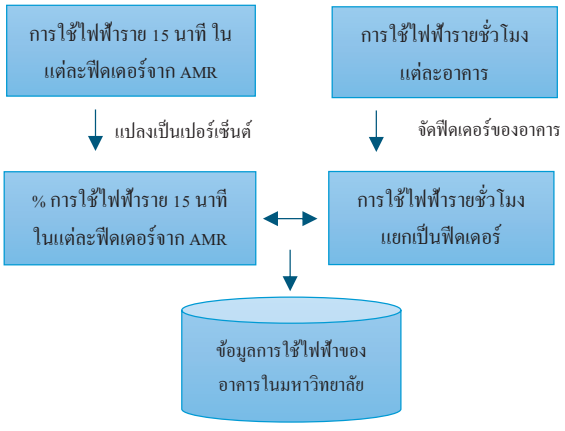
3. วิธีการดำเนินการ

3.1 จำลองฐานข้อมูล

การจัดทำฐานข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop) ที่ผลิตได้ และข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของอาคารในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จำนวน 50 กลุ่มอาคาร โดยแสดงการจัดทำเป็นแผนภาพ ตามรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



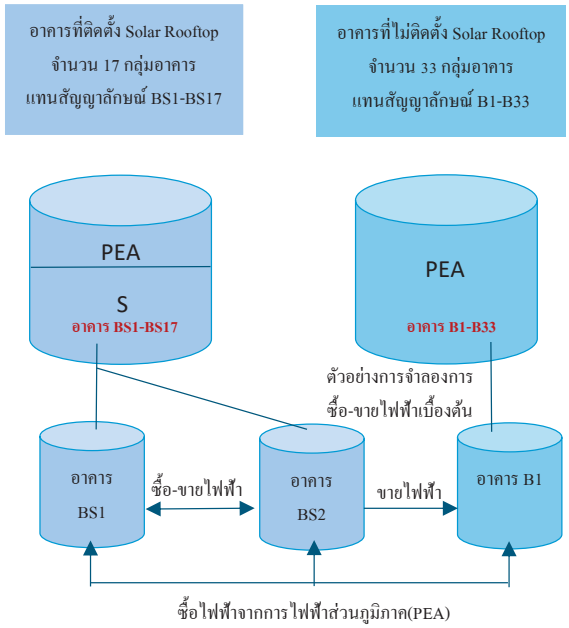
รูปที่ 2 แผนภาพการจัดทำฐานข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop) ที่ผลิตได้



รูปที่ 3 แผนภาพการจัดทำฐานข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของอาคารในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

3.2 จำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้า ด้วยเทคโนโลยีบล็อกเชน

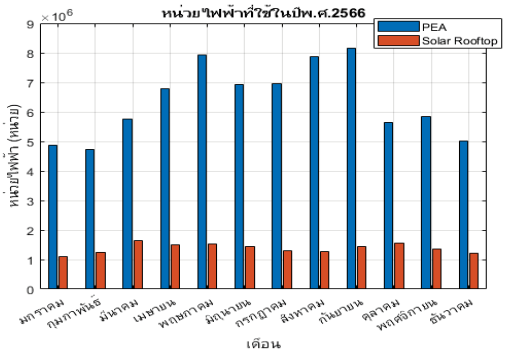
ในการจัดทำการจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต จะมีการกำหนดราคาและปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการซื้อ-ขาย ในกรณีของผู้ขายไฟฟ้าเป็นอาคารที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop) จะสามารถกำหนดราคาในการขายไฟฟ้าเป็นราคาเฉลี่ยต่อหน่วยเท่าใดก็ได้ และในกรณีผู้ซื้อไฟฟ้าอาคารที่สามารถซื้อไฟฟ้าได้มีทั้งอาคารที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา(Solar Rooftop)และอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง สามารถซื้อปริมาณไฟฟ้าที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งาน โดยจัดทำเป็นแผนภาพการจำลองระบบซื้อ-ขายไฟฟ้า ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพการจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้า

4. ผลลัพธ์

ในการศึกษานี้ใช้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาและปริมาณการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของอาคารต่างๆในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต รายเดือนในปี พ.ศ. 2566 มาเป็นข้อมูลในการจำลองการซื้อ-ขาย ดังรูปที่ 5 และได้มีการนำเสนอฉากทรรศน์ประกอบการจำลองระบบแยกเป็น 2 กรณี ที่มีการพิจารณาสภาพอากาศและเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้าเพื่อรองรับปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้ในปี พ.ศ. 2566

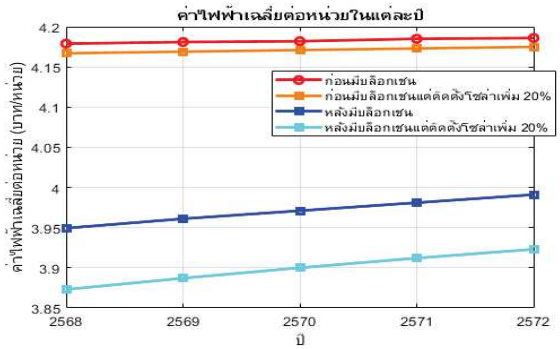
กรณีที่ 1 เป็นการจำลองในกรณีที่กำหนดการซื้อ-ขายไฟฟ้าในสภาวะที่ฝนตกแตกต่างกัน โดยจะเป็นการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยที่เกิดในกรณีที่ฝนตกแตกต่างกันโดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ 1. กรณีฝนตกน้อย 2. กรณีฝนตกปกติ 3. กรณีฝนตกมาก ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562-2566

ตารางที่ 1 ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยในสภาวะที่ฝนตกแตกต่างกัน

ปี	ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยในกรณีที่ฝนตกแตกต่างกัน (บาท/หน่วย)					
	ก่อนมีบล็อกเชน			หลังมีบล็อกเชน		
	น้อย	ปกติ	มาก	น้อย	ปกติ	มาก
พ.ศ.2562	4.182	4.189	4.207	3.871	3.912	4.012
พ.ศ.2563	4.173	4.180	4.198	3.854	3.875	3.978
พ.ศ.2564	4.091	4.096	4.107	3.818	3.853	3.933
พ.ศ.2565	4.199	4.207	4.227	3.800	3.847	3.964
พ.ศ.2566	4.169	4.175	4.190	3.887	3.924	4.014

จากตารางที่ 1 จะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ฝนตกน้อยจะมีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยลดลง เนื่องจากเมื่อฝนตกน้อยจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ไฟฟ้าที่ใช้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลดลง แต่เมื่อฝนตกมากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะผลิตได้น้อยลง ทำให้ต้องซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยมีราคาที่มากขึ้น

กรณีที่ 2 เป็นการจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้าในกรณีที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มร้อยละ 20 จากฐานข้อมูลในปี พ.ศ. 2566 โดยจะเป็นการติดตั้งเพิ่มโดยใช้ค่าในการพยากรณ์จากปี พ.ศ.2568 - พ.ศ.2572 เพื่อจำลองค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย



รูปที่ 6 ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยในกรณีที่ติดตั้ง Solar Rooftop เพิ่ม

จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อมีการติดตั้ง Solar Rooftop เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไฟฟ้าที่เหลือในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถส่งไปขายในแต่ละอาคารต่างๆได้มากขึ้น ทำให้ใช้ไฟฟ้าที่มาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลดลง ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยมีค่าลดลง

5. สรุป

จากการจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้าระหว่างอาคารในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต พบว่าในการนำพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการใช้งานมาสร้างแบบจำลองการซื้อ-ขายไฟฟ้าระหว่างอาคาร โดยนำเทคโนโลยีบล็อกเชนเข้ามาเป็นแพลตฟอร์มในการซื้อ-ขายไฟฟ้าให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 5.98 และยังส่งผลให้ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยอยู่ที่ 3.91 บาทต่อหน่วยซึ่งมีค่าลดลงจากค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วยเดิมอยู่ที่ร้อยละ 6.01 เนื่องจากเทคโนโลยีบล็อกเชนเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ผ่านคนกลาง จึงมีความยุติธรรมกับผู้ซื้อไฟฟ้าและผู้ขายไฟฟ้าในการกำหนดราคาในการซื้อ-ขายและมีความปลอดภัยสูง ทำให้การใช้ไฟฟ้าในมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต เกิดการใช้งานที่คุ้มค่าและช่วยเป็นการนำพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เหลือมาใช้งานให้เกิดรายได้ให้กับองค์กร

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน, “แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2561 (Energy Efficiency Plan 2018),” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพมหานคร, 2561.

[2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, “ แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย,” กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพมหานคร, 2562.

[3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, “แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561,” กระทรวงพลังงาน, กรุงเทพมหานคร, 2561.

[4] นายวิบูลย์ ภัทรพิบูล และนายพิสิษฐ์ ปิยพสุนทรา, “การใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนสำหรับภาครัฐ,” กรุงเทพฯ: สำนักงานพัฒนาดิจิทัล, 2564.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารพิพิธภัณฑ์ด้วยการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่าง กรณีศึกษา ห้องจัดแสดงในอาคารจัดแสดงเครื่องทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา

Evaluation of energy conservation potential of lighting systems in museum buildings by analyzing illuminance values in Museum Buildings Case study: Exhibition Room in Gold Exhibition Building, Chao Sam Phraya National Museum

วิกร วงษ์เสถียร[1] วราภรณ์ ลือใจ[1] สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] ตฤณภพ บุญเส็ง[1] และ นิยวดี ศรีสุวรรณ[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: niyawadee.s@rmutsb.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่างในอาคารพิพิธภัณฑ์ กรณีศึกษา อาคารจัดแสดงเครื่องทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา ด้วยการตรวจวัดค่าความส่องสว่างร่วมกับการใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างของพื้นที่จัดแสดง การศึกษานี้จัดแบ่งพื้นที่ตามห้องจัดแสดงออกเป็น 6 พื้นที่ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่จัดแสดง 3 พื้นที่ที่มีค่าความส่องสว่างที่ชิ้นงานสูงกว่าเกณฑ์ และ 3 พื้นที่ที่ค่าความส่องสว่างเฉลี่ยของพื้นที่โดยรอบสูงเกินกว่าเกณฑ์ ผู้วิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างทำการจำลองฉากด้วยการเปลี่ยนชนิดโคมไฟเพื่อลดค่าความส่องสว่างเป็นไปตามเกณฑ์ ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 1,774.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี เพื่อนำผลไปนำเสนอต่อสำนักงานพิพิธภัณฑ์นำไปใช้เป็นแนวทางดำเนินการของสำนักงานพิพิธภัณฑ์ต่อไป

คำสำคัญ: การอนุรักษ์พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง, ค่าความส่องสว่าง, ซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง, พิพิธภัณฑ์

Abstract

This study investigates the potential for energy conservation within the lighting system of a museum environment, focusing on a case study of the Gold Ornaments Exhibition Hall at the Chao Sam Phraya National Museum. The evaluation combined in-situ illuminance measurements with computational modeling conducted via illumination design software to assess the lighting conditions across different exhibition areas. The exhibition space was categorized into six distinct zones corresponding to the museum's layout. The results indicated that three zones exhibited artifact illuminance levels exceeding recommended standards, while an additional three zones demonstrated average ambient illuminance levels surpassing acceptable thresholds. To mitigate these issues, computer simulations were employed to redesign the lighting layout by replacing existing luminaires with higher-efficiency alternatives and optimizing lighting angles to comply with illuminance standards. These interventions are estimated to yield an annual energy savings of approximately 1,774.08 kilowatt-hours. The findings provide actionable recommendations for the museum's management on implementing energy conservation measures, promoting sustainable operation, and supporting the long-term preservation of valuable cultural heritage collections.

Keywords: energy conservation in lighting systems, Illuminant. illumination design software , museum

1. บทนำ

หลักการที่สำคัญในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง คือ การใช้แสงสว่างให้มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือใช้แสงสว่างในบริเวณอย่างเพียงพอทั้งปริมาณและคุณภาพ แนวทางการดำเนินการประกอบไปด้วย การเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง การนำระบบควบคุมมาใช้และการใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติในเวลากลางวัน [1] การนำซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างมาใช้นอกจากเพื่องานออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่างแล้ว สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ด้านพลังงานค่าทางไฟฟ้าและคุณภาพแสงสว่าง เพื่อนำเสนอแนวทางการอนุรักษ์พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่าง [2] พิพิธภัณฑ์จัดเป็นภาคอาคารตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน โดยอาคารจัดแสดงเครื่องทอง พิพิธภัณฑ์เจ้าสามพระยา จัดเป็นพิพิธภัณฑ์ประเภทเน้นวัตถุที่มีคุณค่า ซึ่งจัดแสดงเครื่องทองซึ่งเป็นวัตถุที่มีคุณค่าเป็นหลัก (Objected Centered Museum) แบ่งพื้นที่การจัดแสดงออกเป็น ส่วนแรก จัดแสดงเครื่องทองจากกรุวัด

ราชบูรณะที่เกี่ยวข้องกับทางโลก ส่วนที่สอง จัดแสดงเครื่องทองทางธรรม และส่วนที่สาม จัดแสดงเกี่ยวกับคติการบรรจุพระบรมสารีริกธาตุ [3] ประเภทการให้แสงสว่างพื้นที่จัดแสดงของพิพิธภัณฑ์ แบ่งเป็น กลุ่มแรกคือการให้แสงธรรมชาติ (Daylight) ที่ผ่านเข้ามาทางช่องแสง สามารถช่วยค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลงได้ ให้แสงที่นุ่มนวล กลุ่มที่สองคือการให้แสงไฟฟ้า (Electric Light) ที่มีข้อเด่นคือสามารถควบคุมได้ง่าย อีกทั้งปัจจุบันมีเทคนิคการควบคุมแสงสว่างที่หลากหลาย ส่วนการให้แสงกลุ่มสุดท้ายคือการให้แสงธรรมชาติร่วมกับ
แสงไฟฟ้า (Daylight and Electric Light) [4]

จากการศึกษา พบว่า การออกแบบแสงสว่างในอาคารพิพิธภัณฑ์รวมทั้งหอศิลป์ ควรคำนึงถึงค่าความส่องสว่างที่เหมาะสมสอดคล้องตามที่เกณฑ์กำหนดซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญของการออกแบบ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของชิ้นงานที่จัดแสดง การจำลองสภาพแสงสว่างตามแบบติดตั้งด้วยซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง ทำให้ทราบถึงสภาพแสงสว่าง ค่าความส่องสว่าง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์การส่องสว่าง ทำให้พบข้อบกพร่อง และได้เสนอแนะแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพแสงสว่างในห้องจัดแสดงแต่ละห้องที่บกพร่องด้วย [5] สำหรับการศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของระบบไฟฟ้าแสงสว่างโดยการนำซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างมาช่วยวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดค่าด้วยเครื่องมือ แนะนำผลการวิเคราะห์มาออกแบบมาตรการอนุรักษ์พลังงานด้วยการปรับปรุงอุปกรณ์แสงสว่างทุกห้องและการปรับปรุงอุปกรณ์แสงสว่างเฉพาะห้องที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [6]

2. การดำเนินการศึกษา

จุดประสงค์ของการศึกษานี้ คือประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ของพื้นที่จัดแสดงอาคารจัดแสดงเครื่องทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา

ขอบเขตการดำเนินการ คือประเมินค่าความส่องสว่างภายในห้องจัดแสดง 2 ส่วน คือ 1) Working Plane คือชิ้นงานจัดแสดงภายในตู้กระจกใส และรูปภาพ และ 2) Surrounding Area คือพื้นที่เดินชมภายในห้องจัดแสดง โดยตัวแปรหลักที่ใช้ประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน คือ ค่าความส่องสว่างที่คงอยู่ หรือ $\bar{E}_m$ (Maintain Illuminant; Lux) ค่าสูงสุด หรือ E_{max} (Maximum Illuminant; Lux) และต่ำสุด หรือ E_{min} (Minimum Illuminant; Lux)

กรณี $\bar{E}_m$ ที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์จะนำเสนอปรับให้เพิ่มค่าเพื่อความเหมาะสม แต่หากสูงเกินกว่าเกณฑ์ จะเสนอแนะแนวทางลดค่าความสว่างด้วยการเปลี่ยนไปใช้โคมไฟที่ประสิทธิภาพด้านพลังงานไฟฟ้าดีกว่า โดยเกณฑ์ค่า $\bar{E}_m$ ใช้ดังนี้

- Working Plane ซึ่งคือค่าความส่องสว่างของวัตถุจัดแสดงจำแนกตามประเภทวัสดุชิ้นงาน กรณีแสงสว่างส่งผลกระทบสูง (เช่น ภาพเขียนสีน้ำ ภาพพิมพ์ ภาพวาดเส้น สิ่งทอ) ไม่เกิน 50 Lux กรณีปานกลาง (เช่น ภาพเขียนสีน้ำมัน สีฝุ่น) ไม่เกิน 200 Lux และกรณีผลกระทบต่ำ (เช่น หินโลหะ กระจก) ไม่ระบุค่า

- Background Area ซึ่งคือค่าความส่องสว่างพื้นที่โดยรอบใช้ 50 – 300 lux [7]

ในการศึกษาที่อาคารจัดแสดงเครื่องทองนี้ แบ่งพื้นที่การประเมินเป็น 6 Zone ประกอบด้วย Zone 1 ชั้น 1 คือห้องนิทรรศการภาพและห้องจัดแสดงชั้นที่ 2 Zone 2 ถึง 6

ช่วงเวลาที่ตรวจวัดอยู่ระหว่างวันที่ 18 ถึง 27 ธันวาคม 2567 ช่วงเวลา 10.00 - 15.00 น. เมื่อจำลองการส่องสว่างด้วยซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างคอมพิเตอร์ใช้ค่าที่สอดคล้องกับสภาพจริง เช่น ค่าการสะท้อนของเพดาน ผนัง พื้น และวัตถุใช้ค่า 0.7, 0.5, 0.3 และ 0.25 ค่าบำรุงรักษา ใช้ 0.8 สัดส่วนใช้งาน ใช้ 1.0 ตำแหน่งที่ตั้ง ใช้กรุงเทพฯ ประเทศไทย วันและเวลา ใช้เดือนธันวาคม เวลา 13.00

ผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบข้อมูลด้านแสงสว่าง คือ ค่าความส่องสว่างที่ใช้ใช้ในปัจจุบันต่ำหรือสูงกว่าเกณฑ์ ข้อมูลด้านปริมาณพลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างที่ใช้งานอยู่ เพื่อนำไปสู่การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง ตัวแปรค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการประเมินผลประหยัดที่จะเกิดขึ้นประกอบไปด้วย

$$E_{\$} = \text{OAHEE=J } 2_{kH} \times @ \times *_E \quad (1)$$

$$'_{Project,\ E} = 2_{ew} \times *_E \quad (2)$$

$$'_E \ '_{\$} = \text{OAHEEFJ } '_{Project,\ E} \quad (3)$$

เมื่อ $'_E$ คือ ผลประหยัดต่อเดือนของเดือน E (kWh) ซึ่งสามารถประเมินเป็นผลประหยัดต่อปีต่อไป

$'_{\$} = \text{OAHEEZJ } '_{Project,\ E}$ คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่กรณีฐานและกรณีดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานในเดือน i (kWh)

2_{kH} และ 2_{ew} คือ กำลังไฟฟ้ารวมต่อพื้นที่ของชุดโคมไฟเดิมและโคมไฟตามมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่นำแสนอ (kW)

$*_E$ คือ จำนวนชั่วโมงใช้งานในเดือน E

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการประเมินค่าความส่องสว่าง

ผลการศึกษา แสดงตัวอย่างของพื้นที่ Zone 2 ชั้น 2 ของอาคาร โดยข้อมูลทั่วไปของห้อง แสดงดังรูปที่ 1

- งานสถาปัตยกรรม ผนังเป็นผ้ากำมะหยี่สีแดงเลือดหมู ฝ้าเพดาน สีขาวขุ่น พื้น เป็นพื้นกระเบื้องสีขาวขุ่น ตู้กระจกจัดแสดงพื้นกำมะหยี่สีแดงเลือดหมู จัดแสดงเป็นเครื่องทองคำ

- สภาพแวดล้อมด้านแสงภายใน ความสว่างโดยรวมมาจากหลอดไฟทั้งหมด ไม่มีจากแสงธรรมชาติ

- โคมแสงสว่าง เป็น Downlight LED 30W ติดตั้งจำนวน 20 โคม และ Traplights LED 30 W ติดตั้งจำนวน 44 โคม

- ผลการวัดค่าความส่องสว่างด้วยเครื่องมือวัด พบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียงกัน ดังแสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบ จำนวน 10 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2

- ในการประเมินการประหยัดพลังงานใช้ผลจากการจำลองจากซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง แสดงดังรูปที่ 3 ได้ค่าความส่องสว่าง $_m$6 มีค่า 462 Lux (E_{max} = 94, E_{min} = 1,685 Lux)

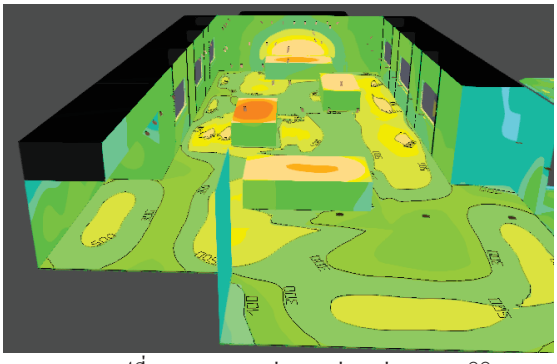


รูปที่ 1 สภาพห้องจัดแสดงห้องเครื่องทองพระจักรพรรดิราช (Zone 2)

- การประเมินค่าความส่องสว่างของชิ้นงาน ซึ่งเป็นวัสดุโลหะภายในตู้จัดแสดงกระจกใสนั้น เนื่องจากข้อจำกัดในการวัดด้วยเครื่องมือวัด จึงใช้การจำลองด้วยซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง สำหรับ Zone 2 จำนวน 10 จุด จากรูปที่ 3 คือ ตู้ 2/1 ถึง 2/10 ได้ค่าความส่องสว่างระหว่าง 1,000 - 1,760 Lux



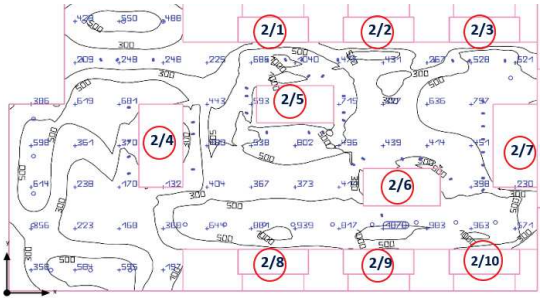
รูปที่ 2 ตัวอย่างค่าความส่องสว่างพื้นที่จัดแสดง Zone 2 เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการวัดกับค่าจากซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง



รูปที่ 3 การแสดงผลค่าความส่องสว่างแบบ 3 มิติของพื้นที่จัดแสดง Zone 2

3.2 ผลการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน

การนำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงาน เนื่องจาก Zone 2 ซึ่งชิ้นงานจัดแสดงอยู่ในกรณีผลกระทบต่ำ (เช่น หินโลหะ กระจก) ไม่ระบุค่า อย่างไรก็ตามจากมาตรการการเปลี่ยนโคมไฟที่เส้นแรงแสว่างลดลง ทำให้ค่าความส่องสว่าง Working plane ลดลง แสดงดังตารางที่ 1 ส่วน Surrounding Area ซึ่งกำหนด 50-300 Lux จากการประเมิน $\bar{E}_m$ กรณี Baseline เท่ากับ 437 Lux ดังนั้นการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานกรณีนี้ เพื่อความสะดวกจะใช้จำนวนโคมเท่าเดิม และจากการค้นหาโคมไฟทดแทนที่อุณหภูมิสีเท่าเดิม เป็นโคมที่ใช้แรงดันไฟฟ้า 220 V ผลการค้นหาจึงได้โคม Downlight กำลังไฟฟ้า 25 W และเส้นแรงแสงสว่าง 2,450 Lumen และ Traplight กำลังไฟฟ้า 20 W และเส้นแรงแสงสว่าง 2,680 Lumen โดยประมาณการจากเวลาเปิดบริการ 8 ชั่วโมงต่อวัน 22 วันต่อเดือน ทำให้ประเมินผลกรณี Energy Conservation ได้ $\bar{E}_m$ เท่ากับ 292 Lux การใช้พลังงานลดลง 798 kWh/year โดย Power Density ลดลง 1.53 W/m^2



รูปที่ 3 ค่าความส่องสว่างพื้นที่จัดแสดง Zone 2

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบชนิดโคมไฟ ค่าความส่องสว่าง และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ระหว่างสถานะปัจจุบัน กับมาตรการอนุรักษ์ที่นำเสนอของพื้นที่จัดแสดง Zone 2

Details		Baseline	Energy Conservation
Luminaire	1) Downlight, 20 Set	30 W, 2,658 Lumen	25 W, 2,450 Lumen
	2) Traplight, 44 Set	30 W, 3,000 Lumen	20 W, 2,680 Lumen
Working plane; $\bar{E}_m$		1,000 - 1,760 Lux	865 - 1,480 Lux
Surrounding Area; $\bar{E}_m$		437 Lux	292 Lux
Energy Estimation	Consumption	3,842 kWh/year	3,044 kWh/year
	Power Density	6.12 W/m^2	4.59 W/m^2

ผลการจำลองประเมินค่าความส่องสว่างของพื้นที่จัดแสดง 6 Zone ดังตารางที่ 2 พบว่า Working plane ที่ค่าความส่องสว่างเกินจากเกณฑ์ ได้แก่ Zone 1, 3 และ 5 เป็นภาพพิมพ์ (ผลกระทบสูงไม่เกิน 50 Lux) ส่วน Surrounding Area ได้แก่ Zone 1, 2 และ 4 เมื่อประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานโดยใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างจำลองฉากที่ให้ค่าความส่องสว่างไม่เกินเกณฑ์ โดย Zone 3 และ 5 ได้

จำลองการปรับมุม Traplight เพื่อลดแสงที่ส่องโดยตรงไปยังภาพจัดแสดง ทำให้ค่าความส่องสว่างลดลงไม่เกิน 50 Lux ส่วน Zone 1, 2 และ 4 ได้นำเสนอมาตรการอนุรักษ์พลังงานโดยการเปลี่ยนโคมที่เส้นแรงแสงสว่างลดลง ซึ่งจะเกิดผลโดยตรงต่อค่าความส่องสว่างที่ลดลงทั้ง Working plane และ Surrounding Area และเพื่อลดการใช้กำลังไฟฟ้า ดังแสดงตัวอย่างตัวอย่างของ Zone 2 ผลการประเมิน แสดงดังตารางที่ 3 โดยทั้ง 3 Zone เมื่อนำมาตรการไปดำเนินการแล้วสามารถลดพลังงานไฟฟ้าลงได้ 147.84 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือ 1,774.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี

ตารางที่ 2 ค่าความส่องสว่างและดัชนีแสงจ้าจากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่าง

Exhibition Zone	Area (m^2)	Illuminant (Lux)	
		Working plane	Surrounding Area
1. ห้องจัดแสดงรูปภาพ	60	134 – 208*	353**
2. เครื่องทองพระจักรพรรดิราช	314	1,000 - 1,760	437**
3. โถงทางเชื่อม 1 จัดแสดงภาพ	36	30 – 60*	34
4. เครื่องทองพระธรรมิราช	154	500 – 750	309**
5. โถงทางเชื่อม 2 จัดแสดงภาพ	30	30 – 80*	32
6. เครื่องทองทางธรรม	432	500 - 1000	195

หมายเหตุ *, ** คือ ค่าความส่องสว่างสูงเกินเกณฑ์

ตารางที่ 3 ผลการประเมินผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากมาตรการที่นำเสนอของพื้นที่จัดแสดง Zone 1, 2 และ 4

Zone	Illuminant **(Lux)**		Energy Consumption	
	Working plane	Surrounding Area	kWh/m	kWh/y
1	48 - 62	244	33.79	405.50
2	865 - 1,480	292	84.48	1,013.76
4	410 - 620	266	29.57	354.82
Total			147.84	1,774.08

4. สรุป

การจำลองสภาพการส่องสว่างด้วยซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างสามารถให้ผลใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัด ทำให้นำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างถูกต้อง [5] รวมถึงการประมาณค่าความส่องสว่างของวัสดุจัดแสดงที่อยู่ในตู้กระจกที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงของการศึกษาครั้งนี้

สำหรับการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง ซอฟต์แวร์ออกแบบการส่องสว่างสามารถประมวลผลการจำลองการเลือกใช้ชนิดและติดตั้งโคมไฟได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบ ช่วยให้ออกแบบมาตรการการอนุรักษ์พลังงานได้เป็นอย่างดี สำหรับมาตรการอนุรักษ์พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างนั้น เป็นประเภทมาตรการที่สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารได้อย่างเป็นรูปธรรม **[2], [6]**

อย่างไรก็ตามการศึกษาครั้งนี้ดำเนินการเฉพาะส่วนจัดแสดงตามความต้องการของเจ้าของพื้นที่เท่านั้น สำหรับพื้นที่ส่วนอื่นจะได้ดำเนินการในขั้นต่อไป เช่น ห้องสำนักงาน ห้องสัมนา โถงพักคอย ฯ เพื่อให้ครอบคลุมทั้งอาคาร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์การเข้าศึกษาข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.“คู่มือแนวทางการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน” (ธันวาคม 2560): หน้า 24-25.

[2] สุรศักดิ์ ปัญจวรานนท์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. “การศึกษาและพัฒนาการออกแบบระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ที่เหมาะสมสำหรับอาคารสำนักงานในประเทศไทย” (2558): หน้า (1)

[3] จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. (2568). พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา. สืบค้น 27 มีนาคม 2568. จาก https://ww2.ayutthaya. go.th/travel

[4] พรรณชลัท สุริโยธิน. “Lighting Design for Art and Galleries”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 21 กุมภาพันธ์ 2567

[5] พรรณชลัท สุริโยธิน และ วรากุล ดันทนะเทวินทร์. (2556). การประเมินค่าความส่องสว่างในอาคารพิพิธภัณฑ์ศิลปะไทยร่วมสมัย. วารสารวิชาการ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 62 (ธันวาคม 2556), 104-122.

[6] ธัญชนก หลำริ้ว, หฤทัย กลิ่นเพชร และธนาพล ดันติสัตยกุล. (2562). แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่างในห้องเรียน : กรณีศึกษาคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ใน วารสารวิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี (น.1309-1320). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[7] IESNA. 2000. The IESNA Lighting Handbook Reference & Application. New York: Illuminating Engineering Society of North America.

การศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูงกระแสตรง (DC) ในช่วง 0 kV ถึง 140 kV

Study of the Behavior of Electrical Insulation under High Voltage DC in the Range of 0 kV to 140 kV

ประกาศิต ศรีทะแก้ว[1] วิฑูรย์ พรมมี[2] ดนัยกฤต ใจปาละ[3] และ ณัฐภัทร อนุศักดิกุล[4]
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
E-mail: [1] prakasit@rmutl.ac.th, [2]wprommee232@gmail.com [3]danaikit_ja65@live.rmutl.ac.th [4]nattapat_an651@live.rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูงกระแสตรง (HVDC) ในช่วง 0 kV ถึง 140 kV เป็นการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และทำความเข้าใจคุณสมบัติของวัสดุฉนวนหลากหลายชนิดภายใต้สภาวะแรงดันสูง การทดสอบนี้ครอบคลุมวัสดุฉนวน 7 ประเภท ได้แก่ ลูกถ้วย Line Post 57-2, ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์, สายเคเบิ้ล XLPE ขนาด 185 sq.mm. , กระจก และน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เครื่องกำเนิดแรงดันสูง HVDC และอุปกรณ์วัดที่แม่นยำเพื่อบันทึกข้อมูลกระแสไฟรั่ว, อุณหภูมิ, และพฤติกรรมของวัสดุ การอภิปรายผลเน้นถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของฉนวน เช่น อุณหภูมิ, กระแสไฟรั่ว , และการเกิด Flashover ซึ่งช่วยให้เข้าใจข้อจำกัดและความเหมาะสมของวัสดุแต่ละชนิดในการใช้งานจริง ข้อเสนอแนะจากการวิจัยรวมถึงการปรับปรุงวิธีการทดสอบ, การวิเคราะห์เพิ่มเติมเกี่ยวกับกลไกการเสื่อมสภาพของฉนวน, และการพัฒนาวัสดุฉนวนใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดีขึ้น

คำสำคัญ: ฉนวนไฟฟ้า, แรงดันสูงกระแสตรง, พฤติกรรมฉนวน

Abstract

The study on the behavior of electrical insulation under high-voltage direct current (HVDC) in the range of 0 kV to 140 kV aims to analyze and understand the properties of various insulating materials under high-voltage conditions. This research includes testing seven types of insulating materials: Line Post 57-2 insulators, 21 kV 5 kA surge arresters, insulating paper, 185 sq.mm. XLPE cable, glass, and transformer oil. A high-voltage DC generator and precision measurement equipment are used to record leakage current, temperature, and material behavior. The discussion focuses on factors affecting insulation behavior, such as temperature, leakage current, and flashover occurrences, which help in understanding the limitations and suitability of each material for practical applications. Recommendations from this study include improving testing methodologies, conducting further analysis on insulation degradation mechanisms, and developing new insulating materials with enhanced electrical properties.

Keywords: Electrical insulation, High-voltage direct current (HVDC), Insulation behavior

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) ฉนวนไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญในการรักษาความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้า [1]โดยเฉพาะในระบบกระแสตรง (DC) ที่ใช้แรงดันสูง การทำงานของฉนวนภายใต้สภาพแวดล้อมเช่นนี้แตกต่างจากระบบกระแสสลับ (AC) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าใน DC มีความเสถียรกว่า [2] แต่ยังคงส่งผลต่อความสามารถของฉนวนในการรองรับแรงดันไฟฟ้าสูงอย่างต่อเนื่อง การศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมที่ใช้แรงดันสูงในระบบ DC จึงเป็นหัวข้อที่สำคัญในการเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับการยืดอายุการใช้งานและความเสถียรของฉนวนในระบบเหล่านี้ ในช่วงแรงดัน 10 kV ถึง 140 kV ฉนวนไฟฟ้าต้องเผชิญกับปัญหาต่าง ๆ เช่น [3]การสลายตัวของประจุไฟฟ้า การสะสมประจุบนพื้นผิวของฉนวน และการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่ว (Leakage Current) ปัจจัยเหล่านี้สามารถนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวนและอาจทำให้เกิดความล้มเหลวทางไฟฟ้า (Electrical Breakdown) การเข้าใจกลไกการเสื่อมสภาพเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการออกแบบและเลือกใช้วัสดุฉนวนที่มีประสิทธิภาพ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าภายใต้แรงดันกระแสตรงสูง (DC) ในช่วง 10 kV ถึง 140 kV โดยมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์การสลายตัวของประจุไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ารั่ว และผลกระทบจากแรงดันไฟฟ้าสูงต่อวัสดุฉนวนที่ใช้ในระบบ DC ซึ่งผลลัพธ์จากการศึกษาจะมีประโยชน์ในการพัฒนาฉนวนไฟฟ้าสำหรับการใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงสูงในอนาคต

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงสูง (HVDC) ดังนี้

1) การสะสมประจุ (Charge Accumulation)

2) การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (Charge Migration)

3) การเพิ่มขึ้นของความเครียดไฟฟ้า (Electric Stress)

4) การเกิดการสลายตัวของฉนวน (Insulation Breakdown)

5) การเสื่อมสภาพของฉนวน (Aging of Insulation)

ในที่นี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติที่จะทำให้ส่งผลกระทบต่อฉนวนที่ทดลอง

1) ในระบบ DC ประจุไฟฟ้าจะสะสมอยู่ในฉนวนโดยไม่มีการสลับขั้วเหมือนในระบบ AC ทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวของฉนวนและภายในวัสดุ หากมีข้อบกพร่องในฉนวน เช่น ช่องว่างหรือรอยแตก การสะสมประจุเหล่านี้จะทำให้เกิดการนำไฟฟ้าหรือการปลดปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge) ซึ่งสามารถทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้

2) แรงดัน DC ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าภายในวัสดุฉนวนมากขึ้น โดยเฉพาะในวัสดุที่มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่นี้สามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ไม่สมดุลในบริเวณต่าง ๆ ของฉนวน ส่งผลให้ฉนวนเกิดความเสียหายและเสื่อมสภาพได้ในระยะยาว

3) แรงดัน DC ทำให้เกิดความเครียดไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องในฉนวน ซึ่งแตกต่างจากระบบ AC ที่มีการสลับขั้วอยู่ตลอดเวลา ความเครียดนี้สามารถสะสมขึ้นในบริเวณที่มีความไม่สมบูรณ์ของฉนวน เช่น ขอบมุมหรือรอยต่อ ส่งผลให้เกิดการสลายตัวของฉนวนเมื่อฉนวนไม่สามารถทนต่อความเครียดนี้ได้

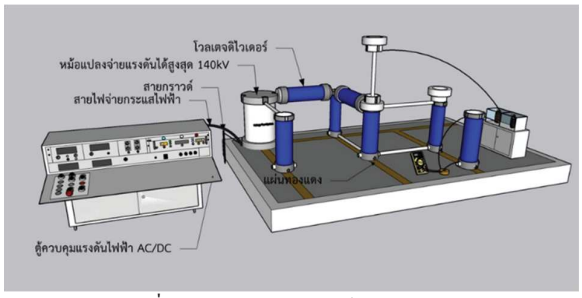
4) แรงดัน DC ที่สูงเกินค่าความทนทานของฉนวน (Dielectric Strength) จะทำให้เกิดการสลายตัวของฉนวนอย่างถาวร เนื่องจากการสะสมประจุไฟฟ้าและความเครียดไฟฟ้าสูงเกินไป เมื่อเกิดการสลายตัวฉนวนจะสูญเสียความสามารถในการป้องกันการนำไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการลัดวงจรในระบบไฟฟ้าแรงสูง

5) การใช้งานแรงดัน DC เป็นเวลานานจะทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าในระบบ AC เนื่องจากแรงดัน DC ทำให้ประจุไฟฟ้าสะสมและเคลื่อนที่ในฉนวนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ฉนวนสูญเสียประสิทธิภาพในการต้านทานการนำไฟฟ้า และทำให้วัสดุฉนวนเกิดการแตกหักหรือเสียหาย

3. การออกแบบการทดลอง

3.1 ชุดทดสอบ

การออกแบบโดยการถอดแบบจากภาพชุดจำลองการทดสอบพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าแรงสูงภายใต้แรงดันกระแสตรง (DC) โดยนำข้อมูลออกแบบใหม่ในโปรแกรม SketchUp Pro ชุดทดลองการทดสอบพฤติกรรมของฉนวน แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้างชุดทดสอบ

3.2 การเลือกใช้ฉนวนในการทดสอบ

1) ลูกถ้วยline post 57-2 ใช้ในระบบ 22kV มาตรฐาน มอก. 1077-2535 พิกัด Critical- impulse flashover 180-205kV

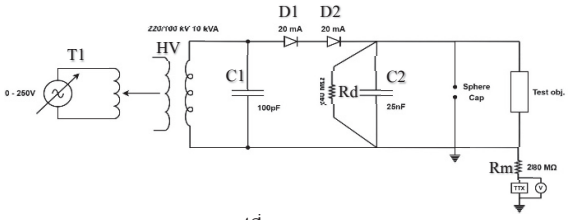
2) ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์ ใช้ในระบบ 22kV มาตรฐาน มอก. 2366-2551 พิกัด over voltage 21kV 5kA

3) สายไฟเคเบิ้ล XLPE (185 Sq.mm) ขนาด 185 sq.mm ใช้ในระบบ 22kV มาตรฐาน มอก. IEC 60815 ICEA S-61-402 พิกัดค่าแรงดันพังทลายของสาย 175-280kV การทำงานปกติ 90 °C Short circuit เงื่อนไข 250 °C

4) กระจกเทมเปอร์ (หนา5mm.) กระจกมีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงมากไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อใช้งานเป็นเวลานานสามารถรองรับแรงดันไฟฟ้าแรงสูงได้ดี พิกัด ค่าความเป็นฉนวนของกระจก (Glass) ประมาณ 12 – 15 kV/mm ค่าแรงดันพังทลายของกระจกเทมเปอร์ 60-75 kV

5) น้ำมันหม้อแปลง ทนความร้อนสูงมีอัตราการระเหยต่ำมีคุณสมบัติถ่ายเทความร้อนได้ดี ช่วยยืดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้ามาตรฐาน IEC 60156 พิกัด ค่าแรงดันพังทลายของน้ำมันหม้อแปลง DC ที่ระยะ 0.6 cm น้ำมันที่มีความชื้นเล็กน้อย: 40 – 70 kV DC

3.3 วงจรการทดลอง



รูปที่ 2 วงจรการทดลอง

วงจรไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับซึ่งใช้ในการทดสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของสภาพฉนวน อธิบายอุปกรณ์ที่ปรากฏบนภาพได้ดังนี้

1) T1 หม้อแปลงปรับค่าได้ขนาด 0-250 V 40A จ่ายแรงดันอินพุตให้กับ HV หม้อแปลงแรงสูงขนาด 100 kV 10 kVA

2) ใช้ C1 divider ขนาด 100 pF วัดแรงดันเอาต์พุตที่ออกจากหม้อแปลงเพื่อแสดงผลค่าแรงดันสูงกระแสสลับผ่าน DGM meter

3)จากนั้นจะทำการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 140 kV โดยใช้วงจรเรกติฟายผ่านไดโอดขนาด 140kV 20mA จำนวน 2 ตัว

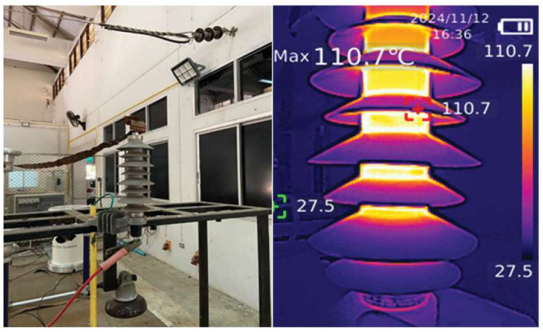
4) ใช้ C2 ขนาด 25 nF 140 kV กรองกระแสและลดแรงดันกระเพื่อมและวัดแรงดันเอาต์พุต DC ผ่าน Rd Divider ขนาด 240 MΩ เชื่อมต่อเพื่อแสดงผลแรงดันสูงกระแสตรงที่โต๊ะควบคุม

5) นำเอาต์พุตแรงดันสูงกระแสตรงต่อเข้ากับ Test obj. และนำ Rm divider 280 MΩ กับ ทรานฟอร์เมอร์เทอร์รอย 300 W 34 V ต่ออนุกรมเข้ากับ Test obj จากนั้นนำมัลติมิเตอร์ ต่อขนานเข้ากับทรานฟอร์เมอร์เทอร์รอยเพื่อวัดแรงดันตกคร่อมและนำไปคำนวณหากระแสรั่ว

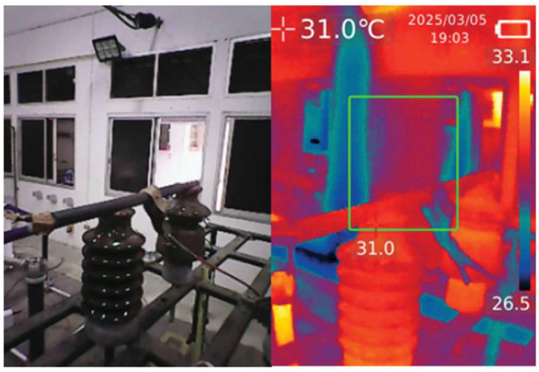
4. ผลการทดลอง

ทำการทดสอบฉนวนไฟฟ้าโดยจ่ายแรงดันสูงกระแสตรงในช่วง 0-140 kV และแบ่งการทดสอบออกเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 20 kV, 40 kV, 60 kV, 80 kV, 100 kV และ 140 kV ในการทดสอบแต่ละช่วงแรงดันจะทำการจ่ายแรงดัน 5 ครั้ง โดยแต่ละครั้งปล่อยแรงดันทิ้งไว้นาน 10 นาที พร้อมทั้งสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับฉนวน ดังแสดงรูปตัวอย่างการทดลองในรูปที่ 3- รูปที่ 5

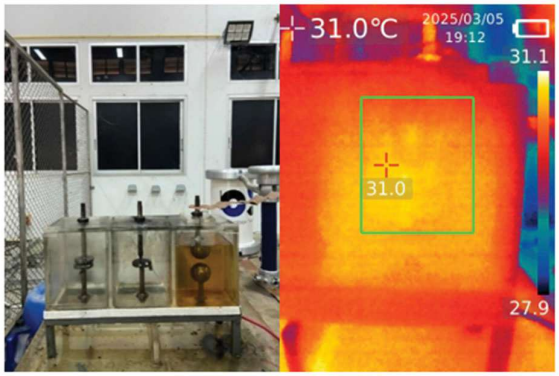
จากการทดสอบได้สรุปออกมาในรูปแบบตาราง ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของฉนวนภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงกระแสตรง และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการประเมินความสามารถในการทนแรงดันของฉนวน จากผลการทดสอบพบว่า ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์ แรงดันสูงสุดที่ทนได้ เกิดความร้อนสะสมที่ 28.09 kV กระแสไฟรั่ว พบกระแสไฟรั่วที่ระดับแรงดัน 40 kV (1.982 µA) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 99.8°C ที่แรงดัน 20 kV เป็น 110.7°C ที่แรงดัน 40 kV สภาพหลังการทดลอง เกิดความเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้ต่อ



รูปที่ 3 การทดสอบตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์



รูปที่ 4 การทดสอบสายเคเบิ้ล XLPE



รูปที่ 5 การทดสอบน้ำมันหม้อแปลง

การทดลองกระจกเทมเปอร์ (หนา 5mm.) แรงดันสูงสุดที่ทนได้ เกิด Flashover ที่ระดับแรงดัน 30.75 kV ไม่พบกระแสไฟรั่วก่อนเกิด Flashover อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 27.8°C ที่แรงดัน 20 kV เป็น 33.4°C ก่อนเกิด Flashover สภาพหลังการทดลอง เกิด Flashover และไม่สามารถใช้งานได้ต่อได้หลังการทดสอบเนื่องจากมีความร้อนและการเกิด Flashover

การทดลองน้ำมันหม้อแปลง (ระยะ6mm.) แรงดันสูงสุดที่ทนได้ เกิด Flashover ที่ระดับแรงดัน 43.65 kV ไม่พบกระแสไฟรั่วก่อนเกิด Flashover อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นจาก 21°C ที่แรงดัน 20 kV เป็น 31°C ก่อนเกิด Flashover สภาพหลังการทดลอง เกิด Flashover และไม่สามารถใช้งานได้ต่อ

การทดลองลูกถ้วย line post 57-2 และสายเคเบิ้ลXLPE แรงดันกระแสตรงสูงสุดที่ทนได้ 140 kV ไม่มีการเกิดกระแสไฟรั่ว ไม่พบกระแสไฟรั่วในทุกช่วงแรงดัน อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 32°C ที่แรงดัน 20 kV เป็น 36.3°C ที่แรงดัน 140 kV สภาพหลังการทดลอง ไม่มีความเสียหายสามารถทนทานต่อแรงดันที่ทดสอบได้

ตารางที่ 1 ผลการทดลอง

	ลูกถ้วย line post 57-2		ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์		สายเคเบิ้ล XLPE 185 sq mm.		กระจกเทมเปอร์ ความหนา 5 mm		น้ำมันหม้อแปลง ระยะห่าง 6 mm	
HVDC (kV)	กระแสไฟรั่ว (μA)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟรั่ว (μA)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟรั่ว (μA)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟรั่ว (μA)	อุณหภูมิ (°C)	กระแสไฟรั่ว (μA)	อุณหภูมิ (°C)
20	0	32	0	99.8	0	30	0	27.8	0	25
40	0	32	1.982	110.7	0	30.6	0	27.8	0	26
60	0	33	-	-	0	30.7	0	33.4	0	27.8
80	0	34	-	-	0	30.9	0	-	0	31
100	0	35	-	-	0	31	0	-	-	-
140	0	36	-	-	0	31	0	-	-	-

5.อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมของฉนวนไฟฟ้าภายใต้แรงดันสูงกระแสตรง (DC) ในช่วง 0 kV ถึง 140 kV เป็นการวิจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในการทำความเข้าใจคุณสมบัติและข้อจำกัดของวัสดุฉนวนต่างๆ ภายใต้สภาวะแรงดันสูง การทดสอบนี้ครอบคลุมวัสดุหลากหลายประเภท เช่น ลูกถ้วย Line Post 57-2, ล่อฟ้าแรงสูง, กระดาษหม้อแปลง, สายเคเบิ้ล XLPE (185 Sq.mm), กระจก, น้ำมันหม้อแปลง, และ Epoxy Resins

ลูกถ้วย Line Post 57-2 ทนทานต่อแรงดันสูงถึง 140 kV โดยไม่พบกระแสไฟรั่วและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์ เกิดความเสียหายที่ 28.09 kV โดยมีกระแสไฟรั่วก่อนการเสียหาย กระดาษฉนวน เกิดการเจาะทะลุที่ 7.5 kV โดยมีกระแสไฟรั่วเล็กน้อยก่อนการเจาะทะลุ สายเคเบิ้ล XLPE (185 Sq.mm) ทนทานต่อแรงดันสูงถึง 140 kV โดยไม่พบกระแสไฟรั่วและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กระจกเกิด Flashover ที่ 30.75 kV โดยไม่พบกระแสไฟรั่วก่อนเกิด Flashover น้ำมันหม้อแปลง เกิด Flashover ที่ 43.65 kV โดยไม่พบกระแสไฟรั่วก่อนเกิด Flashover จากการทดสอบความเป็นฉนวนของวัสดีทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังแสดงผลในตารางที่ 3 เปรียบเทียบการทดสอบและมาตรฐาน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าผลทดสอบกับค่ามาตรฐานอ้างอิง

ฉนวน	มาตรฐานการทดสอบ	ค่าที่วัดได้ (ผลการทดลอง)
ลูกถ้วย line post 57-2	ทดสอบแรงดันแฟลชโอเวอร์ ≥ 160 kV (IEC 60383)	140 kV สูงสุดของพิกัดหม้อแปลง
	ทดสอบแรงดันเจาะทะลุ ≥ 180 kV (IEC 60383)	140 kV สูงสุดของพิกัดหม้อแปลง
ตัวป้องกันฟ้าผ่าโพลิเมอร์	แรงดันต่อเนื่อง ≤ 21 kV (IEC 60099-4)	28.09 kV
	ค่ากระแสรั่วไหล ≤ 50 μA (IEC 60099-4)	1.9 μA
สายเคเบิ้ลXLPE 185 sq.mm	แรงดันพังกำแพงฉนวน ≥ 175 kV (IEC 60641)	140 kV สูงสุดของพิกัดหม้อแปลง
	อุณหภูมิใช้งานต่อเนื่องสูงสุด 90°C (IEC 60502-2)	31°C
กระจกเทมเปอร์ (หนา 5mm.)	ทดสอบแรงดันแฟลชโอเวอร์ ≥ 30 kV/mm (IEC 60695-11-10)	30.75kV
	อุณหภูมิใช้งานต่อเนื่องสูงสุด 250°C ถึง 300°C	31°C

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ: 2549

[2] J. Jow and A. Mendelsohn, “High-voltage direct current cable insulation,” Oct. 07, 2002 [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US6670554B1/en

[3] M. Tefferi, M. A. Baferani, H. Uehara, and Y. Cao, “The Correlation and Balance of Material Properties for DC Cable Insulation at Design Field,” IEEE Access, vol. 8, pp. 187840–187847, Oct. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030005.

[4] M. Azizian Fard, M. E. Farrag, S. G. McMeekin, and A. Reid, “Electrical treeing in cable insulation under different HVDC operational conditions,” Energies, vol. 11, no. 9, p. 2406, Sep. 2018, doi: 10.3390/EN11092406.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังภายใต้การประจุยานยนต์ไฟฟ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่โดยใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ด้วยการจำลองมอนติคาร์โล

Enhancing Power System Stability under Electric Vehicle Charging using Photovoltaic System and Battery Energy Storage System through Multi-Objective Function based Monte Carlo Simulations

ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ[1] ณตฤณ จันทร์จำรัส[3] กัญญณัช ฤทธานนท์[1] และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์[2*]
[1]สถาบันนวัตกรรมหุ่นยนต์และยานยนต์อัตโนมัติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ
[2]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[*]Corresponding e-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้ามีผลต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยสร้างความท้าทายในการรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และบริหารต้นทุนให้มีประสิทธิภาพ บทความนี้เสนอแนวทางบูรณาการที่ช่วยกำหนดขนาดและตำแหน่งของระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์และระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ โดยใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ผ่านการจำลองมอนติคาร์โล รวมถึงอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบดิฟเฟอเรนเชียลและอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบควอนตัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าระบบที่เหมาะสมสามารถลดการสูญเสียพลังงาน ปรับปรุงเสถียรภาพไฟฟ้า และลดการปล่อยคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบสะสมพลังงานแบตเตอรี่ มอนติคาร์โล

Abstract

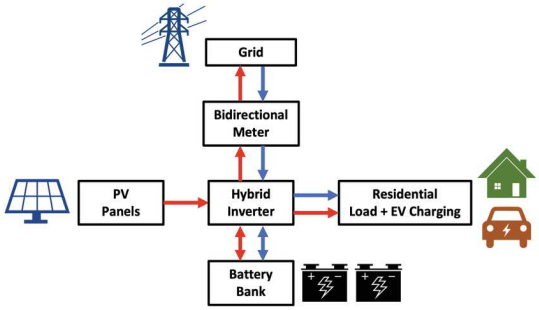
Electric vehicle emergence puts enormous burdens on power distribution networks, leading to problems in maintaining voltage stability, reducing power losses, and managing cost-effectively. In this paper, an integrated approach is presented to find solar photovoltaic system size and location and battery energy storage system size and location using a multi-objective function based on Monte Carlo simulation coupled with differential evolution and quantum-inspired evolutionary algorithms. Experimental results verify that systemically planned systems can significantly reduce energy loss, improve grid stability, and significantly reduce carbon emissions.

Keywords: electric vehicle, photovoltaics, BESS, monte carlo

1. บทนำ

การเติบโตอย่างรวดเร็วของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle, EV) ได้กลายเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบไฟฟ้าทั่วโลก แม้ว่าการนำ EV มาใช้งานจะช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แต่การเชื่อมต่อ EV จำนวนมากเข้ากับเครือข่ายจำหน่ายไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาด้านความเสถียรของระบบไฟฟ้า การกระจายตัวของโหลดแบบไม่แน่นอน และการสูญเสียกำลังที่เพิ่มขึ้น การประจุ EV ในช่วงเวลาเร่งด่วนอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกและเพิ่มภาระต่อระบบไฟฟ้า ส่งผลให้คุณภาพของกำลังไฟฟ้าลดลง [1-2]

การบูรณาการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) และแบตเตอรี่ (BESS) ในเครือข่ายจำหน่ายไฟฟ้าได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากสามารถช่วยลดผลกระทบจากโหลด EV ที่เพิ่มขึ้นได้ โดยที่ระบบ PV สามารถผลิตไฟฟ้าในช่วงกลางวัน ในขณะที่ BESS สามารถสะสมพลังงานและปล่อยพลังงานออกมาเมื่อโหลดของ EV เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดและตำแหน่งที่เหมาะสมของ PV, BESS นับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรได้รับการคำนวณอย่างรอบคอบเพื่อให้ได้สมดุลระหว่างการลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและการลงทุนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด [3]



รูปที่ 1 ระบบ PV, BESS ในเครือข่ายจำหน่ายไฟฟ้า

บทความนี้นำเสนอการใช้ Monte Carlo Simulation (MCS) เพื่อศึกษาผลกระทบของ EV ในระบบไฟฟ้า (30%, 50%, 70%) และใช้การเพิ่มเสถียรภาพแบบหลายวัตถุประสงค์ เพื่อหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ PV, BESS ในระบบ IEEE 33 บัส โดยใช้อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบดิฟเฟอเรนเชียล (DE) และอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบควอนตัม (QEA) เพื่อลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ปรับปรุงแรงดัน ลดต้นทุน และลด CO_2

2. การรวมแหล่งพลังงานผสมผสานเข้ากับระบบจำหน่าย

แบบทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า IEEE 33 บัส เป็นโครงข่ายแบบรัศมี ที่มี 33 บัส 32 สายส่ง เป็นระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำถึงปานกลาง กำลังไฟฟ้าไหลจากบัสแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังบัสแรงดันไฟฟ้าต่ำ โดยมีกระแสไฟฟ้า I คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$I_i = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} \tag{1}$$

โดยที่ I_i คือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในบัส i P_i คือกำลังไฟฟ้าจริงที่ใช้ในบัส i Q_i คือกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ใช้ในบัส i และ V_i^* คือค่าเชิงซ้อนของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i แรงดันไฟฟ้าที่บัส j คำนวณความต้านทานและรีแอคแตนซ์ของสายส่งได้จากสมการที่ (2)

$$V_j = V_i - (R_{ij} + jX_{ij})I_{ij} \tag{2}$$

โดยที่ V_i, V_j คือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในบัส i, j R_{ij} คือความต้านทานของสายส่งระหว่างบัส i, j และ X_{ij} คือรีแอคแตนซ์ของสายส่งระหว่างบัส i, j โดยแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัสต้องอยู่ภายในช่วงที่กำหนด โดยปกติค่าพิสัยแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ที่ 0.95-1.05 p.u.

2.1 การรวมระบบ PV ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบ PV ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยลดโหลดของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยกำลังผลิตของ PV คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$P_{\text{PV}}(t) = G(t).A_{\text{PV}}.\eta_{\text{PV}} \tag{3}$$

โดยที่ $P_{\text{PV}}(t)$ คือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจาก PV ณ เวลา t $G(t)$ คือค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ณ เวลา A_{PV} คือพื้นที่ของแผงโซลาร์เซลล์ η_{PV} คือประสิทธิภาพของแผง PV และเพื่อให้แน่ใจว่า PV ไม่ก่อให้เกิดแรงดันย้อนกลับหรือเกินขีดจำกัดของระบบถูกกำหนดโดยสมการที่ (4)

$$V_{\min} \le V_i + \Delta V_{\text{PV}} \le V_{\max} \tag{4}$$

2.2 การรวม BESS ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบ BESS ถูกนำมาใช้เพื่อ ช่วยปรับสมดุลโหลด ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า โดย BESS สามารถทำงานได้ทั้งการจ่ายพลังงานและการเก็บพลังงาน ระบบ BESS คำนวณจากสมการที่ (5)

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{P_{\text{char}}(t).\eta_{\text{char}}(t) - P_{\text{dischar}}(t)}{E_{\text{BESS}}^{\max}} \tag{5}$$

โดยที่ $SOC(t)$ คือสถานะประจุของ BESS ที่เวลา t P_{char} คือกำลังที่ BESS กำลังประจุเข้า P_{dischar} คือกำลังที่ BESS จ่ายออก η_{char} คือประสิทธิภาพของกระบวนการประจุ และ $E_{\text{BESS}}^{\max}$ คือคือพิกัดความจุพลังงานของ BESS โดยขีดจำกัดสถานะประจุ (SOC) ต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดโดยสมการที่ (6)

$$SOC_{\min} \le SOC(t) \le SOC_{\max} \tag{6}$$

2.3 การจำลองโหลด EV ด้วย MCS

การรวมโหลด EV เข้าไปในเครือข่ายไฟฟ้าทำโดยใช้ MCS โดยพิจารณาระดับการเพิ่ม EV ที่ 30% 50% และ 70% ของจำนวนยานพาหนะ ฟังก์ชันโหลด EV ตามเวลาคำนวณได้จากสมการที่ (7)

$$P_{\text{EV}}(t) = N_{\text{EV}}.P_{\text{char}}.f(t) \tag{7}$$

โดยที่ $P_{\text{EV}}(t)$ คือโหลด EV ณ เวลาที่ t N_{EV} คือจำนวน EV ที่กำลังประจุ P_{char} คือกำลังไฟฟ้าประจุเฉลี่ยของ EV และ $f(t)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของการประจุในแต่ละชั่วโมง สมการที่ (8) และ (9) ใช้คำนวณจำนวนของ EV ที่กำลังประจุ และโหลดรวมจากการประจุ EV

$$N_{\text{EV, char}}(t) = N_{\text{EV}}.P_{\text{char}}(t) \tag{8}$$

$$P_{\text{EV}}(t) = N_{\text{EV}}.P_{\text{char}}(t).P_{\text{rated}} \tag{9}$$

โดยที่ $N_{\text{EV, char}}(t)$ คือความน่าจะเป็นที่ EV จะอยู่ในสถานะการชาร์จที่เวลา t และ P_{rated} คือค่ากำลังไฟฟ้าของการชาร์จ EV ต่อคัน

3. การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

การเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเน้นลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า และลดการปล่อย CO_2 โดยกำหนดตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบ PV, BESS จากสมการที่ (10)

$$F_{\min} = w_1.P_{\text{loss}} + w_2.C_{\text{total}} - w_3.C_{\text{CO}_2} \tag{10}$$

โดยที่ P_{loss} คือกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบ C_{total} คือต้นทุนรวมของระบบ PV, BESS C_{CO_2} คือการลดปริมาณ CO_2 ที่ได้จากการใช้พลังงานหมุนเวียน และ $w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$ เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการคำนวณ สมการที่ (11) ถึง (13) ใช้ในคำนวณการสูญเสียกำลังไฟฟ้าดังสมการที่ (11)

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} I_i^2.R_i \tag{11}$$

ซึ่งในระบบจำหน่ายแรงดันระดับต่ำถึงระดับกลางแบบรัศมี กระแส I_i มักถูกประมาณจากโหลดที่ปลายทางและแรงดันที่บัส

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} \rightarrow P_{loss} = \sum_{i=1}^{n} \left(\left| \frac{S_i}{V_i} \right|^2 . R_i \right) \quad (12)$$

$$V_{\min} \le V_i + \Delta V_{\text{PV}} + \Delta V_{\text{BESS}} \le V_{\max} \quad (13)$$

โดยที่ V_i คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ i ΔV_{PV} คือผลกระทบของ PV ต่อแรงดันไฟฟ้า และ ΔV_{BESS} คือผลกระทบของ BESS ต่อแรงดันไฟฟ้า สมการที่ (14) ใช้คำนวณการลดปริมาณการปล่อย CO_2 คำนวณจากพลังงานที่ผลิตจาก PV ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาพลังงานจากโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งช่วยลดการปล่อย CO_2 โดยตรง

$$C_{CO_2} = E_{\text{PV}} \times \text{EF} \quad (14)$$

โดยที่ C_{CO_2} คือปริมาณคาร์บอนที่ลดลง E_{PV} คือพลังงานที่ผลิตจากระบบ PV และ EF คือค่า Emission Factor ของแหล่งพลังงานดั้งเดิม

4. อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบดิฟเฟอเรนเชียล

DE เป็นอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงวิวัฒนาการ ใช้กระบวนการวิวัฒนาการผ่านกระบวนการกลายพันธุ์ การครอสโอเวอร์ และการเลือกค่าที่ดีที่สุด โดยการกลายพันธุ์คำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$V_i^{G+1} = X_r^1 + F.(X_r^2 - X_r^3) \quad (15)$$

โดยที่ X_r^1, X_r^2, X_r^3 คือกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในระบบ F คือค่าตัวคูณการกลายพันธุ์ สมการที่ (16) และ (17) ใช้คำนวณการครอสโอเวอร์ และเงื่อนไขการเลือกค่าที่ดีที่สุด

$$U_i^{G+1} = \begin{cases} V_i^{G+1}, & \text{if } r < C_r \\ X_i^G, & \text{otherwies} \end{cases} \quad (16)$$

$$X_i^{G+1} = \begin{cases} U_i^{G+1}, & \text{if } f\left(U_i^{G+1}\right) < f\left(X_i^G\right) \\ X_i^G, & \text{otherwies} \end{cases} \quad (17)$$

โดยที่ C_r เป็นค่าความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์

5. อัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการแบบควอนตัม

QEA ใช้แนวคิดของกลศาสตร์ควอนตัมโดยการเข้ารหัสค่าของประชากรเป็นควอนตัมบิตและใช้ฟังก์ชันหมุนควอนตัมเพื่ออัปเดตค่าประชากร การเข้ารหัสค่าของประชากรในควอนตัมบิต และการอัปเดตสถานะควอนตัมคำนวณได้จากสมการที่ (18) และ (19)

$$\psi = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (19)$$

โดยที่ α และ β เป็นค่าความน่าจะเป็นของสถานะควอนตัม θ คือเป็นมุมหมุนของควอนตัมบิต สมการที่ (20) และ (21) ใช้คำนวณฟังก์ชันการหมุนของมุมควอนตัม และเงื่อนไขการคัดเลือกค่าที่ดีที่สุด

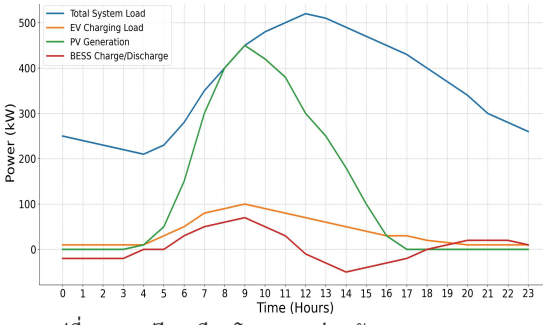
$$\theta = \theta_0 + \gamma.\left(X_{\text{best}} - X_{\text{current}}\right) \quad (20)$$

$$X_{\text{new}} = \begin{cases} X_{\text{quantum}}, & \text{if } f\left(X_{\text{quantum}}\right) < f\left(X_{\text{best}}\right) \\ X_{\text{best}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

การวิเคราะห์ต้นทุนรวมของระบบพิจารณาต้นทุนการติดตั้ง PV (900 USD/kW), BESS (400 USD/kWh) โดยใช้ข้อมูลราคาตลาดเฉลี่ยปี 2024 ร่วมกับอัลกอริทึมการเพิ่มเสถียรภาพของระบบ เพื่อประเมินค่าใช้จ่ายรวมในการติดตั้ง [3]

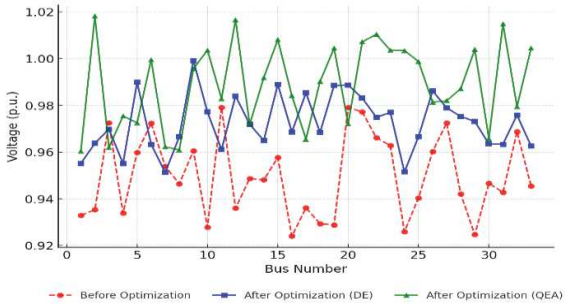
6. ผลการจำลองและการวิเคราะห์ผล

การจำลองระบบ IEEE 33 บัสใช้เพื่อประเมินผลกระทบจากการรวม EV ร่วมกับ PV, BESS โดยเปรียบเทียบการเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วย DE และ QEA ซึ่งพบว่า QEA



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบโหลด EV ร่วมกับ PV, BESS ตามเวลา

การเปรียบเทียบโหลดรวมของระบบไฟฟ้าตามรูปที่ 2 โหลด EV กำลังผลิตจาก PV และการทำงานของ BESS ใน 24 ชั่วโมง พบว่าในช่วง 7.00-17.00 น. PV ผลิตพลังงานสูงสุด ลดภาระโหลดได้ดี ส่วนกลางคืน BESS คายประจุเพื่อรองรับโหลด EV และรักษาเสถียรภาพระบบไฟฟ้า สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการรวมระบบ PV และ BESS ในการลดภาระและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าภายใต้การใช้งาน EV ที่เพิ่มขึ้น

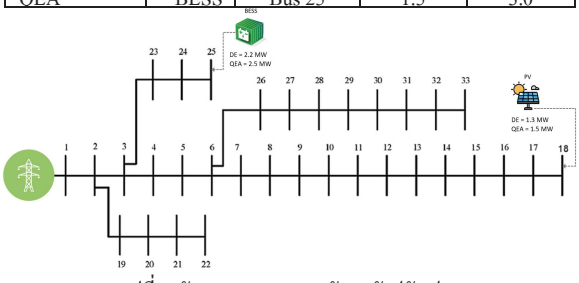


รูปที่ 3 ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังปรับปรุง

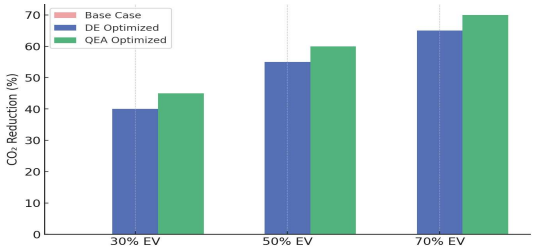
ลดสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุดตามรูปที่ 3 และรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้เสถียรในมาตรฐานตามรูปที่ 3 ทั้งนี้ การใช้ PV, BESS ยิ่งช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเมื่อ EV เพิ่มขึ้น โดยตารางที่ 1 และ รูปที่ 4 แสดงตำแหน่งขนาดของ PV, BESS ที่ EV 70%

ตารางที่ 1 ตารางขนาดและตำแหน่งการติดตั้ง PV, BESS

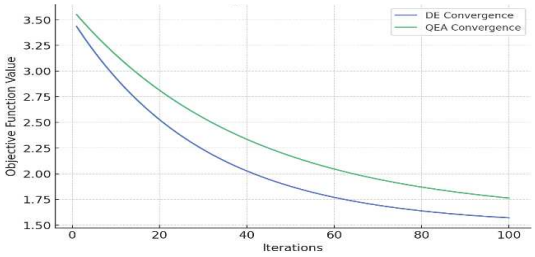
วิธีการปรับปรุง	ตำแหน่ง	หมายเลข	ขนาด (MW)	ความจ
DE Optimized	PV	Bus 18	2.2	-
DE Optimized	BESS	Bus 25	1.3	2.6
QEA	PV	Bus 18	2.5	-
QEA	BESS	Bus 25	1.5	3.0



รูปที่ 4 ผังระบบ IEEE 33 บัส หลังปรับปรุง

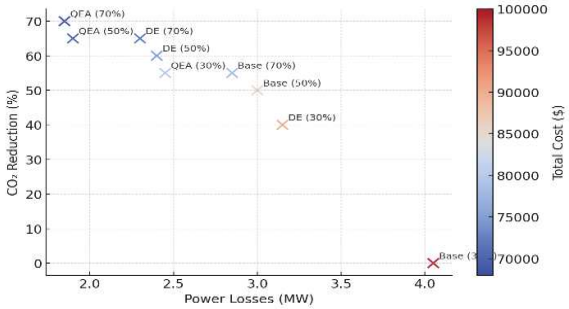


รูปที่ 5 การลดการปล่อยก๊าซ CO_2



รูปที่ 6 การลู่เข้าสู่คำตอบของ DE และ QEA

QEA ลดการปล่อย CO_2ได้สูงกว่า DE การติดตั้ง PV BESS ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้ระบบพลังงานสะอาดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 และ QEA ลู่เข้าหาคำตอบได้เร็วกว่า DE ทำให้หาขนาด PV BESS ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น DE ต้องใช้รอบการคำนวณมากขึ้นก่อนจะลู่เข้าค่าที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 6 และ QEA ช่วยลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าและ CO_2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ DE ลดการสูญเสียได้น้อยกว่าและมีต้นทุนสูง ส่วน Base Case สูญเสียไฟฟ้ามากที่สุดและไม่ลด CO_2 เลย ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเพิ่มประสิทธิภาพหลายวัตถุประสงค์

7. สรุปผล

ผลการศึกษาพบว่า QEA ลดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าได้มากถึงร้อยละ 26.1 ถึง 29.6 ซึ่งสูงกว่า DE ที่ลดได้เพียงร้อยละ 23.8 ถึง 25.9 โดย QEA ยังช่วยปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือ 0.95 ถึง 1.02 p.u. ขณะที่ DE อยู่ในช่วง 0.94 ถึง 1.00 p.u. นอกจากนี้ QEA สามารถลดการปล่อยก๊าซ CO_2 ได้สูงสุดร้อยละ 70 เมื่อเทียบกับ DE ที่ลดได้ร้อยละ 65 และมีความสามารถในการลู่เข้าหาค่าที่เหมาะสมได้เร็วกว่า DE ประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 ทำให้ QEA เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังและความยั่งยืนของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในยุคของ EV ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] S. K. Ghosh, D. Das, and A. Sinha, "Impact of EV charging on electrical distribution network and its mitigation using demand response," IET Smart Grid, vol. 5, no. 3, pp. 229–239, Sep. 2022.

[2] M. M. F. Darabi and A. Kargarian, "PV and battery energy storage integration in distribution networks using equilibrium algorithm," Energy Reports, vol. 7, pp. 108–118, Nov. 2021.

[3] P. Phuwongwan et al., "Impact analysis of EV charging on the PEA distribution system," in Proc. 43rd EECON, Pathum Thani, Thailand, Oct. 2020.

[4] J. Li, Y. Wang, and C. Liu, "Stochastic modeling of electric vehicle charging behaviors for distribution grid analysis," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 14, no. 1, pp. 320-330, Jan. 2023.

[5] N. P. Ramesh and M. R. Patel, "Multi-objective optimization of distributed PV-BESS integration in radial distribution networks," Energy Reports, vol. 9, pp. 4021-4035, 2023.

[6] A. K. Singh and S. Chakraborty, "Voltage regulation in EV integrated smart distribution system using coordinated PV and BESS," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 29, p. 101765, 2022.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การลดแรงบิดสั่นสะเทือนขณะสตาร์ทแบบโดยตรงของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงคู่ด้วยตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

DOL-Starting Transient Pulsating Torque Reduction of Double-Cage Induction Motor using Series Capacitor and Resistor

พิชัย อารีย์[1*]
[1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
E-mail: apichai@engr.tu.ac.th[*]

บทคัดย่อ

มอเตอร์เหนี่ยวนำประสบปัญหาแรงบิดสั่นสะเทือนในแกนเพลาขณะสตาร์ทด้วยการจ่ายแรงดันเต็มที่ (direct-on-line starting) ซึ่งก่อให้เกิดความเครียดเชิงกลและความเสียหายต่อขดลวด วิธีแก้ปัญหาเช่น ซอฟต์สตาร์ทเตอร์มีต้นทุนสูง ขณะที่วิธีลดแรงดันไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสตาร์ท งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการใช้ชุดตัวเก็บประจุและตัวต้านทานต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงคู่เพื่อลดการสั่นของแรงบิดของ นอกจากนี้ นำเสนอฟังก์ชั่นจุดประสงค์และเงื่อนไขในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานดังกล่าว ผลการทดลองผ่านการจำลองเชิงพลวัติแสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวช่วยลดการสั่นและการแกว่งของแรงบิดภายในตัวมอเตอร์ได้

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ, แรงบิดกระชาก

Abstract

Induction motors experience pulsating torque issues along the shaft axis during DOL startup, which leads to mechanical stress and damage to the windings. Existing solutions, such as soft starters, are costly, while voltage reduction methods affect the motor's starting capability. This paper investigates the use of a series-connected capacitor and resistor to reduce transient torque oscillations in double-cage induction motors. An objective function and constraints are proposed to determine the optimal values of the capacitor and resistor. Dynamic simulation results show that this method can effectively reduce torque pulsations and oscillations within the motor.

Keywords: Induction motor, torque jerk

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความทนทาน ราคาถูก โครงสร้างไม่ซับซ้อน โดยทั่วไป การต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง (direct-on-line หรือ DOL)[1] ได้รับความนิยม การสตาร์ทด้วยเทคนิคดังกล่าวจะทำให้มอเตอร์จะกินกระแสสูง 6-8 เท่าของพิกัด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านตัวนำของโรเตอร์จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสร้างแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์และโรเตอร์จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นตามทิศทางการหมุนของสนามแม่เหล็ก แต่ทว่าโรเตอร์มีน้ำหนักมากและไม่สามารถหมุนได้อย่างฉับพลัน ซึ่งส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของแรงบิด (pulsation torque) และความเค้น (strain) ภายในโรเตอร์ กลายเป็นความสั่นสะเทือน (torsional vibration) ที่แกนเพลา ขณะที่มอเตอร์เริ่มหมุน [2-4]

จากสาเหตุของปัญหาดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงมีการคิดค้นเทคนิคในการสตาร์ทมอเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือน งานวิจัย [5-6] ศึกษาเทคนิคการลดแรงบิดสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์โซลิดสเตตเป็นตัวควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ด้วยการกำหนดมุมจุดชนวนที่เหมาะสม (firing angle) ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อลดแรงบิดสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวก่อให้เกิดการลดลงของแรงบิดขณะเริ่มหมุน ซึ่งอาจจะทำให้มอเตอร์ขับโหลดไม่ไหวในกรณีที่มีภาระโหลดทางกลที่สูง

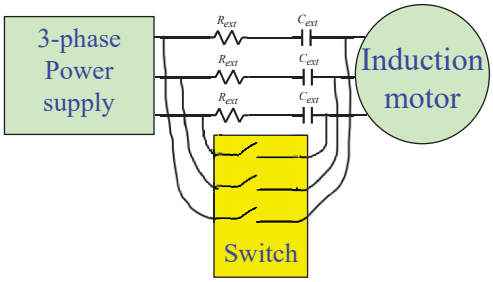
เมื่อไม่นานนี้ รายงานวิจัย [7] นำเสนอเทคนิควิธีอย่างง่ายด้วยการนำเอาคู่ของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อทำการลดแรงบิดสั่นสะเทือน การศึกษาทดสอบด้วยซิมมูลชั่นโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงเดี่ยวเท่านั้น ดังนั้น งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการลดแรงบิดสั่นสะเทือนของมอเตอร์ เทคนิคการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทานสำหรับมอเตอร์กรงคู่ถูกนำเสนอในบทความนี้ ผลการศึกษาทดลองด้วยการจำลองเชิงพลวัติผ่านทางการตอบสนองเชิงเวลาของปริมาณแรงบิด ความเร็ว และกระแส ถูก

นำมาใช้ในประเมินความสามารถของเทคนิคการใช้คู่ของตัวเก็บประจุและตัวต้านทานต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงคู่เพื่อลดแรงบิดสั่นสะเทือน

2. ขั้นตอนวิธี

2.1 เทคนิคการลดแรงบิดสั่นสะเทือนด้วยคู่ของตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน

โดยทั่วไปแล้ว การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยวิธีจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยตรงให้แก่มอเตอร์ (DOL) เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย วิธีนี้ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนของแกนเพลา เทคนิควิธีใหม่ด้วยการนำเอาคู่ของตัวเก็บประจุ (C_{ext}) และตัวต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรม (R_{ext}) กับมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงได้ดังในรูปที่ 1 เมื่อมอเตอร์หมุนที่ความเร็วพิกัดแล้ว ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานภายนอกจะถูกปลดออกไปผ่านทางสวิทช์เพื่อเป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยตรงให้กับมอเตอร์ ในหัวข้อย่อยถัดไปจะเป็นการนำเสนอการหาฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ที่จะใช้ในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ และตัวต้านทานภายนอกที่เหมาสม



รูปที่ 1 เทคนิควิธีการใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดแรงบิดสั่นสะเทือน

2.2 ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

จากการศึกษาแรงบิดชั่วขณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงเดี่ยวในสภาวะสถานะชั่วครู่พบว่า แรงบิดดังกล่าวสามารถประมาณได้จาก [8]

$$T = T_{sn}(1+1/\cos(\phi)) \tag{1}$$

โดยที่

$$\cos(\phi) = \frac{R_s + R_r}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \tag{2}$$

R_s และ X_{ls} คือความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์รั่วไหลของสเตเตอร์

R_r และ X_{lr} คือความต้านทานและค่ารีแอกแทนซ์รั่วไหลของโรเตอร์

T_{sn} แรงบิดสตาร์ทพิกัดของมอเตอร์

หากนำค่าตัวเก็บประจุและต้านทานภายของมาต่ออนุกรมกับขดลวดสเตเตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\cos(\phi) = \frac{R_1 + R_r}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_1 + X_{lr})^2}} \tag{3}$$

โดยที่

$$R_1 = R_s + R_{ext} \tag{4}$$

$$X_1 = X_{ls} - X_{ext} \tag{5}$$

$$X_{ext} = 1/(2\pi f C_{ext}) \tag{6}$$

วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือการหาค่าตัวเก็บประจุ (C_{ext}) และตัวต้านทานภายนอก (R_{ext}) ที่นำมาต่ออนุกรมกับมอเตอร์เพื่อลดค่ายอดของแรงบิดสั่นสะเทือนขณะมอเตอร์ออกตัว ด้วยการใช้สมการที่ (1) เป็นฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์

2.3 ข้อจำกัดและเงื่อนไข

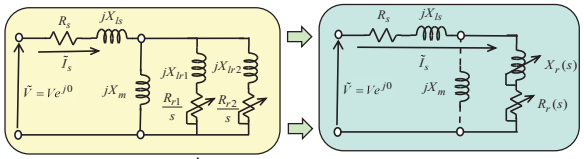
การออกตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงคู่จะต้องคำนึงถึงเงื่อนไขดังต่อไปนี้

แรงบิดขณะสตาร์ทต้องมากกว่าแรงบิดของโหลด $T > T_{load}$

กระแสขณะสตาร์ทน้อยกว่ากระแสสตาร์ทพิกัด $I_s \leq I_{st}$

คาปาซิทีฟรีแอกแทนซ์น้อยกว่ารีแอกแทนซ์รั่วไหล $X_C \leq 0.7X_{ls}$ [7]

การคำนวณหาแรงบิดขณะสตาร์ทของมอเตอร์กรงคู่สามารถพิจารณาจากวงจรสมมูลในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลมอเตอร์กรงคู่

ค่าความต้านทานของโรเตอร์สามารถหาได้จาก [9]

$$R_r(s) = (1/s)(A + Bs^2)/(E + Fs^2) \tag{7}$$

$$X_r(s) = (C + Ds^2)/(E + Fs^2) - X_{lr1}X_{lr2}/(X_{lr1} + X_{lr2}) \tag{8}$$

โดยที่

$$A = R_{r1}R_{r2}(R_{r1} + R_{r2})\ ;\ B = R_{r1}X_{lr2}^2 + R_{r2}X_{lr1}^2$$

$$C = R_{r1}^2X_{lr2} + R_{r2}^2X_{lr1}\ ;\ D = X_{lr2}X_{lr1}^2 + X_{lr1}X_{lr2}^2$$

$$E = (R_{r1} + R_{r2})^2\ ;\ F = (X_{lr1} + X_{lr2})^2$$

จากรูปที่ 2 หากไม่พิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำร่วม X_m ทันทีมอเตอร์สตาร์ท แรงบิดขณะสตาร์ทสามารถหาได้จาก

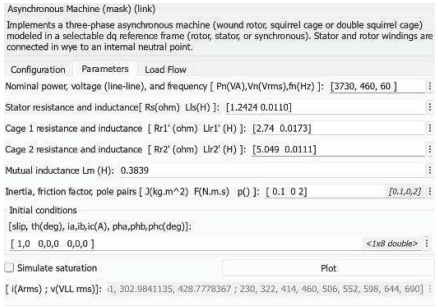
$$T = \frac{(3V^2R_r/\omega_{sm})}{\sqrt{(R_s + R_r(s=1) + R_{ext})^2 + (X_{ls} + X_r(s=1) - X_C)^2}} \tag{9}$$

กระแสขณะสตาร์ทสามารถหาได้จาก

$$I_s = \frac{V}{\sqrt{(R_s + R_r(s=1) + R_{ext})^2 + (X_{ls} + X_r(s=1) - X_C)^2}} \quad (10)$$

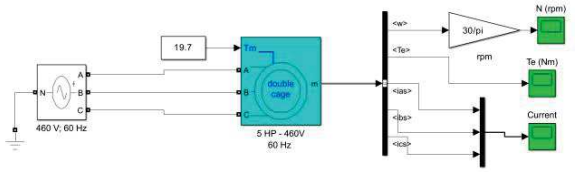
3. ผลการทดลอง

หัวข้อนี้นำเสนอผลการทดลองจากซิมมูเลชั่นเชิงพลวัติด้วยการใช้มอเตอร์แบบกรงคู่ขนาดพิกัด 5 แรงม้า 460 โวลต์ 60 เฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3

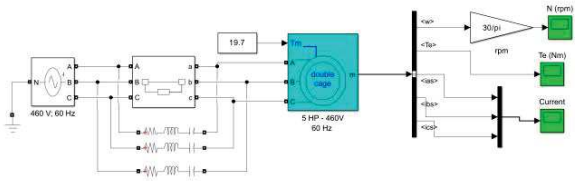


รูปที่ 3 พารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำกรงคู่

มอเตอร์ที่ใช้มีกระแสพิกัด 6A ที่ประสิทธิภาพ 87.5% ค่าตัวประกอบกำลัง 0.89 แรงบิดพิกัด 19.7Nm กระแสสตาร์ทตัวพิกัด 5.98 เท่าของกระแสโหลดพิกัด กำหนดให้มอเตอร์จ่ายโหลดที่ 20Nm ซึ่งเป็นชนิดแรงบิดคงที่ ในการศึกษาโปรแกรมแมตแล็บจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาผลตอบสนองเชิงเวลาเพื่อทำการเปรียบเทียบกรณีศึกษาที่ใช้และไม่ใช้ตัวเก็บประจุ (C_{ext}) และตัวต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรม(R_{ext}) ร่วมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ 4



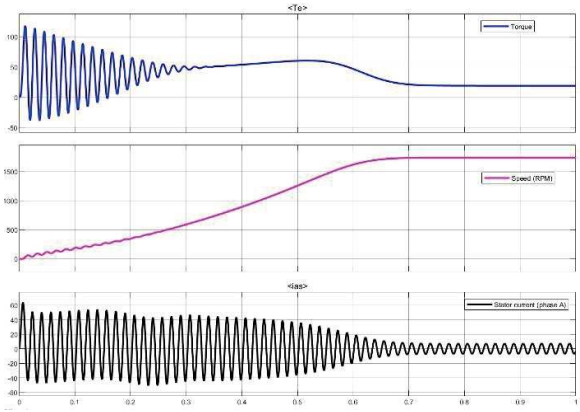
(ก) การสตาร์ทด้วยวิธีดั้งเดิม (DOL)



(ข) การสตาร์ทโดยใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานต่ออนุกรม

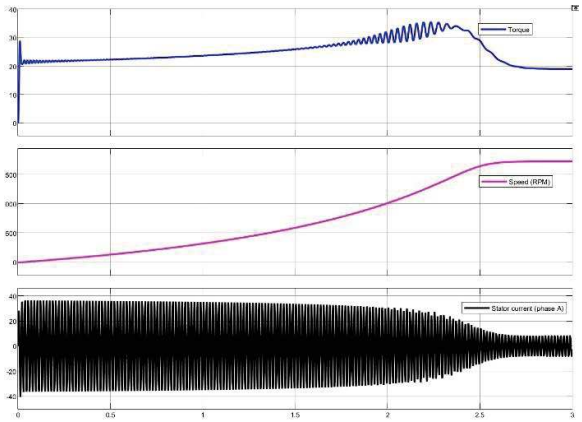
รูปที่ 4 การจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยโปแกรมแมตแล็บซิมมูลิ้ง

สำหรับกรณีการต่อมอเตอร์โดยตรงเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรง (รูปที่ 4ก) รูปคลื่นแรงบิด ความเร็วรอบ และกระแสของเฟสเอแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นว่าขณะที่มอเตอร์สตาร์ทโดยการจ่ายแรงดันเต็มพิกัดจะเกิดการกระชากของแรงบิดที่แกนเพลา แรงบิดที่กำเนิดในตัวโรเตอร์จะมีการแกว่งและมีค่ายอดสูงขึ้นประมาณ 6 เท่า ของแรงบิดพิกัด การกระชากอาจก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดการเยื้องศูนย์หากทำการสตาร์ทมอเตอร์ซ้ำ ๆ หรือบ่อยครั้ง



รูปที่ 5 รูปคลื่นแรงบิด ความเร็ว และกระแส ขณะสตาร์ทด้วยวิธี DOL

ในลำดับต่อไป จะนำเสนอผลการทดลองจากการใช้ตัวเก็บประจุพร้อมด้วยตัวต้านทานต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ในการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่เหมาะสมจะใช้วิธีฟังก์ชั่น “fmincon” จากโปรแกรมแมตแล็บ เมื่อกำหนดให้มอเตอร์จ่ายแรงบิดพิกัดและกระแสไม่เกินค่า 5.98 เท่าของกระแสพิกัด ค่าตัวเก็บประจุและค่าความต้านทานภายนอกที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 913uF และ 6.23โอห์ม ตามลำดับ ผลการตอบสนองเชิงเวลาซึ่งได้จากการซิมมูเลชั่นแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงบิด ความเร็ว และกระแส ขณะสตาร์ทด้วยวิธีที่นำเสนอ

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าแรงบิดขณะสตาร์ทนั้นไม่มีการแกว่ง มีค่าเป็นบวกและมีทิศทางเดียว ดังนั้น เทคนิควิธีที่นำเสนอช่วยลดแรงสั่นสะเทือนของแกนเพลาขณะมอเตอร์ออกตัวได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโหลดทางกลที่ปรับตั้งไว้ให้แก่มอเตอร์เป็นชนิดแรงบิดคงที่และแรงบิดที่มอเตอร์ผลิตได้นั้นมีค่าสูงกว่าพิกัดอยู่เพียงเล็กน้อย จึงทำให้มอเตอร์ใช้เวลาในการสตาร์ทนานขึ้น ระยะเวลาที่ใช้สตาร์ทประมาณ 3 วินาที นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสขณะสตาร์ทจะพบว่ากระแสสตาร์ทมีค่ายอดลดลง ซึ่งช่วยลดความเครียดในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการลดการกระชากของแรงบิดขณะมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงคู่ เริ่มออกตัวด้วยการใช้คู่ของคาปาซิเตอร์และตัวต้านทานต่อการต่ออนุกรมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์และข้อจำกัดเงื่อนไขในการหาค่าตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่เหมาะสมได้ถูกนำเสนอในบทความนี้

ผลการทดลองจากการจำลองเชิงพลวัติแสดงให้เห็นว่าการสตาร์ทด้วยการใช้ตัวเก็บประจุและตัวต้านทานที่เหมาะสมด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าพิกัดโดยตรงให้แก่มอเตอร์ สามารถช่วยลดแรงบิดกระชากความสั่นสะเทือนในแกนเพลาขณะเริ่มออกตัวได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ วิธีนี้จัดเป็นวิธีที่ง่ายสามารถช่วยลดการเยื้องศูนย์ ยืดอายุการใช้งานของชิ้นส่วนทางกลที่ต้องทนต่อการรับแรงกระชาก เช่น เฟืองทด คัปปลิ้ง ได้ ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจะนำเสนอในโอกาสต่อไปภายหลังการจัดหามอเตอร์ทดสอบแบบกรงคู่ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] H.A. Ashour and R.A. Ibrahim, “Comparison between direct-on-line star-delta and auto-transformer induction motor starting method,” The international conference on computer as a tool, pp. 2193–2199, 2007.

[2] M.J. Melfi and S.D. Umans, “Transients during line-starting of squirrel-cage induction motors,” Industry applications society 57th annual petroleum and chemical industry conference, pp.1-8, 2010.

[3] Y. Yuan, B.H. Zhang, Z.Q. Bo, W.B. Su, R.K. Aggarwal and A.T. Johns, “Un-simultaneous reclosure technique to reduce torsional torques and enhance system transient stability,” Sixth international conference on developments in power system protection, pp.180-183, 1997.

[4] F. Junichi, U. Yoshihisa, K. Keita, I. Hiroyuki and K. Yoshihide, “A study of transient torque analysis in the squirrel-cage induction motor with reactor and damping resistor starter,” International universities power engineering conference, pp.1–4, 2009.

[5] W. Huan, S. Xiangrui and J. Guangzhe, “The study of switch transformer medium voltage asynchronous motor soft-start device,” Power electronics and motion control conference, vol. 4, pp. 2422–2425, 2012.

[6] I. Cadirci, M. Ermis, E. Nalcacl, B. Ertan and M. Rahman, “A solid state direct on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 14, pp.402– 412, 1999.

[7] M. Akbaba, “A novel simple method for elimination of DOL starting transient torque pulsations of three-phase induction motors”, Engineering Science and Technology, an International Journal 24, pp. 145–157, 2021.

[8] K.M. Wah1, L.A. Kilgore, "Transient Starting Torques in Induction Motors", AIEE Transactions, vol. 59, pp. 603-607, 1940.

[9] P. Aree “Accurate Power-Flow Initialization of Double-Cage Induction Motors using Unified Newton-Raphson Method”, Int. J. Elec. Power & Energy System, vol. 27, Oct. 2017.



พิชัย อารีย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง และเครื่องจักรกลไฟฟ้า

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

จุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไมโครกริดอิสระ

Accurate Operating Points of Induction Motor in Autonomous Microgrid

อานนท์ พ่วงชิงงาม[1*] ปฏิวัติ บุญมา[1]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

E-mail: arnon5202@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

การคำนวณจุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไมโครกริดอิสระนั้นมีความซับซ้อน เนื่องจากต้องคำนึงถึงคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์ซึ่งมีผลจากแรงดันและความถี่ของระบบ เพื่ออำนวยความสะดวกในการคำนวณ มอเตอร์เหนี่ยวนำมักถูกมองว่าเป็นโหลดแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ แต่ในความเป็นจริง กำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะแปรผันตามแรงดันของจุดที่เชื่อมต่อและคุณลักษณะของโหลดทางกลที่มอเตอร์กำลังขับเคลื่อนแบบไม่เป็นเชิงเส้น ปัจจัยต่างๆเหล่านี้ทำให้การคำนวณโครงข่ายร่วมกับมอเตอร์โดยวิธีดั้งเดิมอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากไม่สามารถกำหนดจุดทำงานที่แท้จริงและถูกต้องของมอเตอร์ได้ โดยเฉพาะในระบบไมโครกริดอิสระที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบตามโหลดและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบ บทความนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการคำนวณจุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานอยู่ในโครงข่ายไมโครกริดอิสระ โดยการผนวกวงจรสมมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับโปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้สามารถคำนวณจุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลลัพธ์การไหลของกำลังไฟฟ้า และจุดทำงานทั้งหมดของระบบไมโครกริดอิสระได้ในคราวเดียวกัน ดังนั้น วิธีการที่นำเสนอนี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณสำหรับโครงข่ายไมโครกริดอิสระร่วมกับมอเตอร์เหนี่ยวนำได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ระบบไมโครกริดอิสระ, มอเตอร์เหนี่ยวนำ, การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

Abstract

Calculating the accurate operating point of induction motors in autonomous microgrid networks is complex due to their nonlinear characteristics, which influence the system's voltage and frequency. To simplify computations, induction motors are often modeled as constant power loads. However, their power consumption varies nonlinearly with the voltage at the connection point and the characteristics of the driven load. This variability introduces potential inaccuracies in network calculations using such conventional method, as they fail to precisely determine the motor's operating point. This issue is particularly significant in autonomous microgrid, where system frequency changes in response to load and generator dynamics. This research article introduces a novel approach for accurately determining the operating point of induction motors in autonomous microgrid networks. By incorporating the nonlinear equivalent circuit of induction motors into power flow analysis programs, this method enables the simultaneous calculation of the precise operating point of induction motors, power flow results, and the overall operating conditions of the autonomous microgrid. The proposed approach provides a practical solution to improve the accuracy and efficiency of calculations in autonomous microgrid networks that incorporate induction motors.

Keywords: autonomous microgrid, induction motor, power-flow analysis

1. บทนำ

การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและควบคุมโครงข่ายไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาถึงโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ในโครงข่ายเหล่านั้น แบบจำลองของโหลดที่ถูกต้องเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองโหลดสถิติจะถูกนำมาใช้แทนโหลดทุกประเภทในโครงข่าย แต่ไม่เหมาะสมกับโหลดที่มีลักษณะซับซ้อนอย่างมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าที่บริโภคจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้าอย่างไม่คงที่ [1] ดังนั้น การใช้แบบจำลองโหลดสถิติแทนมอเตอร์เหนี่ยวนำจะทำให้ผลลัพธ์ของการคำนวณขาดความน่าเชื่อถือ

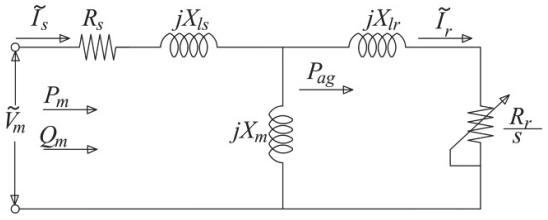
จากเหตุผลในข้างต้น การนำแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสมมาผนวกเข้ากับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากการกำหนดจุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายในโครงข่ายไฟฟ้านั้นส่งผลทำให้ผลลัพธ์ในการคำนวณจุดทำงานโดยรวมของระบบมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโปรแกรมคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าเชิงพานิชย์ในปัจจุบันยังคงมีข้อจำกัดและขาดความแม่นยำ เนื่องจากการใช้แบบจำลองโหลดสถิตชนิดกำลังไฟฟ้าคงที่แทนโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ [2] ซึ่งไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าตามแรงดันได้อย่างถูกต้อง ตัวอย่างเช่น การประมาณค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของมอเตอร์จำถูกคำนวณและกำหนดค่าที่แรงดันพิกัด 1.0 เปอร์ยูนิตและถูกกำหนดให้คงที่ตลอดการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยไม่ได้พิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำอีกหลังจากนั้น ดังนั้น การปรับปรุงวิธีการคำนวณโดยการผนวกแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับอัลกอริทึมในการคำนวณการไหลจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการผนวกแบบจำลองโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับขั้นตอนวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า ซึ่งเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาจุดทำงานที่ถูกต้องของโครงข่ายไฟฟ้าร่วมกับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการคำนวณแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างกำลังไฟฟ้าไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการทำงานและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ จากนั้น ระบบไมโครกริดแบบอิสระชนิด 7 บัส (Autonomous microgrid) ถูกใช้เป็นระบบทดสอบเพื่อประเมินความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอเมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่กำหนดให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นโหลดสถิตชนิดกำลังไฟฟ้าคงที่และในส่วนสุดท้ายของบทความจะแสดงให้เห็นจุดทำงานที่เปลี่ยนไปเมื่อมอเตอร์เหนี่ยวนำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกย้ายไปยังตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบไมโครกริดอิสระ

2. แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.1 การคำนวณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ค่าสลิป

วิธีการนี้จะใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงตามรูปที่ 1 กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1-2 [3]



รูปที่ 1 วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$$P_m = (V_m^2 R_{mot})/(R_{mot}^2+X_{mot}^2) \quad (1)$$

$$Q_m = (V_m^2 X_{mot})/(R_{mot}^2+X_{mot}^2) \quad (2)$$

โดยค่าความต้านทาน R_{mot} และค่ารีแอกแตนซ์ X_{mot} ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหาได้จากสมการที่ 3-5

$$R_{mot}=R_S+s(R_r(X_mF)^2)/(R_r^2+s^2(X_rF)^2) \quad (3)$$

$$X_{mot}=\left(X_sF-(X_mF)^2/X_rF\right) + \left(R_r^2(X_mF)^2/X_rF(R_r^2+s^2(X_rF)^2)\right) \quad (4)$$

$$X_r = X_{lr}+X_m \quad (5)$$

โดยที่ F คือค่าความถี่ต่อหน่วยในกรณีที่ระบบทำงานแบบแยกตัวอิสระ (Autonomous) ในสมการที่ 3-5 ค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ s สามารถคำนวณได้หลากหลายวิธี โดยในบทความนี้ จะยกตัวอย่างการคำนวณค่าสลิปจากสมการแรงบิดร่วมกับวงจรสมมูลย์เทวินิน ดังสมการที่ 6-8

$$T_m - T_e = 0 \quad (6)$$

$$T_m = -(T_m^0(A(1-s)^2+B(1-s)+C)) \quad (7)$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{sm}F}(V_{th}^2/(R_{th}+\frac{R_r}{s})^2+(X_{th}+X_{lr}F)^2)\frac{R_r}{s} \quad (8)$$

โดยที่ A, B, C คือสัมประสิทธิ์ของแรงบิดทางกล T_m^0 คือแรงบิดทางกล และ ω_{sm} คือความเร็วเชิงมุมซิงโครนัสของมอเตอร์เหนี่ยวนำ V_{th}, R_{th}, X_{th} คือค่าตัวแปรในวงจรเทวินินหาได้จากสมการ9-11

$$V_{th}=X_mFV_m\Big/\sqrt{R_S^2+(X_sF)^2} \quad (9)$$

$$R_{th}=R_S(X_mF)^2\Big/\left(R_S^2+(X_sF)^2\right) \quad (10)$$

$$X_{th}=\left(R_S^2X_mF+\left(X_mX_{ls}X_sF^3\right)\right)\Big/\left(R_S^2+(X_sF)^2\right) \quad (11)$$

แทนค่าสมการที่ 9-11 ลงในสมการที่ 7 และ 8 ปรับรูปสมการตามสมการที่ 6 เพื่อหาค่ารากของสมการ ค่ารากที่เป็นบวกและมีค่าน้อยที่สุดจะถูกเลือกใช้เป็นค่าสลิปของมอเตอร์ จากวิธีการในข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะสามารถคำนวณได้อย่างละเอียดจากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำและแรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่มอเตอร์ต่อใช้งานอยู่จริง และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำใช้งานที่มีความถูกต้องได้ตามสมการที่ 1-5 ตามลำดับ

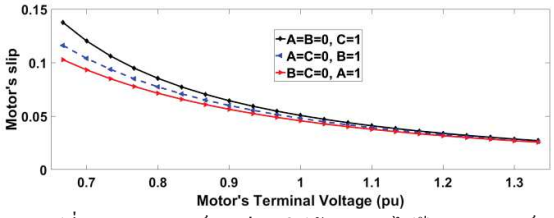
2.2ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่มีผลต่อสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีค่าแปรตามแรงดันไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์ทำงาน มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 แรงม้า ที่มีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 จะถูกคำนวณและแสดงผลลัพธ์ตามรูปที่ 2 และ 3 ทั้งนี้ มอเตอร์ถูกกำหนดให้จ่ายภาระทางกลที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงบิดแบ่งเป็น 3 กรณีศึกษาคือ $A=B=0, C=1$, $A=C=0, B=1$, และ $B=C=0, A=1$

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

$R_s(\Omega)$	0.356	$V_m(V)$	400
$R_r(\Omega)$	3.16	$Pole$	4
$X_m(\Omega)$	83.74	$f(H_z)$	50
$X_{ls}(\Omega)$	1.982	HP	3
$X_{lr}(\Omega)$	2.139	$N_r(rpm)$	1420

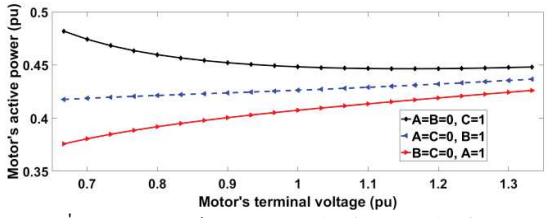
สลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับแรงดันของมอเตอร์ และมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณลักษณะของโหลดทางกลที่มอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6-11 แสดงตามรูปที่ 2



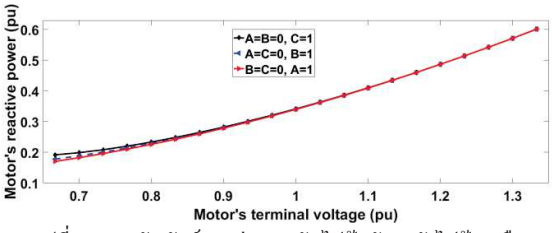
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสลิปกับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์

2.3 ความสัมพันธ์ของสลิปที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับค่าสลิปของมอเตอร์ และมีการเปลี่ยนแปลงตามคุณลักษณะของโหลดทางกลที่มอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ ค่าของกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1-5



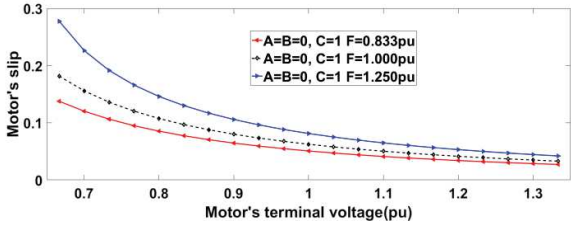
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าจริง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกำลังไฟฟ้าเสมือน

2.4 ผลของความถี่ไฟฟ้าที่มีต่อสลิปของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

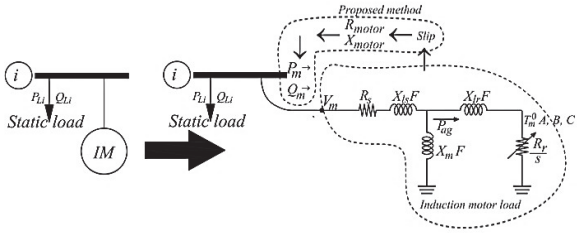
เนื่องด้วยวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำประกอบไปด้วยค่ารีแอกแตนซ์ที่มีค่าแปรตามความถี่ไฟฟ้าของโครงข่าย เมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อสลิปของมอเตอร์ตามสมการที่ 3 และ 4 โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสลิปกับความถี่ไฟฟ้าของมอเตอร์

2.5 การผนวกมอเตอร์เหนี่ยวนำกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ต่ออยู่ที่บัสใดๆ ในโครงข่ายไฟฟ้าจะถูกแทนที่ด้วยวงจรสมมูลย์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ตามรูปที่ 6



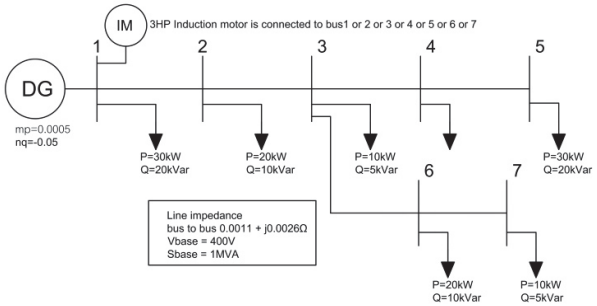
รูปที่ 6 การผนวกมอเตอร์เหนี่ยวนำกับการคำนวณการไหล

จากรูปที่ 6 ค่าตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกผนวกเข้ากับสมการในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า สลิปของมอเตอร์จะถูกคำนวณใหม่ในทุกรอบของการคำนวณแรงดันที่บัส และกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์จะถูกปรับอยู่ตลอดเวลาตามการเปลี่ยนแปลงของสลิป จนผลของการคำนวณเข้าสู่คำตอบกำลังไฟฟ้าสุทธิที่บัสเมื่อมีการผนวกมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นไปตามสมการที่ 12

$$\tilde{S}_i = P_i + jQ_i = (P_{Li} + jQ_{Li}) + (P_{mi} + jQ_{mi}) \qquad (12)$$

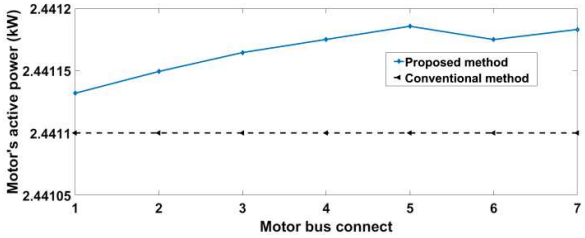
3. การจำลองการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าผนวกมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เพื่อแสดงให้เห็นความสามารถของอัลกอริทึมที่นำเสนอ การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าจะใช้ระบบไมโครกริดแยกตัวอิสระแบบ 7 บัส พารามิเตอร์ต่างๆของระบบ แสดงตามรูปที่ 7

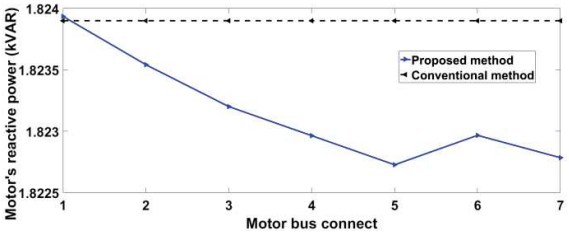


รูปที่ 7 ระบบทดสอบแบบ 7 บัสอิสระ

ค่าพาราของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงตามตารางที่ 1 มอเตอร์ถูกกำหนดให้จ่ายภาระทางกลที่มีค่าสัมประสิทธิ์เป็น $A=B=0$, $C=1$ ในการจำลอง มอเตอร์เหนี่ยวนำจะถูกต่อเข้ากับบัสที่ 1 ถึง 7ทีละบัสเรียงตามลำดับแล้วคำนวณหาจุดทำงาน จากนั้น กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ได้จะถูกนำมารวมกับโหลดสถิตที่มีอยู่ที่บัส ตามสมการที่ 12 ค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิที่ได้จะถูกใช้เป็นข้อมูลโหลดบัสรวมในคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าต่อไป ซึ่งแตกต่างจากวิธีการดั้งเดิมที่มอเตอร์จะถูกกำหนดเป็นโหลดสถิตชนิดกำลังไฟฟ้าคงที่เท่านั้น $(2.4411+j1.8239kVA)$ ภายหลังการคำนวณสิ้นสุด จุดทำงานที่ถูกต้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำในระบบไมโครกริด เช่น กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการผนวกวงจรสมมูลของมอเตอร์เข้ากับวิธีการคำนวณการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดังเดิม (conventional) แสดงตามรูปที่ 8-9

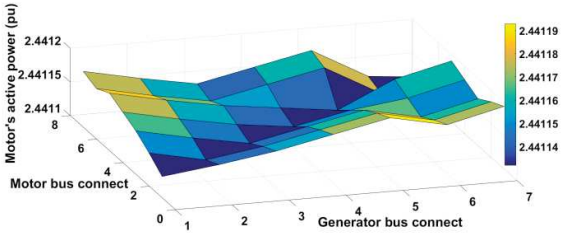


รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์เมื่อต่อที่บัสต่างๆในระบบทดสอบ

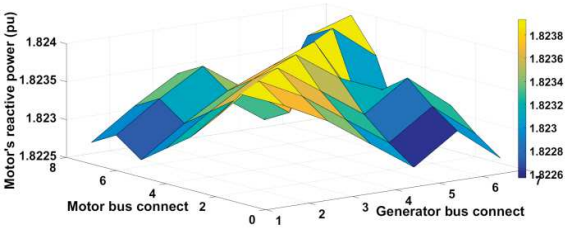


รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าเสมือนของมอเตอร์เมื่อต่อที่บัสต่างๆในระบบทดสอบ

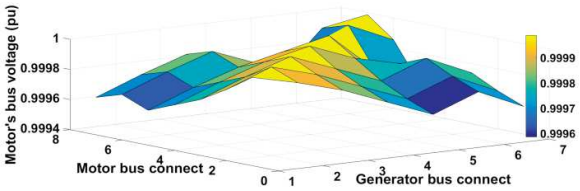
เมื่อมอเตอร์ทำงานภายในระบบไมโครกริดอิสระที่มีระดับแรงดันที่จุดต่างๆแตกต่างกันออกไปตามการต่อของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distribution generator) ระบบทดสอบในรูปที่ 7 จะถูกใช้อีกครั้งเพื่อจำลองให้เห็นถึงความสามารถและความจำเป็นของวิธีการคำนวณที่นำเสนอ ตำแหน่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนจากเดิมที่ต่อที่บัส 1 ย้ายไปยังบัสที่ 2 ถึง 7 ที่ละบัสตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการคำนวณ จะเห็นได้ว่าจุดทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงตามรูปที่ 10-12



รูปที่ 10 กำลังไฟฟ้าจริงของมอเตอร์ในระบบทดสอบ



รูปที่ 11 กำลังไฟฟ้าเสมือนของมอเตอร์ในระบบทดสอบ



รูปที่ 12 แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ในระบบทดสอบ

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการจัดการกับคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อทำงานในโครงข่ายไมโครกริดอิสระร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว โดยการผนวกแบบจำลองชนิดไม่เป็นเชิงเส้นของมอเตอร์เหนี่ยวนำเข้ากับวิธีการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีแพร่กระจายถอยหลังและเดินหน้า ระบบไมโครกริดแบบอิสระชนิด 7 บัสถูกใช้เป็นระบบทดสอบ ผลการคำนวณของวิธีที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงจุดทำงานที่มีความน่าเชื่อถือของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณจุดทำงานของโครงข่ายไมโครกริดอิสระที่ถูกต้องได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.พิชัย อารีย์ อาจารย์ผู้ให้คำแนะนำ แก้ไขปัญหา และให้กำลังใจในการเรียนและการทำวิจัยตลอดมา อีกทั้งขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานวิชาการตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Task Force, "Load representation for dynamic performance analysis (of power systems)," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 472-482, 1993.

[2] J. Powell and G. Radman, “Initialization for dynamic simulation of stressed power systems considering induction motor components of loads,” in *Proc. North Amer. Power Symp. (NAPS)*, 2007, pp. 102–107

[3] P. Aree, "Load flow solution with induction motor," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 157-168, Jan. 2006.

การประเมินสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี

Health Assessment of Distribution Transformers in Provincial Electricity Authority Suphan Buri

ศักดินนท์ ตันละมัยงาม[1] พิจักขณา ศรีฉ่ำพันธ์[1] ศุภฤกษ์ สนามเขต[1] สุรพล โรจนประดิษฐ[1] สยามรัฐ เพิกอาภรณ์[1] และเฉลียว เกตุแก้ว[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์สุพรรณบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
450 หมู่ 6 ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 035-434 014 Email: chaliew.k@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

หม้อแปลงระบบจำหน่าย มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า การประเมินสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความขัดข้องจากอุปกรณ์ระบบจำหน่าย การประเมินสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายโดยใช้ดัชนีสุขภาพ Health Index (HI) ประกอบด้วยข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ ค่าความเป็นฉนวนของขดลวดหม้อแปลง ค่าความต้านทานดินและอายุการใช้งานของหม้อแปลง นำข้อมูลการบำรุงรักษามากำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญ กำหนดค่าฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิกและสร้างฟังก์ชั่นสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงด้วยวิธีคำนวณและวิธีฟัซซี การศึกษานี้ครอบคลุมหม้อแปลงจำหน่ายแรงดัน 22 kV ทั้งระบบ 1 เฟสและ 3 เฟส ในพื้นที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี ระหว่างปี 2566-2567 ผลลัพธ์ที่ได้ช่วยจำแนกหม้อแปลงที่มีสภาพดี - สภาพแย่ และสามารถคาดการณ์แนวโน้มปัญหาและวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้ โดยหม้อแปลงจำหน่าย 1 เฟสและ 3 เฟส รวมจำนวน 2,080 เครื่อง ผลการคำนวณดัชนีสุขภาพมีหม้อแปลงอยู่ในสภาพดี 41.06 เปอร์เซ็นต์ หม้อแปลงสภาพยอมรับได้ 44.81 เปอร์เซ็นต์และหม้อแปลงสภาพที่ควรได้รับการพิจารณาบำรุงรักษา 14.13 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีหม้อแปลงที่อยู่ในสภาพแย่มาก

คำสำคัญ: หม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า, การประเมินสภาพหม้อแปลง, Fuzzy logic

Abstract

Distribution transformers are very important to the stability of the power system. The health assessment of distribution transformers in the area of the Provincial Electricity Authority, Suphan Buri Province helps to improve efficiency and reduce the risk of problems. The health assessment of distribution transformers using the Health Index, HI and Fuzzy Logic The analyzed data included electrical values such as HV-G, LV-H, HV-LG, grounding values and transformer life. The maintenance data was used to determine the importance weights, determine the membership function and create a trapezoidal function using the MATLAB Fuzzy Logic program, and compare the Health Index, HI and Fuzzy Logic. This study covered both 22 kV distribution transformers in both single-phase and three-phase systems in the area of the Provincial Electricity Authority, Suphan Buri Province, between 2023-2024. The results help to classify transformers in good condition and poor condition, and can predict the problem trend and plan preventive maintenance effectively. The results of the health index calculation showed that 41.06 percent of transformers were in good condition, 44.81 percent of transformers were acceptable and 14.13 percent of transformers should be considered for maintenance.

Keywords: Distribution Transformer, Health Index, Fuzzy Logic

1. บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่ปรับแรงดันและส่งพลังงานไฟฟ้า หากเกิดความเสียหาย อาจส่งผลให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดปกติและไม่สามารถส่งพลังงานถึงผู้ใช้ได้ ดังนั้นการตรวจสอบและประเมินสภาพหม้อแปลงอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งจำเป็น การป้องกันความเสียหายสามารถทำได้โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินสภาพหม้อแปลง เช่น กระแสโหลด อายุการใช้งาน และฉนวนขดลวด จากนั้นให้น้ำหนักกับแต่ละปัจจัยเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมิน เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเหล่านี้ จะสามารถระบุได้ว่าหม้อแปลงอยู่ในสภาพปกติหรือชำรุด และควรได้รับการบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนใหม่หรือไม่ ด้วยวิธีนี้ จะช่วยให้สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเสี่ยงของความเสียหาย และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ดัชนีสุขภาพ (Health Index : HI) เป็นตัวบ่งบอกลักษณะเชิงปริมาณด้านสุขภาพ ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาจากข้อมูลสนับสนุนจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ผลจากการทดลอง ห้องปฏิบัติการ

การประเมินสภาพจริงหรือข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ มาวิเคราะห์เพื่อสร้างดัชนีชี้วัดเชิงปริมาณและสภาพโดยรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า ตามสมการที่ (1)

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^{n}(K \times HIF)_j}{\sum_{i=1}^{n}(K \times HIF_{max})_j} \quad (1)$$

n = ค่าจำนวนหัวข้อการตรวจสอบ
HI = ค่าสุขภาพของหม้อแปลง (Health Index)
K = ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละการตรวจสอบ
HIF = ค่าแฟกเตอร์ดัชนีวัดสุขภาพ (Health Index Factor)
HIF Max = ค่าสูงสุดของแฟกเตอร์ดัชนีวัสุขภาพ

ค่า HI หรือ Health Index คือ ค่าสุขภาพของหม้อแปลง จะแสดงข้อมูลสุขภาพว่าหม้อแปลงที่ได้ ทำการตรวจสอบว่าหม้อแปลงไฟฟ้ามีสภาพดีซึ่งผลของค่าดัชนีกำหนดไว้ที่ 70-100 เปอร์เซ็นต์, สภาพยอมรับได้ 50-70 เปอร์เซ็นต์, สภาพแย่ 30-50 เปอร์เซ็นต์ และสภาพแย่มาก 0-30 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่า K เป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละการตรวจสอบ [1] โดยจะมีเกณฑ์การให้คะแนนอยู่ที่ 1 – 10 ซึ่งค่าที่ 10 จะเป็นค่าที่มีความสำคัญมากที่สุด ซึ่งมาจากการสอบถามผู้เชียวชาญที่เป็นพนักงาน ช่างผู้ชำนาญการ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี ได้มีการกำหนดค่าความสำคัญของแต่ละการตรวจสอบ

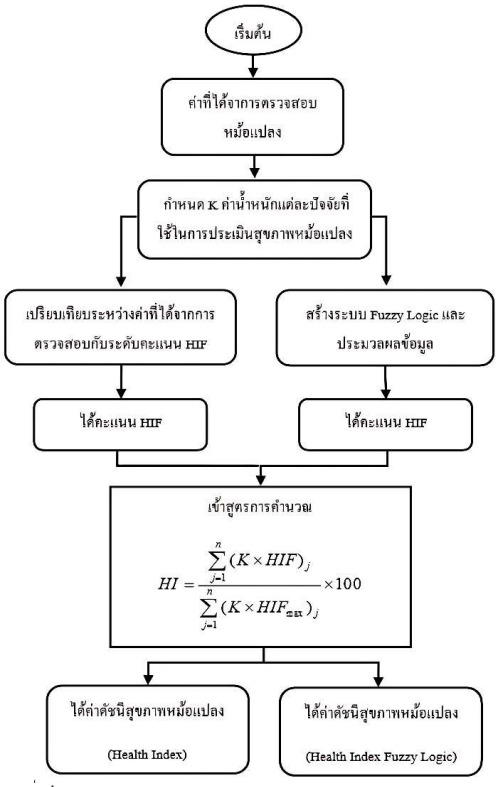
ค่า HIF หรือ Health Index Factor คือ แฟกเตอร์ดัชนีวัดสุขภาพ โดยจะมีการนำค่าที่ได้จาก ข้อมูลแบบฟอร์มการตรวจหม้อแปลงมาใช้ เปรียบเทียบเพื่อ หาค่าแฟกเตอร์ของแต่ละการตรวจสอบ แล้วนำไปใช้ในการคำนวณ ซึ่งค่า แฟกเตอร์ดัชนีวัดสุขภาพจะถูกแบ่งออกเป็น 5 ระดับ [2] ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซต แบบฉบับ โดยฟัซเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 ซึ่งในระหว่างค่านั้นจะเป็น 1 [3]

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function)เป็นฟังก์ชันของการตัดสินใจที่มีการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปร โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่แน่นอน และคลุมเครือ ซึ่งเป็นวิธีการที่สำคัญต่อการตัดสินใจให้ได้ค่าเอาท์พุตของความเป็นสมาชิกเพื่อนำไปใช้ในการดำเนินการฟัซซีผ่านรูปแบบกฎของฟัซซีเพราะรูปแบบของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจึงนำไปสู่กระบวนการคิด ตัดสินใจ

ฟังกัชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function) เป็นฟังก์ชันที่มีพารามิเตอร์ 4 ค่าคือ {a, b, c, d} ดังสมการที่ (2)

$$triangular(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ (d-x)/(d-c) & c \le x \le d \\ 0 & x < d \end{cases} \quad (2)$$

3. วิธีประเมินสภาพ

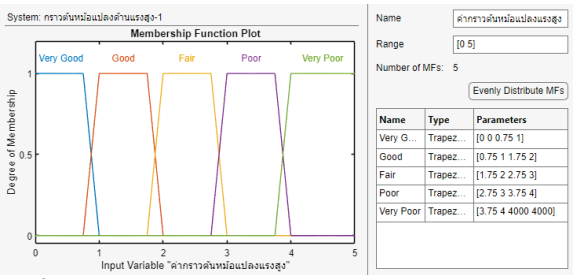


รูปที่ 1 แผนผังการคำนวณสุขภาพหม้อแปลง Health Index

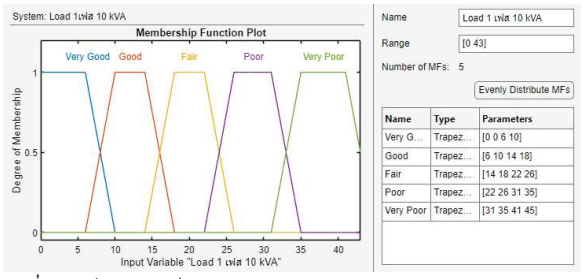
การจำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถจำแนกได้จากข้อมูล 7 ปัจจัยตามตารางที่ 1 ได้จากการเก็บข้อมูลการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรี [4] – [5]

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้จำแนกสภาพหม้อแปลงไฟฟ้า

ปัจจัยทดสอบ / ตรวจสอบ	หน่วย	ค่า K
ค่าฉนวนขดลวด HV – G	เมกะโอห์ม	6
ค่าฉนวนขดลวด LV – G	เมกะโอห์ม	6
ค่าฉนวนขดลวด HV – LG	เมกะโอห์ม	6
ค่ากราวด์ต้นหม้อแปลงด้านแรงสูง	โอห์ม	3
ค่ากราวด์ต้นหม้อแปลงด้านแรงต่ำ	โอห์ม	4
ค่าพิกัดกระแสหม้อแปลง	แอมป์	10
อายุการใช้งานของหม้อแปลง	ปี	8



รูปที่ 2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ค่ากราวด์ต้นหม้อแปลงแรงสูง

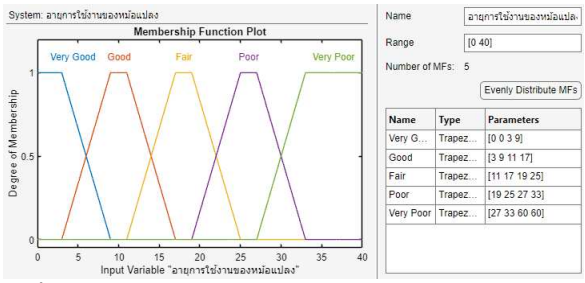


รูปที่ 3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ค่าพิกัดกระแสหม้อแปลง 1 เฟส 10 kVA

ตารางที่ 2 ระดับสภาพของอายุการใช้งานของหม้อแปลง

ปัจจัย	อายุ (ปี)	ระดับสภาพ	ค่า HIF
อายุการใช้งานของหม้อแปลง	0 - 6	Very Good	5
	6 - 14	Good	4
	14 - 22	Fair	3
	22 - 30	Poor	2
	> 30	Very Poor	1

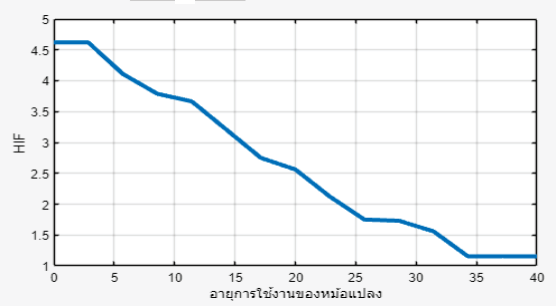
จากตารางที่ 2 อายุการใช้งานหม้อแปลง 0 – 6 ปี ระดับสภาพ Very Good ค่า HIF คะแนนเริ่มตั้งแต่ 5 ค่อยๆลดลงตามสภาพหม้อแปลง



รูปที่ 4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) อายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 4 ช่วงระดับอายุการใช้งาน 6 – 14 ปี (Good) เส้นสีส้ม โดยเริ่มจากผลการทดสอบ 3 ปี ที่มีระดับ ค่าความเป็นสมาชิก (ความเชื่อมั่น) ระหว่าง 0 - 1 อยู่ที่ 3 - 9 ปีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 ที่ 9 – 11 ปีและมีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 - 0 ที่ 11 – 17 ปี

$$triangular(x{:}\,3,9,11,17) = \begin{cases} 0 & x < 3 \\ (x-3)/(9-3) & 3 \le x \le 9 \\ 1 & 9 \le x \le 11 \\ (17-x)/(17-11) & 11 \le x \le 17 \\ 0 & x < 17 \end{cases}$$



รูปที่ 5 กราฟฟัซซีของอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า กับค่าระดับสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าของอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

จากรูปที่ 5 กราฟฟัซซีของอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า ได้จากการออกแบบฟังก์ชั่นความเป็นสมาชิก ซึ่งคะแนน HIF คือ 5 (Very Good) จะค่อยๆลดลง เมื่อหม้อแปลงมีอายุเพิ่มขึ้น อายุการใช้งานของหม้อแปลงจะอยู่ในช่วง 0 – 30 ปี

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

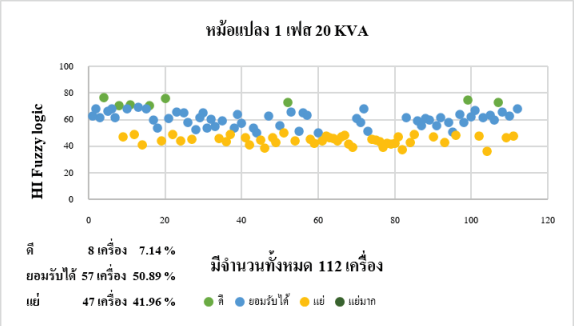
4.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการประเมินดัชนีสุขภาพหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าแบบ 1 เฟส ขนาด 20 kVA (จำนวน 10 เครื่อง จากทั้งหมด 112 เครื่อง)

NO.	HI (%)	HI Fuzzy (%)	สถานะ
1	65.58	62.78	ยอมรับได้
2	72.09	68.24	ยอมรับได้
3	63.72	61.44	ยอมรับได้
4	83.26	76.81	ดี
5	69.30	66.57	ยอมรับได้
6	72.09	68.24	ยอมรับได้
7	66.51	61.71	ยอมรับได้
8	75.35	70.78	ดี
9	50.70	47.19	แย่
10	72.09	68.24	ยอมรับได้

จากตารางที่ 3 เป็นตัวอย่างสถานะของหม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 20 kVA ที่นำมาแสดงไว้ 10 เครื่องจากทั้งหมด 112 เครื่อง สถานะ

ดีมีจำนวน 8 เครื่อง (7.14%), สถานะยอมรับได้มีจำนวน 57 เครื่อง (50.89%), สถานะแย่มีจำนวน 47 เครื่อง (41.96%)



รูปที่ 6 กราฟค่า Health Index Fuzzy logic ของหม้อแปลง 1 เฟส ขนาด 20 kVA

จากรูปที่ 6 หม้อแปลง 1 เฟส 20 kVA สถานะแย่ อยู่ในช่วงอายุ 30 – 50 ปี ควรจะต้องซ่อมแซมหรือRebuild โดยเร็ว

ตารางที่ 4 ค่าสุขภาพของหม้อแปลง (Health Index)

ค่าดัชนีสุขภาพ	สถานะ	การดำเนินการ	อายุการใช้งานที่คาดการณ์
70 - 100	ดี	ดำเนินการตามปกติ	มากกว่า 10 ปี
50 -70	ยอมรับได้	เฝ้าระวัง / บำรุงรักษา	3 – 10 ปี
30 – 50	แย่	ซ่อมแซม / Rebuild	น้อยกว่า 3 ปี
0 - 30	แย่มาก	ซ่อมแซม / สับเปลี่ยนโดยเร็วที่สุด	หมดอายุการใช้งาน

ตารางที่ 5 สถานะหม้อแปลง 1 เฟส

หม้อแปลง 1 เฟส		สถานะ			
ขนาด	จำนวน	ดี	ยอมรับได้	แย่	แย่มาก
10	11	-	6	5	-
20	112	8	57	47	-
30	1028	433	513	82	-
50	12	-	8	4	-
สรุป	1163	441	584	138	-

จากตารางที่ 5 หม้อแปลง 1 เฟส ส่วนใหญ่ยังอยู่ในสถานะ ดี หรือ ยอมรับได้ไม่มีหม้อแปลงใดที่อยู่ในสถานะแย่มาก ควรให้ความสนใจเป็นพิเศษกับหม้อแปลงที่อยู่ในสถานะแย่

5. สรุป

การประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV พิจารณาข้อมูลจากปัจจัยที่ใช้จำแนกสภาพ เช่น ค่าฉนวนของขดลวด ค่าความต้านทานดิน ค่าพิกัดกระแส อายุการใช้งาน เพื่อประเมินสภาพของหม้อแปลงด้วยวิธีคำนวณปกติและวิธีฟัซซี โดยทำการประเมินหม้อแปลงจำหน่ายชนิดสามเฟส 917 เครื่อง มีสถานะหม้อแปลงดี 413 เครื่อง สถานะยอมรับได้ 348 เครื่อง สถานะแย่ 156 เครื่อง และหม้อแปลงแบบเฟสเดียวจำนวน 1,163 เครื่อง มีสถานะหม้อแปลงดี 441 เครื่อง สถานะยอมรับได้ 584 เครื่อง สถานะแย่ 138 เครื่อง โดยไม่พบหม้อแปลงที่มีสถานะแย่มาก ตัวอย่างเช่น หม้อแปลง 1 เฟส 20 kVA หมู่ 8 ต.หนองสาหร่าย อ.ดอนเจดีย์ มีค่า HI เป็น 50.7 เปอร์เซ็นต์ และมีค่า HI Fuzzy logic เป็น 47.19% เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสถานะแย่ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ มีค่า HIF ที่ต่ำ เช่น เนื่องจากมีอายุการใช้งาน 45 ปี โดยวางแผนกิจกรรมบำรุงรักษาหม้อแปลงเครื่องนี้ ได้แก่ การเปลี่ยนน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า การอบขดลวดไล่ความชื้น การเปลี่ยนซีลยาง บุชชิ่ง เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดสุพรรณบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

[1] Azmi Murad A. Aziz, Mohd Aizam Talib, S.A. Mutalib Al Junid S.A.R, Ahmad Farid Arifin, “Development of Condition Health and Risk Index of Transformer Population,” 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon).

[2] Wang Jian, Zhu Wenbing, Gu Chao, Bai Demeng, Wu Kuihua, “The New Developed Health Index for Power Transformer Condition Assessment,” 2020 IEEE.

[3] กิตติศักดิ์ ไชยสุวรรณ, “ การประยุกต์ฟัซซีลอจิกสำหรับประเมินสภาพหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย 33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2565

[4] M. R. Ahmed, M. A. Geliel1, A. Khalil, “Power Transformer Fault Diagnosis using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis,” 2013 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) Platanias-Chania, Crete, Greece, June 25-28, 2013.

[5] Ricardo Manuel Arias Velásquez, Jennifer Vanessa Mejía Lara, Andres Melgar, “Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers,” Engineering Failure Analysis Volume 101, July 2019, Pages 215-229.

การพัฒนาระบบแจ้งเตือนไฟดับสำหรับระบบจำหน่ายด้านแรงดันต่ำ

Development of Power Outage Warning for Low Voltage Distribution System

ปิยะ ศรีสุขขี[1] นนท์ปวิธ ผัดศิริ[1] ขจรศักดิ์ เทพผดุง[1] สุรพล โรจนประดิษฐ[1] สยามรัฐ เพิกอาภรณ์[1] เฉลียว เกตุแก้ว[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์สุพรรณบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
450 หมู่ 6 ต.ย่านยาว อ.สามชุก จ.สุพรรณบุรี 72130 โทรศัพท์ 035-434 014 Email: chaliew.k@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการตรวจสอบและแจ้งเตือนการทำงานระบบไฟฟ้าขัดข้องด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่ายแบบ 1 เฟส และ 3 เฟส โดยอุปกรณ์ PZEM004 รับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า และรับข้อมูล วันเวลา ตำแหน่งติดตั้ง รวมรวบประมวลผลโดยบอร์ด ESP 32 ให้สั่งจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่หลอดไฟ ประมวลผลและสั่งการแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชัน LINE Notify แสดงค่าต่างๆผ่าน แอพพิลเคชัน Blynk และยังสามารถทำงานได้หากเกิดไฟดับทั้ง 3 เฟส โดยระบบแจ้งเตือนไฟฟ้าดับมีแบตเตอรี่สำรองใช้งานได้ประมาณ 1-3 ชม. เพียงพอต่อการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องในหน้างานจริง ทดสอบอุปกรณ์บอกสถานะแรงต่ำที่สร้างขึ้น โดยทดสอบดับไฟในห้องปฏิบัติการ โดยผลจากการทดสอบ พบว่าอุปกรณ์แจ้งเตือนไฟดับแรงต่ำ สามารถแจ้งเตือนสถานะการทำงานของแรงดันที่ผิดปกติ โดยระบุตำแหน่ง และเฟสที่เกิดการชำรุดด้วยแสง LED แสดงข้อความแจ้งเตือนผ่านแอพพลิเคชั่น LINE Notify แสดงค่าต่างๆผ่าน แอพพิลเคชัน Blynk และยังเก็บบันทึก load Profile Data ในแต่ละเฟสได้ในขณะที่ไฟดับ ระบบแจ้งเตือนไฟดับด้านแรงดันต่ำที่สร้างขึ้นนี้เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้ไฟฟ้าและผู้ปฏิบัติงานของการไฟฟ้าให้ได้รับความสะดวก รวดเร็ว ในการ ตรวจสอบและแก้ไขระบบไฟฟ้าให้กลับมาใช้งานอย่างปกติ

คำสำคัญ: การแจ้งเตือนไฟดับ, ระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ, กราฟคุณลักษณะโหลด

Abstract

This paper presents the design and development of a prototype device for monitoring and alerting malfunctions in the low-voltage system of single-phase and three-phase distribution transformers. The device utilizes a PZEM-004 module to measure voltage, current, and power on the low-voltage side of the transformer. It also collects data on date, time, and installation location, which are processed by an ESP32 board. The ESP32 controls the power supply to indicator lights and sends alerts via the LINE Notify application. Additionally, it displays real-time data through the Blynk application. The system remains functional even in the event of a total power outage across all three phases, as it is equipped with a backup battery that can operate for approximately 1 to 3 hours—sufficient for troubleshooting power failures on-site. The prototype was tested in a laboratory setting by simulating a power outage. The test results showed that the low-voltage power outage alert device successfully detected abnormal voltage conditions, identified the affected phase, and indicated the malfunction using LED lights. Notifications were sent through LINE Notify, and real-time values were displayed via the Blynk application. Furthermore, the system recorded load profile data for each phase even during power outages. This low-voltage outage alert system provides significant benefits to electricity users and utility personnel by enabling quick and efficient troubleshooting of power system failures, ensuring a faster return to normal operation.

Keywords: Power Outage Notification, Low Voltage Distribution System, Load Profile

1. บทนำ

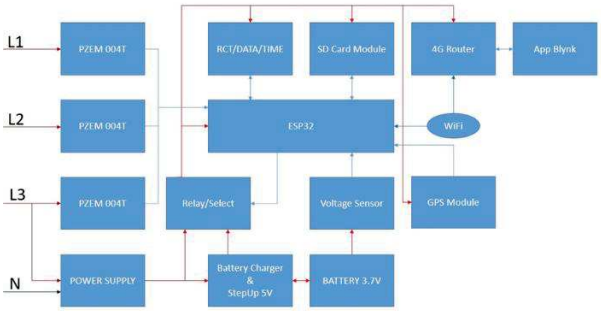
ระบบแจ้งเตือนไฟดับสำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่าย 22 kV/400V_{L-L}-230 V_{L-N} เป็นการแจ้งเตือนที่ให้ประโยชน์ในการลดระยะเวลาในการตรวจสอบแก้ไขระบบไฟฟ้าขัดข้องหลังจากการเกิดเหตุการณ์ไฟดับ ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟดับต้องอาศัยบุคคลหรือผู้ใช้ไฟในพื้นที่เป็นผู้แจ้งการเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องไปยังการไฟฟ้า โดยระบบจะทำงานเมื่อมีการตรวจพบความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้าจากหม้อแปลงจำหน่ายด้านแรงต่ำที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรวจจับแรงดันที่จ่ายเข้าสู่ชุดแจ้งเตือนไฟดับ ดังนั้นเมื่อเวลาไฟดับระบบจะทำการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้า ตำแหน่งพิกัดละติจูด(Latitude) ลองจิจูด(Longtitude)ของหม้อแปลงจำหน่ายลูกที่มีความขัดข้อง สามารถระบุได้ว่าระบบไฟฟ้าที่เกิดปัญหานั้นเกิดขึ้นที่เฟสใด และสามารถแจ้งเตือนได้เมื่อมีการจ่ายไฟฟ้ากลับมาเป็นปกติแล้วไปยังผู้ปฏิบัติงานหรือการไฟฟ้าโดยตรง

บทความนี้เป็นการพัฒนาระบบแจ้งเตือนไฟดับจากโครงงานวิศวกรรมครั้งก่อนที่จัดสร้างและทดสอบให้มีขนาดเล็กลงและมีระบบพลังงานสำรองเก็บไว้ในแบตเตอรี่เพื่อจ่ายไฟหากเกิดไฟดับ[6]-[7]

ระบบแจ้งเตือนไฟดับด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถทำงานโดยส่งข้อความแจ้งเหตุไฟดับอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยใช้อุปกรณ์เล็กทรอนิกส์เข้ามาควบคุมการทำงานเพื่อลดระยะเวลาไฟดับและให้เกิดความพึงพอใจต่อผู้ใช้ไฟฟ้า โดยให้ระบบแจ้งเตือนไฟดับโดยผ่านการตรวจจับของเซ็นเซอร์วัดแรงดัน เพื่อส่งข้อความทางแอปพลิเคชัน บอกพิกัดตำแหน่งของหม้อแปลงที่ติดตั้ง ซึ่งการส่งจะอยู่ในเงื่อนไขคำสั่งโดยเขียนโปรแกรมภาษาซีให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานเพื่อสั่งการทำงานของระบบ[1]-[5]

2.ขั้นตอนการทำงาน

ขั้นตอนการทำงานของชุดอุปกรณ์ในส่วนของการไฟฟ้าเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าโดยจะมีการติดตั้งฟิวส์แรงต่ำหรือ High Rupturing Capacity (HRC) Fuse Link เป็นอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit) ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อป้องกันการจ่ายโหลดที่เกินพิกัดหรือการใช้ไฟเกินพิกัด (Over Load) ด้านระบบจำหน่ายแรงดันต่ำก่อนถึงผู้ใช้ไฟฟ้า

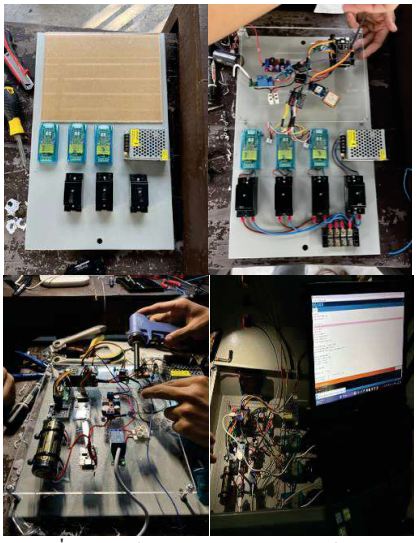


รูปที่ 1 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ระบบแจ้งเตือน

การต่อใช้งานนั้นจะเชื่อมต่อสาย L1 L2 และ L3 ที่มาจาก HRC Fuse Link ทางด้านขาออกของหม้อแปลงจำหน่ายด้านแรงดันต่ำทั้ง 3 เฟส เข้ากับ PZEM-004T ทั้ง 3 ตัวดังรูปที่ 1คล้อง CT เข้ากลับสายทางด้านขาออกของ HRC Fuse Link ช่วงสายที่ว่างก่อนขึ้นติดตั้งกับลูกถ้วยและต่อสายไฟฟ้าเพิ่มอีกหนึ่งสาย เฟสใดก็ได้ 1 เฟส เข้ากับ Power Supply เพื่อแปลงไฟ 230 V_{AC} เป็นแรงดัน 5V_{DC} ไปยังรีเลย์ ในหน้าคอนแทคปกติเปิด NO และในหน้าคอนแทคปกติปิด NC เป็นการใช้ไฟจากแบตเตอรี่สำรองรีเลย์จ่ายไฟไปยัง RTC DS1307 เพื่อส่งข้อมูล วัน/เวลา/ปี มี SD Card Module เพื่อบันทึกข้อมูลของ แรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้า มี GPS MODULE เพื่อระบุตำแหน่งจุดที่ติดตั้ง , 4G Router ระบบเครือข่ายการส่งข้อมูล และต่อเข้ากับ ESP-32 รับข้อมูลต่าง ๆ และส่งข้อมูลไปแสดงยัง Blynk Application และต่อ LED Module เพื่อแสดงสถานะหน้าตู้ หากเกิดไฟฟ้าดับที่เฟสที่เชื่อมต่อไฟฟ้าเข้ามาเลี้ยงระบบ ESP-32 จะสั่งรีเลย์เปลี่ยนหน้าคอนแทคเป็น NC เพื่อใช้ไฟจากแบตเตอรี่สำรอง อยู่ได้ไม่น้อยกว่า 2 ชม. และเมื่อไฟฟ้าระบบไฟฟ้าจ่ายไฟได้ตามปกติหรือได้รับการแก้ไขปัญหาเรียบร้อยแล้ว ESP-32 จะสั่งรีเลย์เปลี่ยนหน้าคอนแทคเป็น NO เพื่อใช้ไฟฟ้าจากหม้อแปลง และประจุแบตเตอรี่ด้วย Battery Charger เมื่อแบตเตอรี่เต็มแล้วจะตัดการประจุแบตเตอรี่โดยอัตโนมัติ

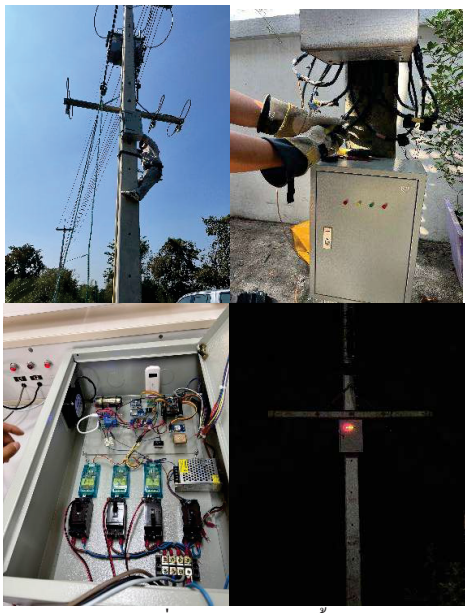
3.โครงสร้างและการออกแบบทดลอง

3.1 ออกแบบจัดวางอุปกรณ์และทดสอบการโปรแกรม



รูปที่ 2 การสร้างและออกแบบระบบแจ้งเตือน

3.2 ทดสอบและติดตั้งจริงในห้องทดลองและหน้างานจริง



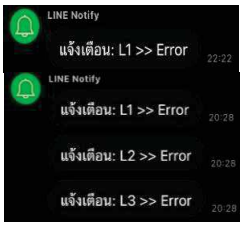
รูปที่ 3 ทดสอบและติดตั้ง

ออกแบบการวางตำแหน่งอุปกรณ์ภายในตู้และทำการเชื่อมต่อสายดังรูปที่ 2 และหลังจากทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อสังเกตุผลการแจ้งเตือนเหตุการณ์ไฟดับ ทดสอบการจ่ายไฟของแบตเตอรี่สำรองแล้วว่าสามารถจ่ายไฟเลี้ยงระบบได้หากเกิดไฟดับในเฟสที่เป็นไฟเลี้ยง

ชุดแจ้งเตือน จากนั้นนำไปติดตั้งบริเวณหลังหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อทำการทดสอบเก็บผลการบันทึกค่ากราฟคุณลักษณะโหลด(Load Profile) และการเกิดไฟฟ้าดับใต้ไลน์แรงต่ำหลังหม้อแปลงดังรูปที่ 3

4. ผลการทดลอง

4.1 การแจ้งเตือน



รูปที่ 4 การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

4.2 การแสดงผล

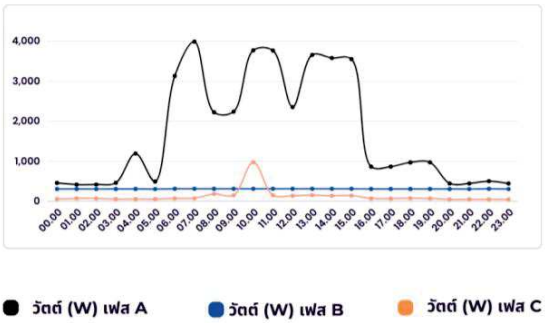


รูปที่ 5 การแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

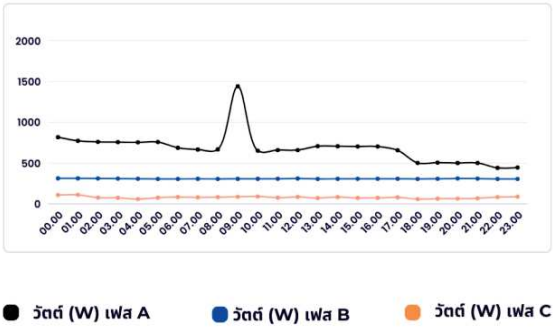


รูปที่ 6 การแสดงผลผ่าน LED หน้าตู้

4.3 การบันทึก Load Profie Data

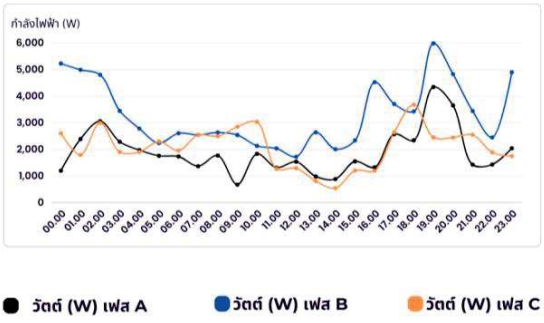


รูปที่ 7 กราฟคุณลักษณะโหลดวันทำการ (วันพฤหัสบดีที่ 16 ม.ค. 2568)

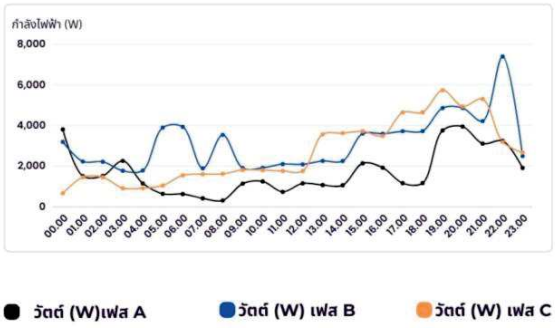


รูปที่ 8 กราฟคุณลักษณะโหลดวันหยุด (วันเสาร์ที่ 11 ม.ค. 2568)

ทดสอบการแจ้งเตือนไฟดับผ่าน Line Notify และแอพ Blynk ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงสถานะด้วยหลอด LED ที่หน้าตู้ดังรูปที่ 6 การเก็บค่าการใช้พลังของสำนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอบางปลาม้าบางส่วนดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ที่มีการใช้โหลดเป็นเครื่องปรับอากาศและระบบแสงสว่างรวมทั้งระบบคอมพิวเตอร์บางส่วนโดยได้รับความอนุเคราะห์ติดตั้งระบบแจ้งเตือนไฟดับเป็นการชั่วคราว เพื่อทดสอบตัวอย่างการเก็บข้อมูล Load Profie โดยตั้งค่าการบันทึกผลเป็นระยะเวลาทุก 1 นาที โดยแต่ละเฟสมีกำลังไฟฟ้าไม่เท่ากันเนื่องจากเป็นโหลดของแต่ละห้องที่เป็นงานต่างแผนกกันและบางห้องเป็นห้องอุปกรณ์สื่อสาร



รูปที่ 9 กราฟคุณลักษณะโหลดวันธรรมดา (วันจันทร์ที่ 10 มีนาคม 2568)



รูปที่ 10 กราฟคุณลักษณะโหลดวันหยุด (วันอาทิตย์ที่ 9 มีนาคม 2568)

จากรูปที่ 9 แสดงกราฟคุณลักษณะโหลดวันธรรมดาและรูปที่ 10 แสดงกราฟคุณลักษณะโหลดวันหยุด เป็นการเก็บค่ากำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงในระบบจำหน่าย ขนาด 50 kVA รับไฟจากสายป้อน BPM07 จ่ายโหลดแบบ 1 วงจร ติดตั้งบริเวณหน้าวัดแห่งหนึ่งในตำบลสาลี อ.บางปลาม้า มีการใช้โหลดที่หลากหลายแต่ละช่วงเวลา มีการใช้โหลดที่ไม่แน่นอนในภาคครัวเรือนและภาคการเกษตรรวมถึงโรงงานขนาดเล็กบางส่วน โดยได้รับความอนุเคราะห์ติดตั้งระบบแจ้งเตือนไฟดับเป็นการชั่วคราว เพื่อทดสอบการแจ้งเตือนไฟดับและทดสอบบันทึกข้อมูล Load Profile Data โดยตั้งค่าการบันทึกผลเป็นระยะเวลาทุก 1 นาที เฟส A จะเป็นการเก็บโหลดของหมู่ที่ 1-2 เฟส B จะเป็นการเก็บโหลดของหมู่ที่ 3-4 เฟส C จะเป็นการเก็บโหลดของหมู่ที่ 5-7 โดยเฟส A มีโหลดสูงสุดประมาณ 3.9 กิโลวัตต์ มีการจ่ายโหลดสูงสุดในช่วงเวลา 19.00 – 21.00 น. เฟส B มีโหลดสูงสุดประมาณ 7.4 กิโลวัตต์ มีการจ่ายโหลดสูงสุดช่วงเวลา 22.00 – 23.00 น. และเฟส C มีโหลดสูงสุดประมาณ 5.7 กิโลวัตต์ มีการจ่ายโหลดเสูงสุดช่วงเวลา 19.00 – 20.00 น.

5. สรุป

เครื่องแจ้งเตือนไฟดับสามารถช่วยลดเวลาในการแก้ไขไฟฟ้าขัดข้องโดยการแจ้งเตือนจาก Line Notify และแสดงค่ากำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า แรงดันและกระแสไฟฟ้าในแอพพลิเคชั่น Blynk ทั้งไฟแสดงสถานะที่หน้าตู้หากเกิดไฟฟ้าดับ เมื่อระบบจ่ายไฟฟ้ากลับคืนมาหลอดไฟสถานะหน้าตู้จะกลับมาติดอีกครั้ง แต่ยังมีข้อจำกัดในอุปกรณ์บางตัว เนื่องจากการทำเครื่องแจ้งเตือนไฟดับอาจจะต้องทำงานตลอดเวลาและกินเวลานานติดต่อกัน จึงทำให้อุปกรณ์บางตัวเกิดความร้อนและเสียหาย ไม่ทนต่อสภาพอากาศนอกห้องทดลอง ส่วนแบตเตอรี่สำรองใช้งานได้ดี แบตเตอรี่มีความจุเพียงพอต่อการใช้งาน และเครื่องสามารถบันทึกข้อมูลโหลดโปรไฟล์ และสามารถนำมาใช้วิเคราะห์สภาพการใช้ไฟฟ้าเพื่อบริหารจัดการโหลดหลังหม้อแปลงจำหน่ายได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอำเภอบางปลาม้า ตำบลโคกคราม จังหวัดสุพรรณบุรี

เอกสารอ้างอิง

[1] พัฒพงษ์ อมรวงษ์. (2554) การเขียนโปรแกรมภาษาซี, มีเดียอินเทลลิเจนซ์เทคโนโลยี.

[2] เจษฎา ชินรุ่งเรือง. (2553) เฉลยปัญหาทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3] มัทนา ปราการสมุทร (2534) การเขียนชุดคำสั่งภาษาซี, ดวงกมลสมัย.

[4] Arduinoall. (2019). บทความ Arduino [ออนไลน์], แหล่งที่มา https://www.arduinoall.com/article

[5] ไมโครคอนโทรลเลอร์. (2556). ไมโครคอนโทรลเลอร์ [ออนไลน์],แหล่งที่มา http://jumpstartinnovation.blogspot.com/2013/07/blog-post.html

[6] อริยวัฒน์ ตั้งจิตรเจริญ, ชิตพล สีลาโคตร และ จรรย์อมล อินทร์หอม.(2562). โครงงานวิศวกรรมไฟฟ้าเรื่องระบบแจ้งเหตุไฟฟ้าดับด้านแรงต่ำสำหรับหม้อแปลงจำหน่าย, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ศูนย์สุพรรณบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

[7] พีรินทร์ แสนประเสริฐ ณัชพล ช้างเขียว รติพงษ์ สมบูรณ์ ธงชัย ฉายอรุณ สยามรัฐ เพิกอาภรณ์ สุรพล โรจนประดิษฐ ภัควัฒน์ จันทร์ตรี วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง เฉลียว เกตุแก้ว และโสภา แซ่เส้ง “การศึกษาระบบแจ้งเตือนไฟดับสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ” การประชุมเครือข่ายวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 (EENET2024), โรงแรมอัศวรรณ อ.เมือง จ.หนองคาย, หน้า 93-96, วันที่ 29-31พฤษภาคม 2567

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เทคนิค FMECA สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคา

Technical FMECA for Lightning Protection System Integrate Photovoltaic Hybrid System on Rooftop

นาวิน รอดเรือง[1] ปพน งามประเสริฐ[2] ณัชพล เรืองทรัพย์[1,3] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
[3]การไฟฟ้านครหลวง
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิค FMECA สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคา เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าดังกล่าว ประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าพิจารณาจาก 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ประสิทธิภาพ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และด้านการเงิน โดยมีการเก็บรวบรวมข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMECA ผลการวิเคราะห์พบว่า เทคนิค FMECA สามารถช่วยระบุจุดที่มีความเสี่ยงสูงสุดในระบบป้องกันฟ้าผ่า

คำสำคัญ: ระบบป้องกันฟ้าผ่า, ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, เทคนิค FMECA

Abstract

This article presents the technical FMECA for lightning protection system integrate photovoltaic hybrid system on rooftop. The objective is to analyze and improve the quality of the lightning protection system for greater efficiency. The evaluation of the lightning protection system considers four key factors: efficiency, environmental impact, safety or reliability, and financial aspects. Data is collected and then analyzed using the Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) technique. The analysis results indicate that FMECA can effectively identify the highest-risk points in the lightning protection system.

Keywords: Lightning Protection System, Solar Power Generation System, FMECA Technique

1. บทนำ

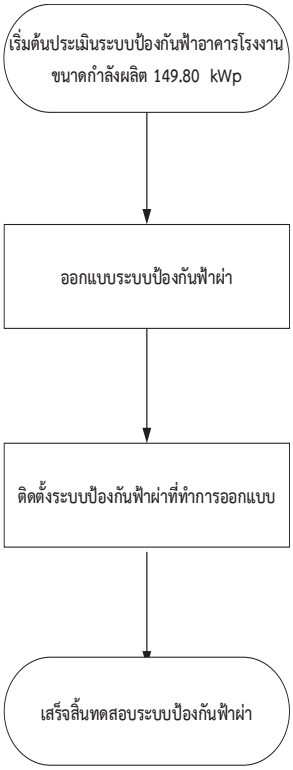
การวิเคราะห์ทางเทคนิคด้วยโหมดความล้มเหลว ผลกระทบและความรุนแรง (Failure mode, effects, and criticality analysis : FMECA) ในอดีตมีบทความศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเทคนิค FMECA เช่น ในปี ค.ศ. 2024 [1] การวิเคราะห์ความล้มเหลวและการประเมินความน่าเชื่อถือของเครื่องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ในบทความนี้ FMECA เพื่อวิเคราะห์ระบบอุปกรณ์ของเครื่องถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความล้มเหลวของส่วนประกอบวงจรถ่ายภาพเป็นโหมดความผิดปกติที่สำคัญในระบบอุปกรณ์ถ่ายภาพความร้อนอินฟราเรด ในปี ค.ศ. 2024 [2] การวิเคราะห์ความล้มเหลวและการประเมินความน่าเชื่อถือตามการเสื่อมสภาพของไฟเบอร์ออปติกไจโรสโคป (Fiber optic gyroscope : FOG) โหมดความล้มเหลวผลกระทบและการวิเคราะห์วิกฤต (FMECA) จึงถูกนำมาใช้ในบทความนี้เพื่อดำเนินการสร้างแบบจำลองความน่าเชื่อถือตามการเสื่อมสภาพและการประเมินอุปกรณ์และเพื่อระบุการเชื่อมโยงที่อ่อนแอที่สุด ผลการวิเคราะห์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของไฟเบอร์ออปติกไจโรสโคป (FOG) ในปี ค.ศ. 2023 [3] การประเมินความเสี่ยงของระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานบนหลังคาในโรงงานโดยใช้เทคนิค FMECA กรณีศึกษามุ่งเน้นไปที่ฟ้าผ่าส่งผลกระทบต่อระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาแบบผสมผสาน ซึ่งนำไปสู่ความเสียหาย วิธี FMECA พิสูจน์แล้วว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษา ในปี ค.ศ. 2023 [4] การตรวจจับความผิดพลาดของเครื่องค้วานและกัดโครง สำหรับตั้งสิ่งของตาม FTA และ FMECA วิเคราะห์ตาราง FMECA สำหรับกลไกความผิดพลาดความถี่สูงที่มีความสำคัญวิกฤตสูง มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือของแผนผังความผิดพลาด ในปี ค.ศ. 2020 [5] การวิเคราะห์เปรียบเทียบความ

น่าเชื่อถือสำหรับระบบ PV แบบสตริงและอินเวอร์เตอร์ FMECA เทคนิคนี้ถูกนำไปใช้กับความผิดพลาดที่พบบ่อยที่สุด และนำเสนอการวิเคราะห์เปรียบเทียบอิทธิพลของแนวคิดของระบบที่มีต่อความน่าเชื่อถือของระบบ

2. กรอบแนวคิดและความเป็นมา

2.1 กรอบแนวคิด

กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัยดังนี้ ทำการประเมิน หลังจากประเมินด้วยเทคนิค FMECA จึงทำการออกแบบตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย หลังจากนั้นติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าที่ออกแบบและวัดค่าทดสอบระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการประเมิน

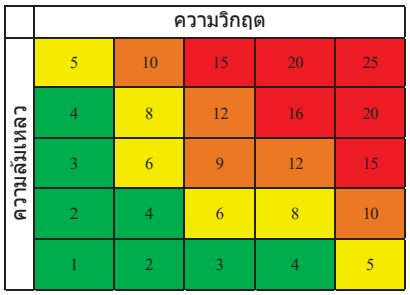
2.2 ความเป็นมา

บทความนี้ได้นำเสนอการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า อาคารสำนักงานของโรงงาน ที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานกำลังการผลิต 149.80 kWp จำนวน 20 สตริง 14 โมดูล 1 อินเวอร์เตอร์แบบผสมผสาน แบตเตอร์รี่ขนาด 75 kWh ซึ่งอาคารโรงงานมีความสูงกว่าบริเวณโดยรอบ ดังแสดงในรูปที่ 2 แต่ในส่วนของขนาดพื้นที่หลังคาไม่มีผลกับการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่าแต่มีผลในการออกแบบและติดตั้ง และเนื่องจากอาคารโรงงานไม่มีการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า จึงมีความจำเป็นต้องมีการประเมินความเสี่ยง เพื่อออกแบบและติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 2 พื้นที่ติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าบนหลังคาโรงงาน

จึงทำให้เกิดการประเมินโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์โหมดความล้มเหลว ผลกระทบ และความรุนแรง โดยการเก็บข้อมูลลงในโปรแกรม Microsoft Excel หลังจากทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FMECA ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับเมทริกซ์วิกฤต [3] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 เมทรกซ์วิกฤตที่ใช้ทำการประเมิน

หลังจากทำการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่ามีการทดสอบค่าความต้านท้านดิน เพื่อตรวจสอบค่าความต้านทานเหมาะสมกับการติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน ผลทดสอบค่าความต้านทานอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ซึ่งไม่เกิน 5 โอห์ม

3. กรณีศึกษา

ในการประเมินสภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า ถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วนประกอบ ซึ่งประกอบด้วย หัว Air Terminal สายทองแดงเปลือย แท่งตัวนำลงดิน บ่อกราวด์ ท่อพีวีซี Ground Test Box Sandle Clamp Support และ Exthermo Weld วิธีการทดสอบที่จำเป็นสำหรับการประเมินสภาพของแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินสภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า

ลำดับ	ส่วนประกอบ	การทดสอบ	ด้านการเงิน (ร้อยละ)
1	หัว Air Terminal สูง 0.60 เมตร	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	11.44
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	22.94
3	แท่งตัวนำลงดินเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x10 นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	6.28
4	บ่อกราวด์	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	5.29
5	ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ¼ นิ้ว	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	2.34
6	Ground Test Box	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	8.99
7	Sandle Clamp Support	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	28.64
8	Exthermo Weld	การตรวจพินิจด้วยสายตา, การตรวจความปลอดภัย, การตรวจสิ่งแวดล้อม	12.93

หลังจากทำการเก็บข้อมูลลงโปรแกรม Microsoft Excel จึงนำคะแนนมาลงในตารางแถวที่ 1 – 4 และลำดับอุปกรณ์ 1 – 8 ดังแสดงในตารางที่ 2 ยกตัวอย่างเช่น ประเมินคะแนนด้านประสิทธิภาพได้มาจะลงในแถวที่ 1 ตามลำดับของอุปกรณ์ที่ทำการประเมิน

ตารางที่ 2 ตารางผลการประเมินระบบป้องกันฟ้าผ่า

แถวที่		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ลำดับที่	ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า	ความรุนแรง				ความน่าจะเป็น	ความวิกฤติ			
		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน		ประสิทธิภาพ	สิ่งแวดล้อม	ความปลอดภัย	การเงิน
1	แท่งตัวนำ	5	5	4	2	5	25	25	20	10
2	สายทองแดงเปลือย 70 ตร.มม.	5	5	4	2	5	25	25	20	10
3	แท่งตัวนำลงดินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 x10 นิ้ว	5	5	4	1	5	25	25	20	5
4	บ่อกราวด์	5	5	4	1	5	25	25	20	5
5	ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1¼นิ้ว	5	5	4	1	5	25	25	20	5
6	Ground Test Box	5	5	4	1	5	25	25	20	5
7	Sandle Clamp Support	5	5	4	2	5	25	25	20	10
8	Exthermo Weld	5	5	4	1	5	25	25	20	5

จากตารางที่ 2 ต้องทำการหาค่าความวิกฤติ โดยทำการนำแต่ละแถวที่ และแต่ละลำดับ นำมาคูณ เพื่อให้ได้คะแนนความวิกฤติ ยกตัวอย่างเช่น จะหาความวิกฤติของประสิทธิภาพ ในอุปกรณ์ลำดับที่ 1 โดยทำการนำคะแนนจาก แถวที่ 1 ลำดับที่ 1 มาคูณกับ แถวที่ 5 ลำดับที่ 1 จะได้ค่าดังนี้ 5 x 5 = 25 และนำค่ามาใส่ในความวิกฤติของประสิทธิภาพในอุปกรณ์ลำดับที่ 1 และผลลัพธ์คะแนนความวิกฤติถูกคำนวณและนำไปพล็อตลงในเมทริกซ์ความวิกฤติ 4 ด้าน ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และด้านการเงิน แสดงในรูปที่ 4

ความรุนแรง \ ความวิกฤติ					
	9 5	9 10	15	20	6 7 25
	4	8	12	16	8 20
	3	6	9	12	15
	2	4	6	8	10
	1	2	3	4	5

รูปที่ 4 ผลลัพธ์คะแนนความวิกฤติ

จากรูปที่ 4 กรอบตัวเลขคะแนนสีดำที่กำหนดลงเมทริกซ์ความเสี่ยงตั้งแต่เลข 6-9 ซึ่งได้จากตารางที่ 2 คือ ความวิกฤติ 4 ด้าน ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัย และด้านการเงิน ตามลำดับ และแสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยงสูงสุดในการปฏิบัติงาน เนื่องจากความสำคัญในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดง เนื่องจากไม่มีระบบป้องกันฟ้าบนอาคารโรงงานและสภาพอาคารโดยรอบของอาคารโรงงานต่ำกว่าอาคารในด้านการเงินอยู่ในเขตสีเหลือง และสีส้ม

4. สรุป

จากการประเมินพบว่า ไม่มีระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้การประเมินเพื่อจัดหาวิธีที่มีประสิทธิภาพจะพิจารณาเกณฑ์ความรุนแรง 4 ประการ ดังนี้ ประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ และการเงิน โดยการเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel และแสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญและการบริหารจัดการการบำรุงรักษาระบบป้องกันฟ้าผ่า โดยใช้เทคนิค FMECA ผลลัพธ์ของการประเมินด้วยเทคนิค FMECA โดยการประเมินแสดงให้เห็นในด้านประสิทธิภาพ สิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยหรือความน่าเชื่อถือ อยู่ในเขตโซนสีแดง ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงสูงมากของระบบ ด้านการเงินอยู่ในเขตเหลือง และส้ม ซึ่งบ่งบอกให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เทคนิค FMECA เป็นเครื่องมือในการประเมินประสิทธิภาพระบบป้องกันฟ้าผ่า ซึ่งจะดำเนินการให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่า หรือเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเช็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Li, J. Wei, T. Zhang, H. Huang and Y. Zeng, "Failure analysis and reliability assessment of infrared thermal imager," 14th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2024), 2024, pp. 1453-1459, doi: 10.1049/icp.2024.3678.

[2] N. Li, J. Wei, T. Zhang and H. Huang, " Failure analysis and degradation-based reliability assessment of a fiber optic gyroscope," 14th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2024), pp. 414-419, 2024, doi: 10.1049/icp.2024.3466.

[3] N. Charlangsut, N. Rodrueang, S. Woothipatanapan, M. Boonthienthong, P. Ngamprasert, and N. Rugthaicharoencheep, " Risk Assessment of the Lightning Protection System for Hybrid Solar Power Generation Rooftop System on the Factory Using the FMECA Technique," 2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), pp. 167-172, 2023, doi: 10.1109/ICPEI61831.2024.10748622.

[4] Z. Guo, H. Sun, Y. Yin and J. Zou, " Fault detection of gantry boring and milling machine based on FTA and FMECA," 12th International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2022), pp. 1514-1521, 2022, doi: 10.1049/icp.2022.3081.

[5] Z. Guo, H. Sun, Y. Yin and J. Zou, " Comparative Analysis of Reliability for String and Central Inverter PV Systems in Accordance with the FMECA," 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 591-596, 2020, doi: 10.1109/PEDG48541.2020.9244404.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การยกระดับเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้ UPFC

Enhancing of Voltage Stability for Electric Vehicle Charging Stations by Applying the UPFC

ชวลิต ทองดี[1] ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1] ยุทธณา คงจีน[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] กาณฑ์ เกิดชื่น[1] และ นพณัฐ จิตกรียาน[1*]
[1*]หน่วยวิจัยไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail: noppanut.ch@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้าส่งผลกระทบหลายด้านต่อระบบไฟฟ้าอย่างเลี่ยงไม่ได้ บทความนี้นำเสนอการยกระดับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสำหรับการติดตั้งสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Charging Station, EVCS) ด้วยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified Power Flow Controller, UPFC) เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีการหมาป่าสีเทา (Gray Wolf Optimization, GWO) นำมาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดตำแหน่ง UPFC ร่วมกับการติดตั้ง EVCS โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายแบบผสมผสาน (Hybrid Objective Function) เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว ระบบทดสอบ IEEE 33 บัส โดยจำลองใน 6 กรณีศึกษา ผลการจำลองพบว่าทั้ง 6 กรณีศึกษาสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้ โดยมีอัตรากำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง 70.53 % และปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 95.43 % ดังนั้น ตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของ UPFC และ EVCS ส่งผลให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงและเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การหาค่าที่เหมาะสมวิธีการหมาป่าสีเทา, ตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม, สถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า, เสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า

Abstract

The rise of electric vehicles has inevitably impacted the electrical power system in many ways. This paper presents voltage stability enhancement for electric vehicle charging stations (EVCS) installations by applying a unified power flow controller (UPFC). The Gray Wolf Optimization (GWO) technique is applied to determine the UPFC placement together with EVCS installation with a hybrid objective function to reduce power loss and improve steady-state voltage stability of the IEEE 33-bus test system by simulating 6 case studies. The simulation results show that all 6 case studies can reduce the power loss and improve the voltage stability, with the power loss rate decreasing by 70.53 % and the voltage stability improving by 95.43 %. Therefore, the proper location and size of UPFC and EVCS result in significantly reduced power loss and improved voltage stability in the power distribution system.

Keywords: Gray Wolf Optimization (GWO), UPFC, Electric Vehicle Charging Station, Voltage Stability

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาด้านเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายจากการขยายตัวของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นประเด็นที่มีผลกระทบในระดับโลกและหลายๆ ประเทศต้องเผชิญกับความท้าทายในการปรับสมดุลระหว่างความต้องการใช้พลังงาน รวมถึงการบริหารจัดการโครงข่ายไฟฟ้าให้รองรับการเปลี่ยนแปลงของแหล่งพลังงานและรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและการขยายตัวของยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการสถานีประจุไฟฟ้าการเปลี่ยนแปลงนี้สร้างผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System) อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา Peng Wu และคณะ [1] ได้นำเสนอการติดตั้งวางตัวควบคุมการไหลกำลังไฟฟ้าแบบรวม (Unified Power Flow Controller, UPFC) เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าแบบสถิตของระบบไฟฟ้าที่บัสอ่อนแอที่สุดจากผลกระทบเมื่อมีการเชื่อมต่อกับระบบพลังงานโซล่าเซลล์ Abhay Raj และคณะ [2] ได้นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันโดยใช้ดัชนีเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า FVSI และ LSI วิเคราะห์บัสที่อ่อนแอที่สุด เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้ง UPFC โดยใช้กล่องเครื่องมือวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า (PSAT) Hussain Haider และคณะ [3] ได้นำเสนอการรวมระบบส่งกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบยืดหยุ่น (FACTs) และ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก (DG) เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า Aparna Joshi และคณะ [4] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ UPFC เพื่อลดการแกว่งของระบบและปรับปรุงเสถียรภาพแบบพลวัต Peng Wu และคณะ [5] ได้นำเสนอการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) ในการติดตั้ง UPFC การจำลองในระบบ IEEE 9 บัส โดยใช้กล่องเครื่องมือวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า (PSAT) จากงานวิจัยที่ศึกษาไปนั้นยังขาดการวิจัยเกี่ยวกับการการยกระดับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการประยุกต์ใช้ UPFC และ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม

บทความนี้ผู้เขียนได้นำเสนอการยกระดับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสำหรับสถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้ UPFC โดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมวิธีหมาป่าสีเทา เพื่อกำหนดตำแหน่งและขนาดของ UPFC ร่วมกับ EVCS ที่เหมาะสมโดยมีเป้าหมายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลกำลังไฟฟ้า

การไหลกำลังไฟฟ้าในแบบจำลองนี้ใช้วิธีนิวตัน-ราฟสันโดยจะเกี่ยวข้องกับค่ากำลังไฟฟ้าจริงและ กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ [11] ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$P_i = \sum_{j=1}^{N} V_i V_j \left(G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij} \right) \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^{N} V_i V_j \left(G_{ij} \sin\theta_{ij} + B_{ij} \cos\theta_{ij}\right) \quad (2)$$

โดยที่ P_i คือกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส i Q_i คือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่บัส i V_i และ V_j คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และ j G_{ij} และ B_{ij} คือค่าริแอคแตนซ์ของสายส่งบัส i และ j θ_{ij} คือมุมต่างเฟสระหว่างบัส i และ j และ N คือจำนวนบัสทั้งหมด

2.2 ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าของโหลด (Load Voltage Deviation Index, LVDI)

ใช้พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเบี่ยงเบนที่บัสใด ๆ เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง ดังสมการที่ (3)

$$LVDI = \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{V_{ref} - V_i}{V_{ref}}\right)^2 \quad (3)$$

โดยที่ V_{ref} คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสอ้างอิง V_i คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และN_B คือจำนวนบัสทั้งหมด

2.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียรวมของระบบถูกพิจารณาจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง (i) และค่าความต้านทานของสายส่ง (i) ในการศึกษานี้พิจารณาเพียงกำลังไฟฟ้าจริงสูญเสีย ดังสมการที่ (4)

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{N_L} I_i^2 R_i \quad (4)$$

โดยที่ I_i คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งที่ i R_i คือค่าความต้านทานของสายส่งที่บัส i และ N_L คือจำนวนสายส่งทั้งหมด

2.4 สถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า

สถานีประจุยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Charging Station, EVCS) คือสถานีที่รองรับการชาร์จพลังงานไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้าโดยปกติจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ 1. การชาร์จแบบ AC Charging Station 2. AC-DC Fast Charging Station 3. Ultra-Fast Charging จากการศึกษานี้จะใช้การจำลองเป็นแบบสถาวะกำลังไฟฟ้าคงที่ ดังสมการที่ (5) และ (6)

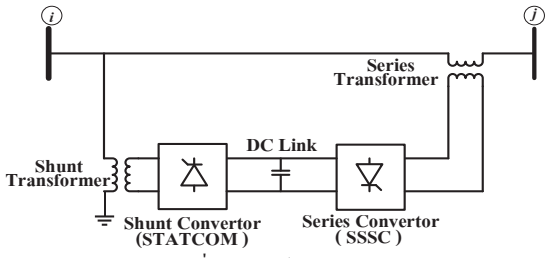
$$P_{L_i} = P_{L_{i0}} \left(\frac{V_i}{V_{i0}}\right)^{n_{pi}} \quad (5)$$

$$Q = P \times \tan(\cos^{-1} PF); \quad (6)$$

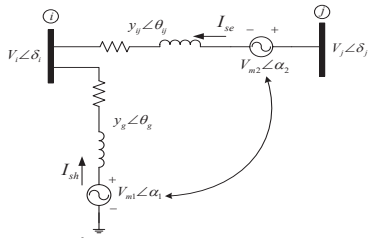
โดยที่ P_{L_i} คือกำลังไฟฟ้าที่จุดโหลด i ที่จุด V_i $P_{L_{i0}}$คือกำลังไฟฟ้าฐานที่จุดโหลด i ที่แรงดันฐาน V_{i0} n_{pi} คือค่าดัชนีพารามิเตอร์ของโหลด Q คือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ P คือกำลังไฟฟ้าจริง และ PF คือตัวประกอบกำลัง

2.5 อุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่น (FACTs) แบบ UPFC

UPFC เป็นอุปกรณ์ FACTs ที่สามารถควบคุมพารามิเตอร์ได้โดยการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ และควบคุมขนาดแรงดันที่บัส หรือควบคุมทั้งสามตัวแปรในเวลาเดียวกัน โดยมีโครงสร้างพื้นฐาน และ แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC ดังรูปที่ 1 และ รูปที่ 2



รูปที่ 1 โครงสร้างของ UPFC



รูปที่ 2 แบบจำลองของอุปกรณ์ UPFC

โดยมีสมการดังต่อไปนี้

1. กระแสในสายส่งของ UPFC

$$I_{se} = Y_m \times [V_i - V_j - V_{m2}] \quad (7)$$

$$I_{sh} = Y_{sh} \times V_i \quad (8)$$

โดยที่ คือกระแสที่ไหลผ่านตัวแปลงซีรีส์ของ UPFC I_{se} คือกระแสที่ STATCOM Y_m คือแอดมิตแตนซ์สายส่ง Y_{sh} คือแอดมิตแตนซ์ STATCOM และ V_{m2} คือแรงดันไฟฟ้าอนุกรมของ UPFC

2. แรงดันไฟฟ้าอนุกรมของ UPFC

$$V_s = V_s e^{j\theta_g} \quad (9)$$

$$V_j = V_i + V_S \quad (10)$$

โดยที่ V_s คือแรงดันไฟฟ้าอนุกรม $e^{j\theta_g}$ คือมุมต่างเฟสของแรงดันอนุกรม V_i และ V_j คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส i และj

3. กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของ UPFC

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin[\delta_i - \delta_j + \theta_s] \quad (11)$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i^2 - V_i V_j \cos[\delta_i - \delta_j + \theta_s]}{X_{ij}} \quad (12)$$

โดยที่ P_{ij} คือกำลังไฟฟ้าจริงจากบัส i ไปบัสj Q_{ij} คือกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟจากบัส i ไปบัสj X_{ij} คือรีแอคแตนซ์ของสายส่ง δ_iและ δ_j คือมุมต่างเฟสของแรงดันที่บัส i และj และθ_s คือมุมต่างเฟสแรงดันอนุกรม

2.6 การหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี (Gray Wolf Optimization, GWO)

GWO เป็นเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพเมตาฮิวริสติก ซึ่งอาศัยพฤติกรรม การจัดลำดับชั้นทางสังคม และวิธีการล่าเหยื่ออย่างชาญฉลาดของหมาป่าสีเทา มีกระบวนการที่สำคัญ 3 ประการ และมีขั้นตอนการดำเนินงานนำเสนอดังตารางที่ 1 ดังนี้ [10]

1. การล้อมเป้าหมาย (Encircling Prey): หมาป่าทุกตัวจะเคลื่อนที่เข้าหาหมาป่าที่มีตำแหน่งดีที่สุด 3 อันดับแรก

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (13)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (14)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a}\cdot\vec{r}_1 - \vec{a}\,, \quad \vec{C} = 2\cdot\vec{r}_2 \tag{15}$$

โดยที่ $\vec{X}_p$ คือเวกเตอร์พิกัดของเหยื่อ $\vec{X}$ คือเวกเตอร์พิกัดของหมาป่า สีเทา $\vec{r}_2$ คือเวกเตอร์การสุ่ม (0, 1) และ A, C คือตัวแปรช่วยกระจายการค้นหา

2. การล่าเหยื่อ (Hunting): ประกอบด้วยการล้อมรอบเหยื่อ โจมตีเหยื่อ และค้นหาเหยื่อ หมาป่าจะเคลื่อนที่โดยคำนวณค่าเฉลี่ยจาก (α), (β ; และ δ ; เพื่อลดการสำรวจแบบสุ่มอธิบายเพิ่มเติมใน [10]

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \tag{16}$$

3. การจู่โจมเหยื่อ (Attacking Prey): เมื่อค่าตัวแปร A ลดลงเรื่อย ๆ หมาป่าจะเข้าใกล้จุดที่ดีที่สุดมากขึ้นและลดการสำรวจแบบสุ่ม

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสมของ UPFC และ EVCS ด้วย GWO

ขั้นตอน 1: กำหนดพารามิเตอร์: จำนวนหมาป่าสีเทา : เมื่อ $i = 1...N$ (30)
จำนวนรอบการวนซ้ำ (*Iterations* = 100)
ตำแหน่งเริ่มต้นของประชากร (*Size & Sit.*)

ขั้นตอน 2: พิจารณาค่าเริ่มต้นของฟังก์ชันเป้าหมาย สมการที่ (17)

ขั้นตอน 3: ประเมินตำแหน่งของเหยื่อ (*Prey*)

ขั้นตอน 4: เลือกหมาป่าที่ดีที่สุดอันดับที่ 1, 2 และ 3 เป็น : E : และ :

ขั้นตอน 5: ปรับปรุง: ตำแหน่งที่ดีที่สุดด้วยสมการ (16)
พารามิเตอร์การสำรวจแบบสุ่ม (A)

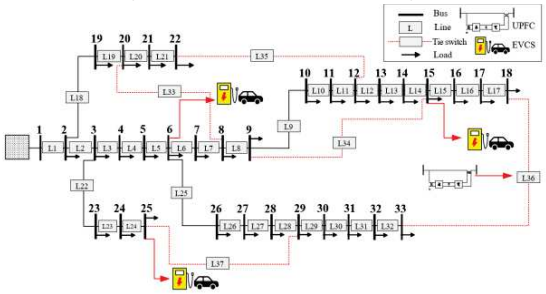
ขั้นตอน 6: พิจารณาฟังก์ชันเป้าหมาย สมการที่ (17)

ขั้นตอน 7: อัพเดต: : E : และ :

ขั้นตอน 8: พิจารณาเงื่อนไข: **ใช่** หยุดการทำงาน คำตอบที่ดีที่สุดคือ :
ไม่ กลับไปที่ **ขั้นตอน 3**

3. วิธีการดำเนินงาน

การทดสอบใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบปฐมภูมิ IEEE 33 บัส โดยพิจารณาเป็นแบบลูปด้วยสวิตช์เชื่อมโยง (Tie switch) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบปฐมภูมิ IEEE 33 บัส

3.1 ฟังก์ชันเป้าหมายและเงื่อนไขการวิเคราะห์

ในบทความนี้พิจารณาฟังก์ชันเป้าหมายแบบผสมผสาน (Hybrid Objective function) คือการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในสภาวะคงตัว โดยพิจารณาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย ดังสมการที่ (17)

$$\min f(x) = \omega_1.LVD + \omega_2.P_{loss} + V_{panalty} \tag{17}$$

โดยที่ ω_1 และ ω_2 คือค่าถ่วงน้ำหนัก $V_{panalty}$ คือฟังก์ชันปรับโทษ เงื่อนไข (Constrains) ประกอบด้วย ดังสมการดังนี้

1. ขนาดแรงดันในแต่ละบัส (i) ในขอบเขตระดับแรงดันอ้างอิง

$$V_{i\,\min} \le V_i \le V_{i\,\max} \tag{18}$$

2. ขนาดแรงดันอนุกรมและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟขนานของ UPFC

$$0.01 \le P_{Se,i} \le 0.05 \tag{19}$$

$$-0.2 \le Q_{Sh,i} \le 0.2 \tag{20}$$

ฟังก์ชันปรับโทษ (Penalty function) ถูกใช้นำมาควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังสมการที่ (21)

$$V_{penalty} = \sum_{i=1}^{N_B} \max(0, V_i - V_{\min}) + \max(0, V_i - V_{\max}) \times 1000 \tag{21}$$

โดยที่ V_i คือแรงดันไฟฟ้าที่บัส i $V_{\min}$ และ $V_{\max}$ คือขอบเขตล่างและบนของแรงดันไฟฟ้า และ N_B คือจำนวนบัสทั้งหมด

3.2 กรณีศึกษา

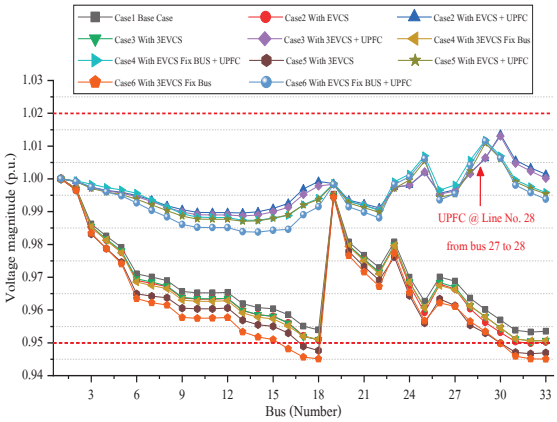
ในบทความนี้พิจารณาตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมของ UPFC ร่วมกับ EVCS ด้วยวิธี GWO ซึ่งสามารถแบ่งการจำลองเป็น 6 กรณีศึกษาที่แตกต่างกัน นำเสนอดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กรณีศึกษา

กรณีศึกษา	EVCS			UPFC	
	จำนวนสถานี (Num.)	ขนาด EVCS (MW)	ตำแหน่ง EVCS (Bus)	ขนาด UPFC (MW)	ตำแหน่ง UPFC (Line)
1	กรณีฐาน (Base Case)				
2	1	0.3	opt.	opt.	opt.
3	3	0.1	opt.	opt.	opt.
4	3	0.1	6, 15, 25(Fix)	opt.	opt.
5	3	0.3	opt.	opt.	opt.
6	3	0.3	6, 15, 25(Fix)	opt.	opt.

4. ผลการจำลอง

การเปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้ากรณีที่ 1 ถึง 6 การติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS แสดงให้เห็นความแตกต่างของขนาดแรงดันไฟฟ้าทั้ง 6 กรณี พบว่าเมื่อติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS ส่งผลให้ระบบมีแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กรณีศึกษาที่ 1 กรณีฐาน กรณีศึกษาที่ 2 เพิ่มขึ้น 96.35 % กรณีศึกษาที่ 3 เพิ่มขึ้น 95.79 % กรณีศึกษาที่ 4 เพิ่มขึ้น 95.21 % กรณีศึกษาที่ 5 เพิ่มขึ้น 95.60 % และกรณีศึกษาที่ 6 เพิ่มขึ้น 94.22 % นำเสนอดังรูปที่ 4

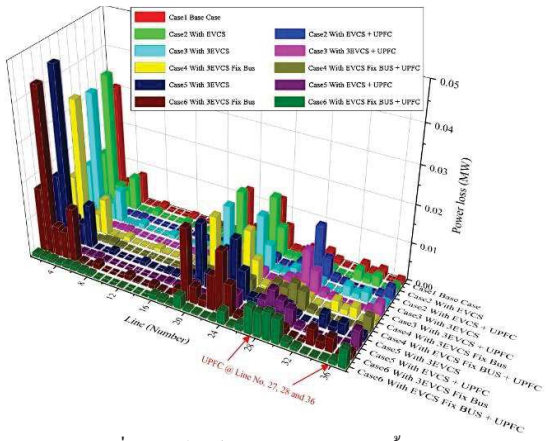


รูปที่ 4 เปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้าทั้ง 6 กรณีศึกษา

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนและหลังติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS บนระบบ IEEE 33 บัส

กรณีศึกษา	EVCS			Total Loss With EVCS	LVDI With EVCS	UPFC			Total Loss With EVCS + UPFC	LVDI With EVCS + UPFC	min *f(x)*	Loss Improvement	LVDI Improvement
	Position	Sizing	Station			Position	Sizing UPFC						
	(Bus.No)	(MW)	(Unit)	(MW)	(p.u.)	(Line.No)	(p.u.)	(Mvar)	(MW)	(p.u.)	(p.u.)	(%)	(%)
1	กรณีฐาน	-	-	0.1233	0.0363	-	-	-	-	-	-	-	-
2	28	0.3	1	0.1429	0.0390	28	0.0136	0.0394	0.0405	0.0014	0.0403	71.66	96.35
3	16,27,18	0.1	3	0.1324	0.0381	28	0.0131	0.1121	0.0408	0.0016	0.0404	69.18	95.79
4	6,15,25	0.1	3	0.1402	0.0390	36	0.0118	0.1781	0.0422	0.0019	0.0456	69.90	95.21
5	26,27,22	0.3	3	0.1711	0.0460	27	0.0109	-0.1984	0.0456	0.0020	0.0409	73.35	95.60
6	6,15,25	0.3	3	0.1796	0.0529	27	0.0115	-0.0703	0.0565	0.0031	0.0585	68.54	94.22
ค่าเฉลี่ย การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า												**70.53**	**95.43**

จากตารางที่ 3 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียก่อนและหลังติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS บนระบบ IEEE 33 บัส จากการวิเคราะห์กรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสียพบว่า กรณีศึกษาที่ 5 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบได้ดีที่สุดถึง 73.35 % ในขณะที่พิจารณาการปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าพบว่า กรณีศึกษาที่ 2 สามารถปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบได้ดีที่สุดถึง 96.35 % โดย UPFC จะติดตั้งบนสายส่งหมายเลข 27, 28 และ 36 ตามลำดับ



รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียในสายส่งทั้ง 6 กรณี

รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียระหว่างสายส่งก่อนและหลังการติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS กรณีศึกษา 1 ถึง 6 จากการจำลองพบว่าเมื่อติดตั้ง EVCS กำลังไฟฟ้าฟ้าจริงสูญเสียที่บัสต้นทางเพิ่มขึ้นทั้ง 6 กรณีศึกษา และเมื่อติดตั้ง UPFC จะส่งผลให้กำลังไฟฟ้าจริงสูญเสียระหว่างสายส่งที่บัสต้นทางลดลง

5. สรุป

บทความนี้ประสบผลสำเร็จในการนำเสนอ การยกระดับเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าสำหรับ EVCS ด้วยการประยุกต์ใช้ UPFC โดยใช้เทคนิค GWO เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า ผลการจำลองพบว่าเมื่อติดตั้ง UPFC ร่วมกับ EVCS ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้ถึง 70.53 % ในขณะเดียวกันสามารถปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้ถึง 95.43 % โดยคิดจากค่าเฉลี่ยทั้ง 6 กรณีศึกษา ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าการติดตั้ง UPFC สามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ อีกทั้งยังช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่บัสเชื่อมต่อ ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงและปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าได้เมื่อมีการติดตั้งรวมกับ EVCS ได้อย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

[1] Peng Wu et al, "Static Voltage Stability Analysis of Power Grid Including UPFC," 2023 3rd International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE).
[2] Abhay Raj et al, "Enhancement of Voltage Profile/Stability by Optimal Placement of UPFC," 2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology (I2CT).
[3] Hussain Haider et al, " Feasibility of incorporating FACTS devices and DG to optimize the performance of Pakistan's transmission network: A case study," 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE).
[4] Aparna Joshi et al, "An Overview of UPFC Applications in Stability Analysis of Power System," Proceedings of the Nineth International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES-2024).
[5] Peng Wu et al, "Reactive Power Optimization of UPFC System Based on Particle Swarm Optimization," 2023 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering (EPEE).
[6] Mohammad Zand et al, "Sensitivity analysis index to determine the optimal location of multi-objective UPFC for improvement of power quality parameters," Energy Reports 10 (2023) 431–438 journal homepage.
[7] Ihssan A. Amin et al, "Optimal Localization of UPFC For Transmission Line Losses Minimizing Using Particle Swarm Optimization," Engineering and Technology Journal 39 (10) (2021) 1463-1472 Journal homepage.
[8] N. Anil and G. Balaji, "Optimizing size and location of UPFC for enhanced system dynamic stability using hybrid approach," Computers and Electrical Engineering 120 (2024) 109777 journal homepage.
[9] Sudhir Sharma and B. Sabitha , "A hybrid swarm intelligence approach for resolving reactive power dispatch issues in power system: Optimal placement and sizing of UPFC, " Advances in Engineering Software 170 (2022) 103149 journal homepage.
[10] Seyedali Mirjalili et al, "Gray Wolf Optimization (GWO)," Advances in Engineering Software 69 (2014) 46-61 journal homepage.
[11] Noppanut Chitgreeyan et al, "Modified MATPOWER for Multi-Period Power Flow Analysis with PV Integration," GMSARN International Journal 19 (2025) 165-174.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การตรวจวัดการเกิดดิสชาร์จบางส่วนระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

Partial Discharge Detection of Power Distribution System within Songkhla Rajabhat University

สลักจิตร แบลนชาร์ด[1*] ไพศาล คงเรือง[2] อัชวา มามะ อัฟนันท์ กะลูแป และ ฮานาฟี ลือแบกาเส็ง
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
E-mail: salakjit.b@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษาในครั้งนี้ผู้ศึกษามุ่งเน้นที่จะศึกษาเรื่องการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้เลือกใช้การตรวจวัดแบบไม่ทำลาย (Non-destructive measurement) มาใช้ โดยใช้กล้องถ่ายภาพเสียง (Fluke ii910 Precision Acoustic Imager) ในการตรวจวัด PD พร้อมทั้งตรวจวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Fluke Ti480) ควบคู่กันไปด้วย โดยเลือกตรวจวัดเฉพาะหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาด 200 KVA ขึ้นไปเท่านั้นพร้อมอุปกรณ์ระบบส่งจ่ายข้างเคียงพบว่ามีจำนวน 22 ตัว จากผลการตรวจวัดไม่พบหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แต่พบว่ามี PD เกิดขึ้นบริเวณลูกถ้วยไฟฟ้าแรงสูงและฟิวส์แรงสูงจำนวน 5 แห่ง และพบว่ามีอุณหภูมิร้อนผิดปกติที่ฟิวส์แรงต่ำจำนวน 2 แห่ง จึงได้นำผลดังกล่าวส่งต่อให้กับผู้เกี่ยวข้องพิจารณาต่อไป

คำสำคัญ: การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน, ระบบจำหน่ายไฟฟ้า, การตรวจวัดแบบไม่ทำลาย

Abstract

This study focused on the study of partial discharge (PD) in the power distribution system at Songkhla Rajabhat University. The study used non-destructive measurement by using an acoustic camera (Fluke ii910 Precision Acoustic Imager) to measure PD and infrared temperature (Fluke Ti480) at the same time. Only transformers with a size of 200 KVA or more were measured, along with nearby power distribution equipment, totaling 22 units. The results of the measurement did not find any transformers with partial discharge, but PD was found at 5 high-voltage insulators and high-voltage fuses, and abnormally hot temperatures were found at 2 low-voltage fuses. The results were forwarded to relevant parties for further consideration.

Keywords: Partial discharge measurement, power distribution system, non-destructive measurement

1. บทนำ

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นมีการติดตั้งอุปกรณ์มากมาย ซึ่งเมื่อถึงช่วงระยะเวลาหนึ่งจำเป็นต้องมีการตรวจวัดและบำรุงรักษาเพื่อให้อุปกรณ์ที่ติดตั้งมีความปลอดภัยเนื่องจากอันตรายจากไฟฟ้าไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การตรวจวัดและบำรุงรักษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องอาศัยบุคลากรที่มีทักษะความชำนาญ รวมไปถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการตรวจวัด [1] จึงอาจทำให้ไม่สามารถบำรุงรักษาได้อย่างทั่วถึงและส่งผลให้เกิดเหตุการณ์สายระบบจำหน่ายแรงสูงขาด เกิดผลกระทบทั้งในด้านความปลอดภัยกับประชาชนที่สัญจรอยู่ในบริเวณที่มีสายไฟฟ้าติดตั้งอยู่ ดังนั้นการตรวจวัดระบบจำหน่ายแรงสูงจึงมีความสำคัญเพื่อป้องกันความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นจากสายไฟฟ้า และลดการเกิดปัญหาไฟฟ้าดับหรือสายไฟฟ้าชำรุด

คณะผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญที่จะตรวจวัดระบบจำหน่ายไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเพื่อลดการเกิดปัญหาไฟฟ้าให้น้อยที่สุดและลดความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุต่าง ๆ ที่อาจเกิดอุปกรณ์ชำรุด ผู้วิจัยจึงได้จัดทำการตรวจวัด PD และอุณหภูมิของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงสูงภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

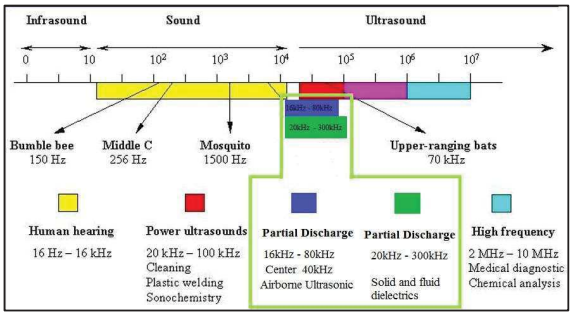
2. ทฤษฎี

ความต้องการรพลังงานไฟฟ้ามีการขยายตัวมากยิ่งขึ้น ถ้าหากเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่ายขึ้นย่อมส่งผลเสียต่อระบบการผลิตอุตสาหกรรมและอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ ดังนั้นเพื่อที่จะป้องกันระบบจำหน่ายให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ลดความเสียหาย การตรวจสอบบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance, PM) อยู่สม่ำเสมอจะช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุและปัญหาต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ซึ่งวิธีการ

ตรวจสอบมีด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมวิธีหนึ่งคือการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Test)

2.1 การตรวจสอบด้วยการปล่อยคลื่นเสียง (Acoustic Emission Technique)

การตรวจสอบด้วยการปล่อยคลื่นเสียง เป็นวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) ที่ใช้การสร้างคลื่นที่เกิดจากการกระจายแรงเครียดในวัสดุอย่างกะทันหัน เมื่ออุปกรณ์ชิ้นหนึ่งได้รับแรงกระตุ้นจากแรงกระตุ้นดังกล่าวจะกระตุ้นให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นความเค้น ซึ่งจะแพร่กระจายไปยังพื้นผิวและจะถูกบันทึกโดยเซ็นเซอร์ ซึ่งการตรวจวัด PD จากสัญญาณ Acoustic ด้วยกล้องถ่ายภาพเสียง (Fluke ii910 Precision Acoustic Imager) เป็นวิธีการที่ใช้ในการระบุหาตำแหน่งของแหล่งสัญญาณ PD ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย [2] อุปกรณ์ AET ส่วนใหญ่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวในช่วง 30 kHz ถึง 1 MHz [3] สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 1



รูปที่ 1 การจำแนกประเภทของคลื่นการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

(ที่มา : Fluke Corporation, 2564)

2.2 การตรวจวัด Partial discharge

การตรวจวัด Partial discharge สามารถทำได้หลายวิธีซึ่งการตรวจวัด PD ก็คือการตรวจจับปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1.ประจุไฟฟ้า (Q) ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าที่มาจากการ Discharge สามารถใช้ sensor ประเภท Capacitor sensor หรือ HFCT sensor

2.เสียง จะอยู่ในย่านความถี่ประมาณ 40kHz ซึ่งเป็นย่าน Ultrasonic sensor สำหรับการตรวจจับจะมี 2 แบบคือ AE (Acoustic Emission) และ AA (Airborne Acoustic)

3.แสง ถ้าอยู่ในบริเวณที่มิดสนิทอาจจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตา หรืออาจจะใช้กล้อง UV สำหรับการตรวจเวลากลางวันก็ได้

4.คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อเกิด PD จะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกมาเราสามารถตรวจจับคลื่นนั้นได้

5.การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัสดุฉนวน เช่น แก๊สที่เกิดจาก PD ในน้ำมันฉนวน สามารถตรวจวัดด้วยการวิเคราะห์ค่าแก๊สหรือ DGA หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพฉนวนเช่นพวกรอยการเสียหายของฉนวนการเกิด PD เป็นต้น

2.3 สเปกตรัมเฟส

สเปกตรัมแอมพลิจูดหมายถึงขนาดของค่าสัมประสิทธิ์การแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง (DFT) ของสัญญาณดิจิทัลในโดเมนความถี่ เริ่มต้นด้วยการแบ่งข้อมูลออกเป็น $1/f_v$ โดยที่ f_v คือความถี่แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย (50 Hz) จากนั้นค่าแอมพลิจูดของแต่ละส่วนจะถูกแสดงเป็นฟังก์ชันขององศาเฟสของความถี่แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย องศาเฟสจะคำนวณโดยใช้

$$360 / \frac{t_i}{T} \qquad (1)$$

โดยที่ t_i คือข้อมูลเวลาของพัลส์ PD และ T คือระยะเวลาของรอบหนึ่งของความถี่แรงดันไฟฟ้าที่จ่าย [3]

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้อาศัยการสำรวจบริเวณตำแหน่งที่ตั้งของหม้อแปลงไฟฟ้าภายในองค์กรเพื่อทำแผนที่ตำแหน่งทั้งหมด หลังจากนั้นกำหนดแผนในการตรวจวัดแล้วลงพื้นที่เก็บข้อมูล ข้อมูลจะมีการจัดเก็บ 3 ส่วนคือ ข้อมูลพื้นฐานของตำแหน่งและพิกัดหม้อแปลง ข้อมูลอุณหภูมิ และข้อมูลภาพและสัญญาณความถี่เสียง เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงของหม้อแปลงและอุปกรณ์ในระบบจำหน่าย โดยจากการลงพื้นที่ทั้งหมดจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในเขตของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาโดยรอบมีทั้งหมด 22 ลูก

4. ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ผล

ผู้วิจัยได้เลือกนำเสนอเฉพาะอุปกรณ์บนเสาส่งที่มีความเสี่ยงจะก่อให้เกิดอันตรายและเสียหายได้เท่านั้น เนื่องจากข้อมูลมีปริมาณเยอะ โดยแบ่งการแสดงผลออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

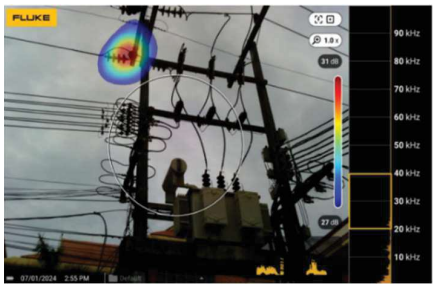
4.1 ผลการตรวจวัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีปัญหาด้วยกล้องถ่ายภาพเสียง

หม้อแปลงและอุปกรณ์บนเสาไฟฟ้าที่มีดิสชาร์จบางส่วนเกินกว่า 80% เท่านั้นที่ได้เลือกมานำเสนอ ซึ่งมีทั้งหมด 5 แห่งด้วยกัน คือ

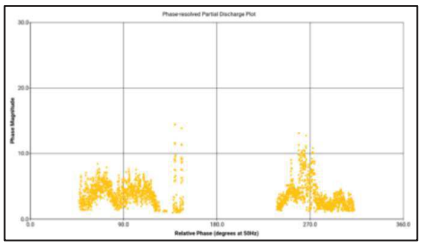
1. บริเวณข้างหน้าตึกคณะศิลปกรรมศาสตร์
2. บริเวณหลังตึกคณะศิลปกรรมศาสตร์(บนพื้น)
3. บริเวณหลังตึกคณะครุศาสตร์
4. บริเวณข้างตึกคณะวิทยาการจัดการ
5. บริเวณหลังห้องสมุด

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีบริเวณที่เกิด External PD ที่ลูกถ้วยก้านตรงบนเสาไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 93% และเป็น internal PD 7% เมื่อ External PD ที่เครื่องวัด Fluke ii910 ครอบคลุมหมายถึง อาร์คไฟฟ้าและโคโรน่าดิสชาร์จ และ Internal PD หมายถึง PD ที่เกิดภายในเนื้อวัตถุ โดย

เครื่องเก็บสัญญาณพัลส์พล็อตลงใน PRPD pattern ระหว่างค่า Phase magnitude (X) และค่า Relative Phase (Y) แล้วจึงคำนวณเปอร์เซ็นต์ออกมาได้

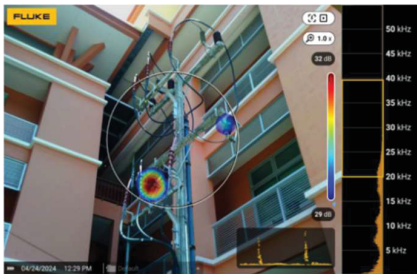


(ก)

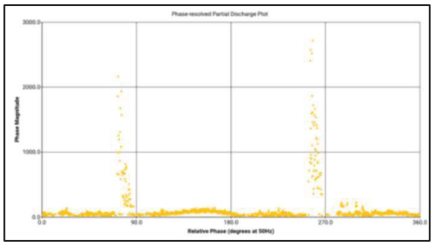


(ข)

รูปที่ 3 การตรวจวัดบริเวณหน้าตึกคณะศิลปกรรมศาสตร์ (ก) ภาพถ่ายหน้าจอเครื่อง Fluke ii910 (ข) กราฟสัญญาณ PRPD



(ก)



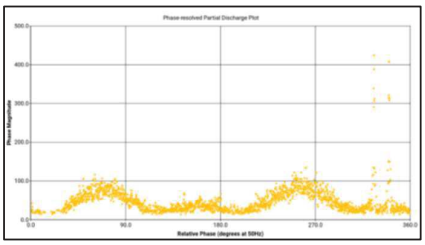
(ข)

รูปที่ 4 การตรวจวัดบริเวณบริเวณหลังตึกคณะศิลปกรรมศาสตร์ (ก) ภาพถ่ายหน้าจอเครื่อง Fluke ii910 (ข) กราฟสัญญาณ PRPD

จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า มีบริเวณที่เกิด External PD อยู่ที่บริเวณ Dropout Fuse มีค่าเท่ากับ 93% และเป็น internal PD 7%



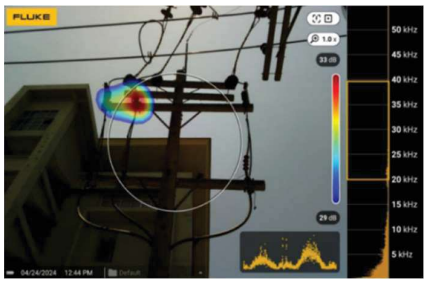
(ก)



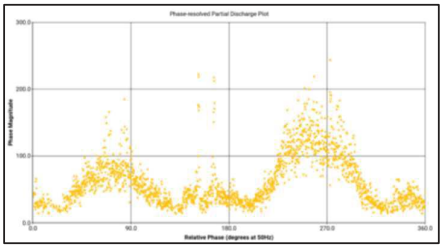
(ข)

รูปที่ 5 การตรวจวัดบริเวณหลังตึกคณะครุศาสตร์ (ก) ภาพถ่ายหน้าจอเครื่อง Fluke ii910 (ข) กราฟสัญญาณ PRPD

จากรูปที่ 5 มี External PD เกิดที่ลูกถ้วยก้านตรงบนเสาไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 87% ไม่มี internal PD จากรูปที่ 6 มี External PD อยู่ที่บริเวณ Dropout Fuse มีค่าเท่ากับ 80% และเป็น internal PD 7% และที่เสาส่งหลังห้องสมุดในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ามี External PD อยู่ที่ Dropout Fuse มีค่า External PD เท่ากับ 80% และ internal PD เท่ากับ 13%

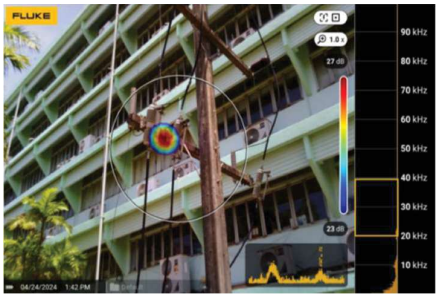


(ก)

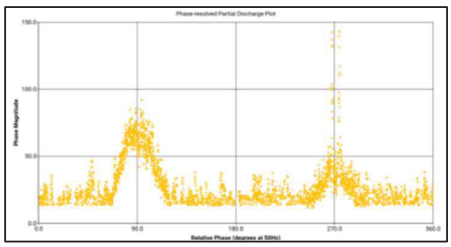


(ข)

รูปที่ 6 การตรวจวัดบริเวณข้างตึกคณะวิทยาการจัดการ (ก) ภาพถ่ายหน้าจอเครื่อง Fluke ii910 (ข) กราฟสัญญาณ PRPD



(ก)

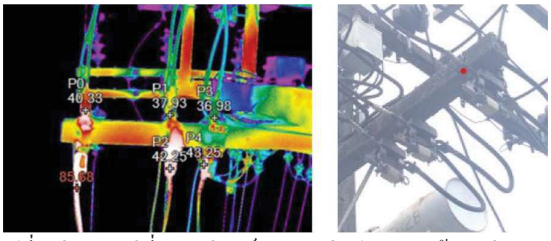


(ข)

รูปที่ 7 การตรวจวัดบริเวณหลังห้องสมุด (ก) ภาพถ่ายหน้าจอเครื่อง Fluke ii910 (ข) กราฟสัญญาณ PRPD

4.2 ผลการตรวจสอบอุณหภูมิบริเวณหม้อแปลงไฟฟ้า

อุปกรณ์บนเสาส่งแรงต่ำที่อุณหภูมิร้อนผิดปกติมีอยู่ด้วยกัน 2 ตำแหน่งคือ 1. เสาส่งบริเวณ 4 แยกประตู 2 และ2. เสาส่งบริเวณหน้าตึกคณะเทคโนโลยีการเกษตร



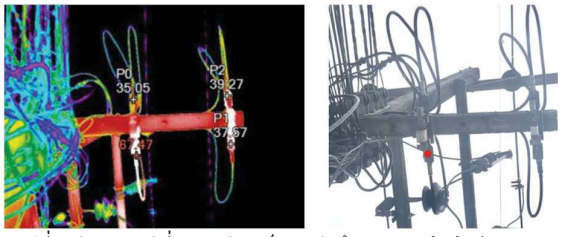
รูปที่ 8 ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งมาร์กบนเสาส่ง ประตูทางเข้ามหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 ค่าอุณหภูมิที่ฟิวส์แรงต่ำของเสาส่งบริเวณ 4 แยกประตู 2

Marker name	Hot	P0	P1	P2	P3	P4
°C	85.7	40.3	37.9	42.3	37.0	43.3

ตารางที่ 2 ค่าอุณหภูมิที่ฟิวส์แรงต่ำเสาส่งบริเวณหน้าตึกคณะเทคโนโลยีการเกษตร

Marker name	Hot	P0	P1	P2
°C	67.5	35.1	37.6	39.3



รูปที่ 9 ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งมาร์กเสาส่งตึกคณะเทคโนโลยีการเกษตร

จากรูปที่ 8 และตารางที่ 1 พบว่าบริเวณข้อต่อของฟิวส์แรงต่ำเฟส A มีอุณหภูมิสูงผิดปกติ โดยที่ด้านขาเข้าและขาออกเฟส A ต่างกันมากถึง 45°C สำหรับเฟส B และ C มีค่าอุณหภูมิแตกต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่ออ้างอิงตามเกณฑ์ ANS/NETA MTS-2021 [4] ได้กำหนดไว้ว่า ถ้าค่าอุณหภูมิแตกต่าง (ΔT) ของอุปกรณ์ที่ผิดปกติกับอุณหภูมิรอบข้าง >40 °C คือเกิดข้อบกพร่องอย่างมากและแนะนำให้ซ่อมแซมโดยด่วน ส่วนตารางที่ 2 มีความผิดปกติที่ข้อต่อของฟิวส์แรงต่ำเช่นกัน โดยอุณหภูมิของเฟส A ทั้งสองด้านต่างกันถึง 32 องศาเซลเซียส ตามเกณฑ์มาตรฐานคือต้องตรวจสอบติดตามอย่างต่อเนื่อง จากการสำรวจการติดตั้งหม้อแปลงและระบบไฟฟ้าแรงต่ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาจะเห็นได้ว่าสามารถตรวจวัดและดำเนินการรายงานถึงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าได้ล่วงหน้า ซึ่งผลที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนในด้านการตรวจ PD และอุณหภูมิบนเสา ทั้งนี้ผลของการตรวจวัดอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างสำหรับการตรวจวัด PD เนื่องจากเป็นการวัดจากระยะไกลอาจทำให้ระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ แต่สำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิจะมีค่าผิดพลาดเล็กน้อยประมาณ $\leq$ 0.05 °C ที่ 30 °C จากค่าอุณหภูมิเป้าหมาย [5] ผลที่ได้ดังกล่าวได้ถูกส่งต่อให้กับผู้เกี่ยวข้องพิจารณาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] ชัชชล สารพพัฒน์, ณัฐกานต์ สีชล, ธนาวีร์ วงศ์สิงห์งาม. (2558). สำรวจและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าแรงสูงภายในมหาวิทยาลัยบูรพา. ปริญญานิพนธ์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] J. Butdee, W. Kongprawechnon, H. Nakahara, N. Chayopitak, C. Kingkan, and R. Pupadubsin, “Pattern Recognition of Partial Discharge Faults Using Convolutional Neural Network (CNN),” in 8th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Niigata, Japan: IEEE, Apr. 2023, pp. 61–66.

[3] Toros Senan, and Sorama B.V., “Partial discharge”, White paper, Fluke Corporation, 2021.

[4] N. Mts, “AMERICAN NATIONAL STANDARD”. 2021.

[5] Fluke Corporation, “TECHNICAL DATA Ti480, Ti450, Ti400 and Ti300 Infrared Cameras.” Fluke Corporation, 2016.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพของการต่อลงดินจากประเภทและการจัดเรียงของแท่งต่อลงดินที่แตกต่างกัน

Experimental Study on the Grounding Efficacy Based on Different Grounding Rod Types and Arrangements

อัมพร บุญราม[1] สลักจิตร แบลนชาร์ด[1*] และ ไพศาล คงเรือง[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2]หลักสูตรเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
E-mail: salakjit.b@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

การต่อลงดินเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยและความมั่นคงของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำและแรงสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของประเภทและรูปแบบการจัดเรียงของแท่งต่อลงดินที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพในการลดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ โดยมีการตอกหลักดินในรูปแบบต่างๆจำนวน 16 หลัก และใช้เครื่องมือวัดมิเตอร์รุ่น Fluke 1664 FC เพื่อวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดินต่างๆ โดยได้เปรียบเทียบการจัดเรียงในลักษณะเดี่ยว แบบขนาน และแบบตาราง นอกจากนี้ความลึกของแท่งหลักดินก็มีการนำมาวิเคราะห์เช่นกัน ผลการทดลองพบว่า ประเภทของวัสดุและระยะห่างในการจัดเรียงแท่งหลักดินมีผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานดินและเป็นไปตามทฤษฎี [1]

คำสำคัญ: การต่อลงดิน, มิเตอร์ Fluke 1664 FC, การจัดเรียงแท่งหลักดิน

Abstract

Grounding is a very important element for the safety and stability of the electrical system, especially in low-voltage and high-voltage power distribution systems. Therefore, this research aims to study the effect of different types and arrangements of grounding rods on the efficiency of reducing the resistance of the grounding system. Sixteen grounding rods were driven in various forms, and Fluke 1664 FC meter was used to measure the resistance of various grounding rods. The arrangements were compared in single, parallel, and grid forms. In addition, the depth of the grounding rods was also analyzed. The experimental results showed that the type of material and the distance between the grounding rods have a direct effect on the ground resistance and are in accordance with the theory.

Keywords: Grounding, Fluke 1664 FC Meter, Grounding Rod arrangement

1. บทนำ

หลักดินเป็นตัวนำที่เชื่อมระบบไฟฟ้าเข้ากับดินเพื่อป้องกันแรงดันเกินจากฟ้าผ่าหรือไฟฟ้าลัดวงจร ลดความเสี่ยงไฟฟ้าช็อตหรืออุปกรณ์เสียหาย โดยกระแสรั่วจะไหลลงดินแทนการผ่านร่างกายคน ซึ่งหลักดินทำจากวัสดุทนสนิม เช่น ทองแดงหรือเหล็กหุ้มทองแดง โดยต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร (5/8 นิ้ว) และยาวไม่น้อยกว่า 2.40 เมตร ถ้าเป็นเหล็กหุ้มด้วยทองแดงต้องมีความหนาของทองแดงไม่ต่ำกว่า 0.25 มิลลิเมตรหลักดินที่ดีควรผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน UL-467 และมีความต้านทานไม่เกิน 5 โอห์ม การเชื่อมต่อสายดินต้องใช้วัสดุเดียวกันเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ปัจจุบันการทดลองต้องติดตั้งและรื้อถอนบ่อยครั้งไม่สะดวกต่อการเรียนการสอน จึงเป็นที่มาของการจัดทำโครงงานนี้

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความต้านทานการต่อลงดิน

โดยทั่วไปแล้วการต่อลงดินมีวัตถุประสงค์เพื่อการต่อลงดินของระบบและเพื่อการต่อลงดินของอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะต้องประกอบด้วย หลักดิน สายต่อหลักดิน สายที่มีการต่อหลักดิน สายต่อฝากหลัก และสายดินของบริภัณฑ์ไฟฟ้า โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยของ ว.ส.ท. [2] ได้กำหนดค่าความต้านทานของหลักดินต้องไม่เกิน 5 Ω โดยพิจารณาจาก

- ความต้านทานของตัวนำที่ต่อลงดินและความต้านทานของสายตัวนำ
- ความต้านทานสัมผัสระหว่างตัวนำและดิน
- ความต้านทานของดินรอบๆ ตัวนำ

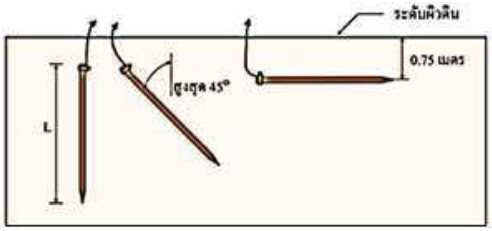
2.2 ประเภทของหลักดิน

หากเป็นหลักดินที่สร้างขึ้นโดยตรง มักมีรูปร่างดังนี้

- แท่งหรือสายเคเบิลที่ฝังดิน (Buried strip or cable) ตามข้อกำหนดของ NEC กำหนดให้ตอกลงไปตรงๆ ในแนวดิ่ง ลงไปในดิน

อย่างน้อย 8 ฟุต (2.4 เมตร) แต่ถ้าไม่สามารถตอกหลักดินลงไปตรงๆ ได้ กรณีนี้มาตรฐานได้อนุโลมตอกเอียงได้ไม่เกิน 45 องศา หรืออาจใช้วิธีการขุดดินแล้วฝังแท่งหลักดินลงไปในแนวราบที่ความลึกไม่น้อยกว่า 0.75 เมตร

- แผ่นฝัง (Buried Plate) หลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นจะถูกนำมาใช้เมื่อไม่ต้องการขุด ดินลงไปลึกๆ การฝังแผ่น จะทำในแนวดิ่งหรือแนวนอนก็ได้ ขนาดของแผ่นโลหะที่ใช้ต้องมีพื้นที่ผิวสัมผัส ไม่น้อยกว่า 0.18 ตารางเมตร (หรือ 0.30 x 0.30 เมตร) และในกรณีที่เป็นเหล็กอาบโลหะชนิดกันการผุกร่อน ต้องมีความหนาไม่ น้อยกว่า 1.5 มม. โดยต้องฝังแผ่นโลหะลึกจากผิวดิน ไม่น้อยกว่า 1.6 เมตร



รูปที่ 1 การติดตั้งแท่งหลักดิน [3]

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทาน

ค่าความต้านทานของดินเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของระบบต่อลงดิน เพราะเป็นตัวต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแท่งกราวด์เข้าสู่มวลดิน หากค่าความต้านทานดินสูง จะทำให้ระบบระบายกระแสไฟฟ้าทำงานได้ไม่ดี ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบและผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานดินดังนี้:

- ชนิดของดิน (Soil Type) ดินแต่ละชนิดมีความสามารถในการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน
- ความชื้นในดิน ความชื้นในดินเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล
- อุณหภูมิ โดยทั่วไปค่าความต้านทานของดินจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.5% ต่อการลดอุณหภูมิ 1°C เมื่อต่ำกว่า 20°C
- ความลึกของแท่งกราวด์ ชั้นดินลึกมักจะมีความชื้นคงที่ตลอดปี จึงให้ค่าความต้านทานต่ำกว่าชั้นผิวดินที่แห้งและแปรผันตามฤดูกาล
- ระยะห่างระหว่างแท่งกราวด์ การใช้แท่งกราวด์หลายแท่งช่วยลดค่าความต้านทานโดยรวมของระบบแต่ควรวางห่างกันในระยะที่เหมาะสม
- ขนาดพื้นที่หน้าตัดแท่งหลักดิน สามารถช่วยลดความต้านทานลงได้บ้าง

ซึ่งสอดคล้องกับสมการค่าความต้านทานของแท่งหลักดินเดี่ยว (Single Rod):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} ln\left(\frac{2L}{d}\right). \quad (1)$$

เมื่อ L คือความยาวหลักดิน R คือความต้านทานของแท่งหลักดิน (Ω) ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω-m) และ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (m)

3. ขั้นตอนการตรวจวัด

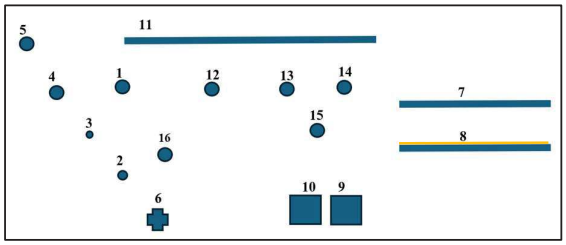
3.1 การออกแบบการจัดวางแท่งหลักดิน

การตรวจวัดหลักดินมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อค่าความต้านทานหลักดิน ดังนั้นสมมติฐานตั้งต้นคือการจัดวางแท่งหลักดินแบบต่างๆ ขนาด และจำนวนของหลัก เพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัด ดังนี้

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ของหลักดิน

สัญลักษณ์ของหลัก	ชื่อของแท่งหลักดิน
	เหล็กหุ้มทองแดง (1-5) (12-16)
	เหล็กแบบแฉก (6)
	แผ่นเพลท (9, 10)
	สายไฟขนาด 35mm² (11)
	เหล็กหุ้มทองแดง (เอียง) (7)
	เหล็กหุ้มทองแดง (ลึก)(8)

จากตารางที่ 1 แท่งกราวด์แบบต่างๆ ได้ถูกเลือกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษา โดยเลือกตอกหลักดินในบริเวณใกล้กันสำหรับการวัดหลักแบบขนานและแบบที่มีการต่อแบบเพิ่มหลัก

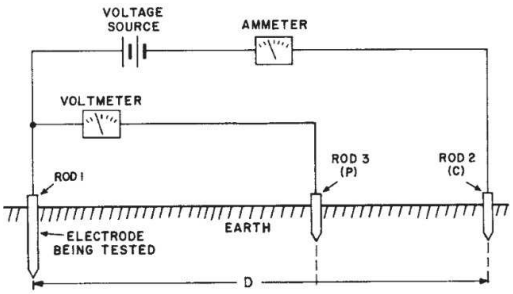


รูปที่ 2 การจัดเรียงแท่งหลักดินแบบต่าง ๆ

3.2 วิธีการวัดค่าความต้านทานแท่งหลักดินแบบ 3 จุด

วิธี 3 จุดนี้คือการตอกหลักที่เป็นแท่งโลหะขนานไปที่แท่งกราวด์ไฟฟ้าเพื่อให้เกิดลูปของไฟฟ้า เครื่องทดสอบความต้านทานดินจะ

ปล่อยแรงดันและกระแสคงที่มาค่าหนึ่งไปที่ลูปไฟฟ้านั้นแล้วคำนวณกลับออกมาเป็นค่าความต้านทาน การวัดแบบนี้ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุด โดยต้องคำนึงถึงระยะห่างของแท่งหลักดินที่เรียกว่า “62% method” การวัดจะอาศัยมิเตอร์ Fluke รุ่น 1664 FC เป็นเครื่องมือวัดหลัก [5]



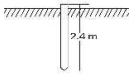
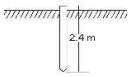
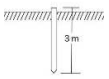
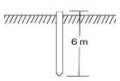
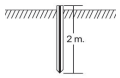
รูปที่ 3 การวัดความต้านทานแท่งหลักดินแบบ 3-จุด [4]

4. ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ผล

การตรวจวัดค่าความต้านทานหลักดินโดยมีเงื่อนไขของประเภทแท่งหลักดินและการวางแบบต่างๆ การตรวจวัดแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

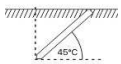
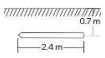
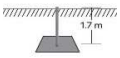
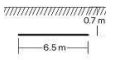
4.1 การตรวจวัดแบบหลักเดี่ยว โดยเปรียบเทียบเฉพาะเหล็กหุ้มทองแดงที่ความลึกต่างๆ และเหล็กแฉก ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความต้านทานหลักดินแบบหลักเดี่ยว

หมายเลขของหลัก (No.)	ขนาด (นิ้ว)/ความยาว (เมตร)	รูปแบบ	ค่าความต้านทาน Ω
1	5/8 in x 2.4 m.		13.3
2	5/8 in x 2 m.		14
3	4/8 in x 2.4 m.		14.8
4	5/8 in x 3 m.		9
5	5/8 in x 6 m.		1.8
6	2 ½ x 2 m.		12

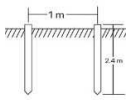
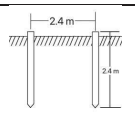
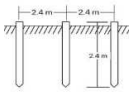
4.2 การตรวจวัดแบบหลักเดี่ยวฝังในแนวเอียงและแนวนอน โดยเปรียบเทียบเฉพาะเหล็กหุ้มทองแดงและเหล็กแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 3

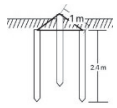
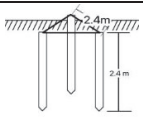
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าความต้านทานหลักดินแบบหลักเดี่ยวฝังในแนวเอียงและแนวนอน

หมายเลขของหลัก (No.)	ขนาด (นิ้ว)/ความยาว (เมตร)	รูปแบบ	ค่าความต้านทาน Ω
7	5/8 in x 2.4 m.		13.7
8	5/8 in x 2.4 m. ลึก 0.7m		13.9
9	40x50 cm² X 1 m. ลึก 1.0m		12.6
10	40x50cm²X 1.7 m. ลึก 1.7m		9.6
11	1x35mm² x 6.5 m. ลึก 0.7 m		16.8

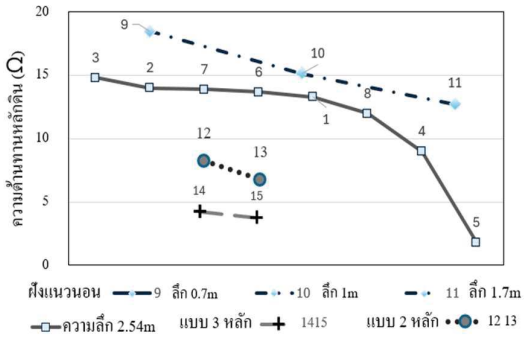
4.3 การตรวจวัดแบบ 2 และ 3 หลักที่ระยะห่างต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบเฉพาะเหล็กหุ้มทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าความต้านทานหลักดินแบบ 2 และ 3 หลัก

หมายเลขของหลัก (No.)	ขนาด (นิ้ว)/ความยาว (เมตร)	รูปแบบ	ค่าความต้านทาน Ω
13-14	5/8 in x 2.4 m. ห่าง 1.0m		7.6
12-13	5/8 in x 2.4 m. ห่าง2.4m		6.9
1-12-14	5/8 in x 2.4 m ห่าง 2.4m		4.8

13-14-15	5/8 in x 1 m. ห่าง 1.0m		5.5
1-12-16	5/8 in x 1 m. ห่าง 2.4m		4.3

จากผลการตรวจวัดเปรียบเทียบหลักดินหลายๆ แบบและการจัดวางแบบต่างๆ ทั้งแบบหลักเดี่ยว แบบ 2 และแบบ 3 หลักถูกนำมาพล็อตกราฟนำเสนอไว้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการวัดค่าความต้านทานหลักดินแบบต่างๆ

จากตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความต้านทานหลักดินแบบหลักเดี่ยวสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานของหลักดินเพิ่มขึ้นหรือน้อยลงขึ้นอยู่กับขนาดของหลัก ความยาวของหลัก รูปร่างและความลึก จะเห็นได้ว่าหลักที่ 5 มีความลึกที่สุด 6 เมตร ค่าที่วัดได้ก็ต่ำกว่าค่าความต้านทานมาตรฐานถึงแม้ว่าจะฝังแค่หลักเดียวก็ตาม

ตารางที่ 3 สรุปได้ว่าหลักดินแบบแผ่นเพลตที่ความลึก 1.7 m ให้ค่าความต้านทานหลักดินต่ำที่สุด และเป็นที่น่าสังเกตว่าการฝังแบบเอียงและการฝังแนวนอนให้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4 สรุปได้ว่าการเชื่อมต่อหลายหลักทำให้เกิดเส้นทางหลายเส้นทางสำหรับการระบายไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดค่าความต้านทานดินโดยรวม ยิ่งหลักมีความห่างเท่าตัวของหลัก ค่าความต้านทานก็จะยิ่งลดมากขึ้น

5. สรุป

วิธีการที่ได้นำเสนอนี้เป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ในการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาเครื่องมือวัดในงานไฟฟ้าและการออกแบบระบบไฟฟ้าได้ เพื่อให้เห็นถึงความถูกต้องในการตอกหลักดินและกระบวนการตรวจวัด รวมไปถึงมาตรฐานที่ใช้ในการพิจารณาค่าที่อยู่ในระดับปลอดภัยต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบได้

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Std. 81-2012, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System* (Revision of IEEE Std. 81-1983).

[2] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า สำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2545 มาตรฐาน ว.ส.ท. 2001-45. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2545.

[3] ลือชัย ทองนิล. การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าเสริม. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพมหานคร : สมาคม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), ทีแอร์บีโปรดักส์, 2550.

[4] Megger, “A practical guide to earth resistance testing.” Megger, 2010.

[5] นพดล ดาวแสงสว่าง, ธนาภรณ์ สุวรรณพงศ์, วิมลวรรณ พรรณเชษฐ์, ชำนาญ ห่อเกียรติ. การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไว., วิศวกรรมสาร มก., เมษายน-กรกฎาคม, เล่มที่ 26, 2539.

การศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสุ่มโดยใช้จุดเชื่อมต่อทั่วไปด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

Study of Randomly Assigning Capacitor Bank Size Using Point of Common Coupling (PCC) Based on Voltage Control in Microgrid Systems

นิวัทธ์ วรรณวงศ์[1] สิษฐ รัตนคำ[1] สมชาติ โสนะแสง[2] ประกาศิต ปราบพาล[3*]
[1]ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2, สกลนคร
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม, นครพนม
[3]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1,อุดรธานี
E-mail : niwat@techsakon.ac.th and prakasit@techsakon.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการติดตั้งตัวเก็บประจุที่มีขนาดสุ่มโดยอ้างอิงจุดเชื่อมต่อทั่วไป ด้วยการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด โดยแบ่งการศึกษาเป็นสองกรณีหลัก กรณีพื้นฐาน ในกรณีที่ไม่มีการใช้งานตัวเก็บประจุแบบคงที่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อร่วม และการติดตั้งในระบบไมโครกริด มาตรฐาน IEEE 13 บัส ในบัส 3 เฟส ผลการจำลองระบุว่าตัวเก็บประจุแบบคงที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ในสภาพแวดล้อมที่เสถียร ก่อให้เกิดปัญหาและต้องแก้ไขอย่างมีนัยสำคัญ การกำหนดขนาดแบงก์ตัวเก็บประจุแบบสุ่มให้ข้อมูลเชิงลึกเชิงปฏิบัติเกี่ยวกับการจัดการแรงดันไฟฟ้า โดยแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีประสิทธิภาพในภาพรวม แต่บางสถานการณ์จำเป็นต้องมีแนวทางที่ยืดหยุ่นมากขึ้นเพื่อรักษาการควบคุมแรงดันไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ งานวิจัยต่อไปจะเน้นการปรับแต่งขนาดแบงก์ตัวเก็บประจุให้เหมาะสมและการศึกษาการควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

คำสำคัญ : ตัวเก็บประจุ, PCC, การควบคุมแรงดันไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the installation of randomly sized capacitors at common connection points, focusing on voltage control in microgrid systems. The study is divided into two main cases: the basic case, where the use of fixed capacitors can maintain voltage levels at the common connection point, and the installation in IEEE 13 bus a three-phase bus microgrid system. Simulation results indicate that fixed capacitors are effective in voltage control in stable environments, but significant issues arise that need to be addressed. The determination of randomly sized capacitor banks provides practical insights into voltage management, showing that while they are generally effective, some situations require a more flexible approach to maintain consistent voltage control. Future research will focus on optimizing the sizes of capacitor banks and studying complex control methods to improve voltage stability in microgrid systems.

Keywords: capacitor bank, PCC, voltage control

1. บทนำ

ระบบไมโครกริด[1-4]คือ เครือข่ายพลังงานขนาดเล็กที่สามารถทำงานได้อย่างอิสระหรือร่วมกับระบบไฟฟ้าหลัก มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเปลี่ยนผ่านไปสู่ระบบพลังงานที่ยั่งยืนและมีความทนทาน ระบบเหล่านี้จะมีรวมแหล่งพลังงานหมุนเวียนไว้ด้วย จำเป็นต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แม่นยำในการทำงานที่มีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูงสุด การควบคุมแรงดันไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญต่อการรักษาคุณภาพพลังงาน ลดการสูญเสียพลังงาน และปกป้องอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ หนึ่งในความสำคัญในการจัดการไมโครกริดคือการปรับขนาดตัวเก็บประจุที่จุดเชื่อมต่อร่วม (PCC)[5-7] ตัวเก็บประจุถูกใช้งานเพื่อควบคุมพลังงานรีแอคทีฟและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ในการเลือกขนาดที่เหมาะสมที่สุดนั้นซับซ้อนเนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไมโครกริด การใช้การสุ่มขนาดตัวเก็บประจุเป็นวิธีที่ใหม่ที่ต้องการวิเคราะห์อย่างเหมาะสม เพื่อเข้าใจผลกระทบต่อการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและความเสถียรโดยรวมของระบบ การศึกษานี้ได้ก้าวข้ามวิธีการแบบเดิมโดยใช้การกำหนดขนาดตัว

เก็บประจุแบบสุ่มและมุ่งเน้นที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าโดยอิงจุดเชื่อมต่อร่วม (PCC) ในไมโครกริด เพื่อเสนอมุมมองใหม่และวิธีแก้ปัญหาที่เป็นประโยชน์ การวิเคราะห์อย่างละเอียดและศักยภาพของการใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบเรียลไทม์ช่วยเสริมระบบเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาการติดตั้งตัวเก็บประจุแบบสุ่มในระบบไมโครกริดด้วยการใช้โปรแกรม Open electric power distribution system simulator (OpenDSS) ทำการจำลองระบบที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อที่จะได้นำไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้า วางแผนในการติดตั้งและคำนวณค่าใช้จ่ายต่อไป

2. ตัวเก็บประจุระบบไมโครกริด

ตัวเก็บประจุในระบบไมโครกริด การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุในระบบไมโครกริด การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุในระบบไมโครกริด ตามรูปที่ 1 จำเป็นต้องเข้าใจคุณลักษณะทางไฟฟ้าและการทำงานร่วมกับองค์ประกอบอื่นๆ ในระบบโดยมีขั้นตอนหลักในการสร้างแบบจำลองที่ต้องพิจารณา ตัวเก็บประจุในไมโครกริดมีบทบาทในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง รักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้า และ สนับสนุนพลังงานรีแอคทีฟ ดังนั้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นต้องสะท้อนถึงหน้าที่เหล่านี้ ในการวิเคราะห์สภาวะคงที่ ตัวเก็บประจุในระบบไมโครกริดถูกจำลองโดยใช้การสนับสนุนจากพลังงานรีแอคทีฟ ซึ่งช่วยในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าและปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบ

ในการวิเคราะห์สภาวะคงที่ ตัวเก็บประจุมักถูกจำลองโดยพิจารณาจากส่วนที่เป็นพลังงานรีแอคทีฟ ซึ่งมีความสำคัญต่อการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

$$Q_c = V^2 \omega C \qquad (1)$$

โดยที่

Q_c คือ พลังงานรีแอคทีฟ (Reactive Power)

V คือ แรงดันไฟฟ้าแบบค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS Voltage) ที่ตัวเก็บประจุ

ω คือ ความถี่เชิงมุม ($\omega = 2\pi f$)

C คือค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

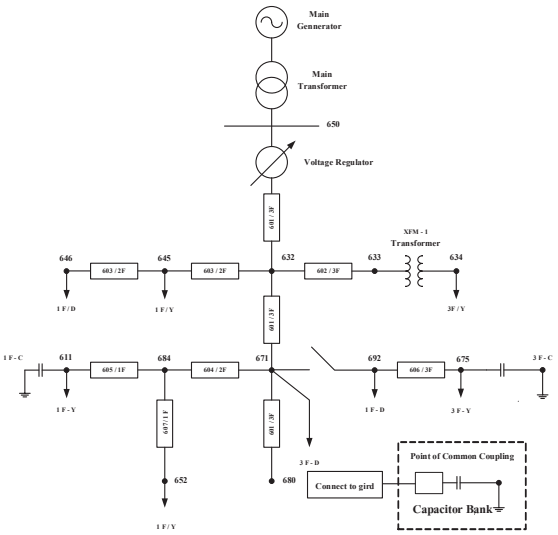
การสร้างการกำหนดขนาดแบบสุ่มสร้างตัวเก็บประจุแบบสุ่มจำนวน N ภายในช่วงที่กำหนดไว้ล่วงหน้า โดยใช้ตัวสร้างเลขสุ่มเพื่อกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ 2

$$C_i = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min}) \times rand\ (0,1) \qquad (2)$$

เมื่อ C_i คือ ค่าตัวเก็บประจุที่สุ่ม

$C_{\min}$ คือ ค่าตัวเก็บต่ำสุด

$C_{\max}$ คือ ค่าตัวเก็บสูงสุด



รูปที่ 1 ระบบไมโครกริด IEEE 13 บัส

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเป็นที่นิยมใช้ระบบ IEEE 13-bus standard system [2–3] เป็นกรณีศึกษา โปรแกรม OpenDSS ได้ถูกนำมาใช้ในหลากหลายวิธีการวิเคราะห์ อัลกอริทึม และการจำลอง ระบบนี้ประกอบด้วยสายไฟฟ้า หม้อแปลง ตัวเก็บประจุ และโหลด ซึ่งเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมที่สมจริงและเหมาะสมสำหรับการทดสอบ

จุดเชื่อมต่อร่วม (Point of Common Coupling - PCC) เป็นส่วนประกอบของระบบจ่ายไฟฟ้า และถือว่าเป็นองค์ประกอบเครือข่ายที่มีวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นแบบแยกการทำงานหรือเชื่อมต่อกับเครือข่าย ได้รับการนิยมยอมรับในลักษณะการทำงานที่โดดเด่น ซึ่งสามารถทำได้ผ่านจุดเชื่อมต่อร่วมที่เรียกว่า Point-of-Common-Coupling (PCC) [5] ความสำคัญของการนำไมโครกริดมาใช้อยู่ที่ความสามารถในการผสมผสานแหล่งพลังงานหมุนเวียนเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้าที่มีอยู่ ซึ่งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและการปล่อยมลพิษที่เกี่ยวข้องกับวิธีการผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิม [6] การทำงานให้ง่ายด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเน้นถึงความสำคัญของการผสมผสานเทคโนโลยีสมาร์ทกริดเข้าไปด้วยสมการการไหลของพลังงาน ทั้ง

กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปฏิกิริยาที่ PCC สามารถเขียนได้เป็น

$$P_{pcc} = P_{pi} - P_{load} \quad (3)$$

$$Q_{pcc} = Q_{pi} - Q_{load} \quad (4)$$

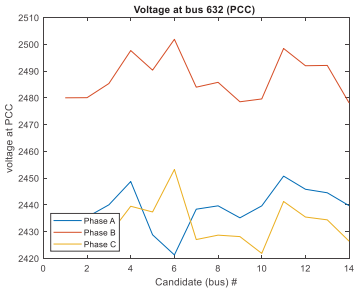
$$Q_{ref} = k\left(V_{ref} - V_{pcc}\right) \quad (5)$$

โดยที่

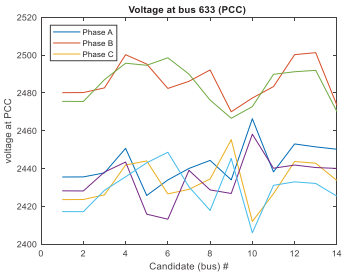
P_{pi} คือ กำลังไฟฟ้าจริง
Q_{iv} คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเกิด
P_{load} คือ เป็นกำลังไฟฟ้าจริงที่ใช้โดยโหลด
Q_{load} คือ กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเกิดจากที่ใช้กับโหลด
V_{pcc} คือ แรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อร่วม (PCC)

3. ผลการวิจัย

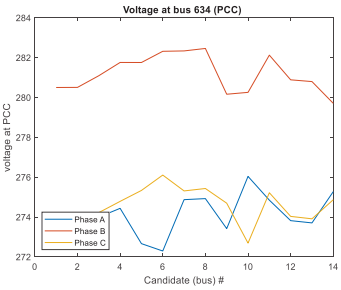
ผลการวิจัยการศึกษาเรื่องการกำหนดขนาดตัวเก็บประจุแบบสุ่มโดยใช้จุดเชื่อมต่อทั่วไปแบบ (PCC) ที่อิงตามการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริดผลที่ได้การจำลองงานที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดขนาดของแบงก์ตัวเก็บประจุแบบสุ่มที่จุดเชื่อมต่อร่วม (PCC) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริดที่ใช้ การจำลองดำเนินการผ่านโมเดลไมโครกริดตามมาตรฐาน โดยมีสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกลยุทธ์การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ได้สถานการณ์การจำลอง สถานการณ์กับระบบบัส 3 เฟส ระบบมาตรฐาน IEEE 13 บัส ขนาดค่าตัวเก็บประจุต่ำสุดที่ 1 kVAR และสูงสุดที่ 600 kVAR ตำแหน่งติดตั้งที่บัสที่ไม่มีตัวเก็บประจุติดตั้ง ประกอบไปด้วย บัส 632 633 634671 และบัส 675 การจำลองด้วยโปรแกรมที่ตำแหน่งแรงดันไฟฟ้าที่ PCC โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบคงที่เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบพื้นฐาน สถานการณ์นี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะเฉพาะของระบบโดยไม่มีผลกระทบกับแรงดันไฟฟ้าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC ถูกสังเกตในช่วงเวลาหนึ่ง โดยคำนึงถึงความแปรผันของโหลดในลักษณะทั่วไป ตัวเก็บประจุแบบคงที่ถูกใช้ในการจัดการกำลังไฟฟ้าและผลการทดสอบที่ได้คือสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุแบบสุ่ม ถึงแม้ว่าขนาดของแบงก์ตัวเก็บประจุจะถูกกำหนดแบบสุ่ม แต่ระบบยังสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ตลอดช่วงการจำลองของระบบสุ่มติดตั้งในบัสที่กำหนดค่าที่ได้ตามผลในตารางที่ 1 ผลการทดสอบแรงดัน PCC ในบัสที่กำหนดโดยไม่ให้ค่าผลของ Losses ในระบบทั้งหมดเปลี่ยนแปลงในกราฟแสดงผลรูปที่ 2-5



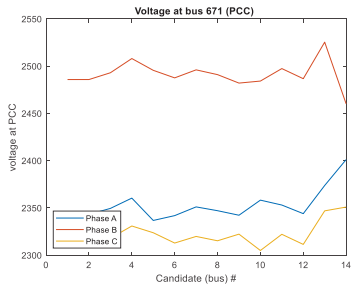
รูปที่ 2 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 632 (PCC)



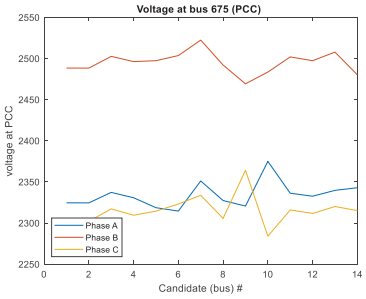
รูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 633 (PCC)



รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 634 (PCC)



รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 671 (PCC)



รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าที่บัส 675 (PCC)

การเปรียบเทียบกับระบบแบบมาตรฐาน (Base Case) แรงดันไฟฟ้าที่มี ขนาดตัวเก็บประจุแบบสุ่มแสดงให้เห็นถึงความผันแปรที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีแบบมาตรฐาน ซึ่งบ่งชี้ถึงความจำเป็นในการใช้วิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าแบบไดนามิกและตอบสนองได้มากขึ้นในระบบไมโครกริดที่ 2.4018 kV ผลการสุ่มตัวเก็บประจุในแต่ละตำแหน่งดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการสุ่มตัวเก็บประจุติดตั้งในแต่ละบัส

ตำแหน่งติดตั้ง	ขนาดตัวเก็บประจุที่วัดแรงดันที่บัส Point of Common Coupling (PCC) kVAR				
	632	633	634	671	675
1	7	550	137	50	511
2	202	171	548	239	373
3	97	454	91	155	210
4	476	452	495	480	307
5	186	228	323	258	241
6	317	340	597	546	45
7	99	45	46	109	143
8	361	32	265	158	73
9	157	318	63	87	110
10	392	467	577	81	143
11	413	560	2	521	250
12	448	77	464	347	29
13	270	341	490	329	541
14	50	281	521	86	566

4. สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัยการกำหนดขนาดตัวเก็บประจุแบบสุ่มโดยใช้จุดเชื่อมต่อทั่วไปแบบ (PCC) ที่อิงตามการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด ผลการจำลองระบุว่าตัวเก็บประจุได้ LINE LOSSES= 106.5 kW ,TRANSFORMER LOSSES = 5.9 kW, TOTAL LOSSES= 112.4 kW, TOTAL LOAD POWER = 3454.7 kW, Percent Losses for Circuit = 3.25 % คงที่มีประสิทธิภาพในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าก่อให้เกิดปัญหาและต้องแก้ไขอย่างมีนัยสำคัญ การกำหนดขนาดตัวเก็บประจุแบบสุ่มให้ข้อมูลเชิงลึกเชิงปฏิบัติเกี่ยวกับการจัดการแรงดันไฟฟ้า โดยแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีประสิทธิภาพในภาพรวม แต่บางสถานการณ์จำเป็นต้องมีแนวทางที่ยืดหยุ่นมากขึ้นเพื่อรักษาการควบคุมแรงดันไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ งานวิจัยต่อไปจะเน้นการปรับแต่งขนาดตัวเก็บประจุให้เหมาะสมและการศึกษาการควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบไมโครกริด

การนำเทคโนโลยีซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ขั้นสูง มาใช้งานสามารถช่วยให้ไมโครกริดมีความเสถียร ประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นที่ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของการจัดการความไม่แน่นอนของแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังมีการปรับแต่งขนาดตัวเก็บประจุและการควบคุมให้เหมาะสมอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] R. H. Lasseter and P. Paigi, “Microgrid: a conceptual solution,” in 2004 IEEE 35t Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No04CH37551), 2004.

[2] B. Yosrueangsak, C. Summatta, P. Prabpal, N. Thaitae, and S. Sonasang, “Impact of V2G in microgrid systems with PFC,” in 2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2023, pp. 1–4.

[3] N. Thaitae, C. Summatta, P. Prabpal, B. Yosrueangsak, and S. Sonasang, “Hybrid PV and BES for EV Charging Stations in Microgrid Systems,” in 2023 20th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2023, pp. 1–4.

[4] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, “Defining control strategies for MicroGrids islanded operation,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 916–924, 2006.

[5] B. K. Perera, P. Ciufo, and S. Perera, “Point of common coupling (PCC) voltage control of a grid-connected solar photovoltaic (PV) system,” in IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 7475–7480.

[6] R. Tonkoski, L. A. C. Lopes, and T. H. M. El-Fouly, “Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 2, no. 2, pp. 139–147, 2011.

[7] S. H. Madaeni, R. Sioshansi, and P. Denholm, “Estimating the capacity value of concentrating solar power plants with thermal energy storage: A case study of the southwestern United States,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1205–1215, 2013.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเลือกปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยการวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดจากความผิดพร่อง

Distribution System Improvement Selection Based on Fault-Induced Damage Cost Analysis

นิติกร เกษพรหม สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการเลือกรูปแบบการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดจากความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าความเสียหายเหล่านี้สามารถประมาณได้จากสองส่วน ส่วนแรกเกิดจากไฟฟ้าดับซึ่งทำให้เสียโอกาสในการขายไฟฟ้าและต้องมีค่าใช้จ่ายในการแก้ไขไฟฟ้าดับ ส่วนที่สองเกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะซึ่งส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า วิธีการนี้จะเป็นการจำลองความผิดพร่องที่จุดต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าและประเมินผลกระทบต่อผู้บริโภคไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม ธุรกิจ และที่อยู่อาศัย โดยรูปแบบของการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนชนิดของสายไฟฟ้า การเปลี่ยนชนิดของลูกถ้วยไฟฟ้า และการเปลี่ยนทั้งสองแบบร่วมกัน ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผลรวมของค่าความเสียหายทั้งหมดจากทั้งสองส่วนเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเสียหายเหล่านี้ของทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง ทำให้ได้รับข้อมูลเพื่อใช้ในการตัดสินใจวางแผนการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

คำสำคัญ: การปรับปรุง, ความผิดพร่อง, ค่าความเสียหาย, แรงดันตกชั่วขณะ, ไฟฟ้าดับ

Abstract

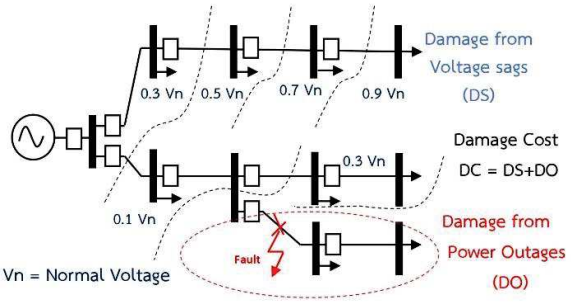
This research article studies the guidelines for selecting a model for improving the power distribution system by analyzing the damage cost caused by faults in the power system. These damage costs can be estimated in two parts. The first part is due to power outages, which result in lost electricity sales opportunities and power restoration costs. The second part results from voltage sags, which affect electrical equipment sensitive to voltage variations. This method involves simulating faults at various points in the power distribution system and assessing the impact on electricity consumers in the industrial, commercial, and residential sectors. The types of power distribution system improvements studied include changing the type of electrical conductors, changing the type of insulators, and changing both types simultaneously. The results showed that the total damage cost of both parts, when comparing these losses before and after the improvements, provides information for decision-making in planning power distribution system improvements efficiently and economically.

Keywords: Improvement, Faults, Damage Cost, Voltage Sag, Outages

1. บทนำ

การเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น คือการเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าชำรุด กิ่งไม้หรือสัตว์สัมผัสสายไฟฟ้า และ ฟ้าผ่า เป็นต้น สามารถส่งผลกระทบต่อทั้งผู้จำหน่ายและผู้ใช้ไฟฟ้า โดยจะทำให้เกิด 2 เหตุการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่ เหตุการณ์ไฟฟ้าดับสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่หลังตำแหน่งที่เกิดความผิดพร่อง ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียโอกาสในการจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าให้ผู้ใช้ไฟฟ้า และเหตุการณ์แรงดันตกชั่วขณะสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่ในระบบเดียวกันทั้งหมด ซึ่งทำให้เกิดค่าความเสียหายในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้าจากการที่อุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเกิดการหยุดชะงัก หรือทำงานผิดปกติ [1]

ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ส่วนนั้น สามารถทำการประมาณได้ด้วยวิธีการจำลองการเกิดความผิดพร่องแบบสุ่ม (Stochastic Assessment) [2] โดยใช้ค่าสถิติที่บันทึกไว้ และเมื่อนำมารวมกันจะทำให้สามารถวิเคราะห์ค่าความเสียหายที่เกิดจากความผิดพร่องของทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยรูปแบบต่าง ๆ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับต้นทุนที่ใช้เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดความผิดพร่องจะทำให้สามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกรูปแบบในการปรับปรุงได้อย่างคุ้มค่าและเหมาะสมกับงบประมาณที่มีต่อไป



รูปที่ 1 ความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่อง

2. การประมาณความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่อง (DC)

ค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากความผิดพร่องทั้งหมดนั้นจะทำการประมาณค่าจาก 2 ส่วน ดังนี้

2.1 ความเสียหายจากการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (DS)

สามารถประเมินได้ทั้ง ขนาด ระยะเวลา และจำนวนครั้ง ของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ ดังนี้ [3]

1) ขนาดสามารถหาได้จากการคำนวณตามกฎการแบ่งแรงดัน
2) ระยะเวลาประเมินได้จากระยะเวลาการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน
3) จำนวนครั้งจะใช้เส้นแนวความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน SEMI F47 เป็นตัวแทนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ตามบัสต่าง ๆ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า [4]

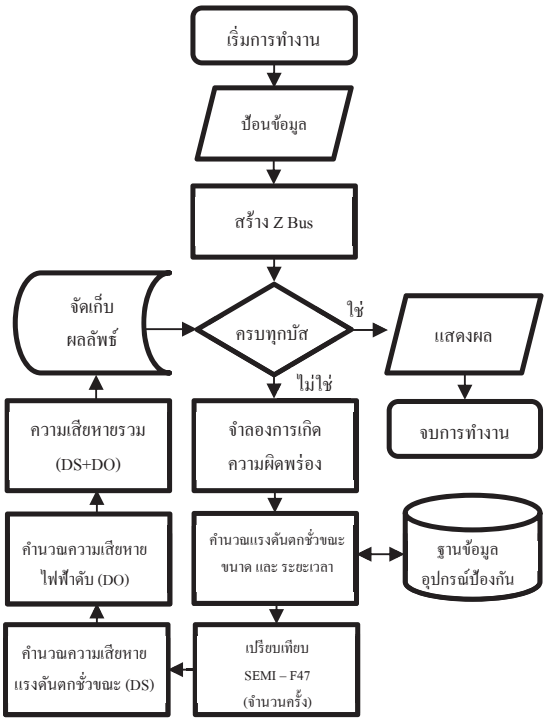
2.2 ความเสียหายจากการเกิดไฟฟ้าดับ (DO)

กรณีที่ไฟฟ้าดับจะเกิดความเสียหายจาก 2 ส่วน ดังนี้

1) การสูญเสียโอกาสในการขายไฟฟ้า
2) ค่าใช้จ่ายที่จำเป็นเพื่อแก้ไขให้ระบบกลับคืนสู่สภาพปกติ ได้แก่ ค่าจ้างพนักงาน อะไหล่อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องมือไฟฟ้า และน้ำมันเชื้อเพลิงยานพาหนะ เป็นต้น

โดยจะนำค่าเฉลี่ยจากข้อมูลสถิติที่ได้บันทึกไว้มาใช้ในการประเมิน

3. ขั้นตอนการประมาณค่าความเสียหายจากความผิดพร่อง



รูปที่ 2 แผนผังการคำนวณค่าความเสียหายจากการเกิดความผิดพร่อง

4. การพิจารณาตัดสินใจเลือกรูปแบบในการปรับปรุง

ในการตัดสินใจเลือกรูปแบบในการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุดนั้น จะใช้วิธีการเพื่อพิจารณาได้ดังนี้ [5]

4.1 วิธีระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB) เป็นการหาระยะเวลาที่ค่าความเสียหายที่สามารถลดลงได้มีค่าเท่ากับเงินลงทุน

4.2 วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value : NPV) เป็นวิธีการประเมินมูลค่าของกระแสเงินสดในอนาคตเมื่อถูกลดทอนลงให้เท่ากับมูลค่าในปัจจุบัน โดยพิจารณาค่าของเงินตามเวลา (Time Value of Money) ด้วยอัตราการคิดลด (r : Discount rate) ที่กำหนด หาก NPV มีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการหรือลงทุนที่พิจารณานั้นมีความคุ้มค่า สามารถหาได้ตามสมการที่ (1)

$$NPV = \sum_{t=1}^{n}\left(\frac{C_t}{(1+r)^t}\right) - C_0 \qquad (1)$$

NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)

C_t คือ ค่าความเสียหายที่ลดลงได้ในช่วงเวลา t (บาท/ปี) มาจากค่า DC (หลังปรับปรุง) – DC (ก่อนปรับปรุง)

C_0 คือ ต้นทุนทั้งหมดที่ใช้ในการปรับปรุงระบบจำหน่าย (บาท)

r คือ อัตราการคิดลด (discount rate) หรือ อัตราดอกเบี้ย

n คือ จำนวนปีทั้งหมด (ปี)

t คือ ปีที่สามารถลดค่าความเสียหายลงได้ (ปี)

สำหรับค่า C_0 สามารถหาได้ตามสมการที่ (2)

$$C_0 = \sum LC_I \qquad (2)$$

L คือ ความยาวของวงจรที่ต้องปรับปรุง (กม.)

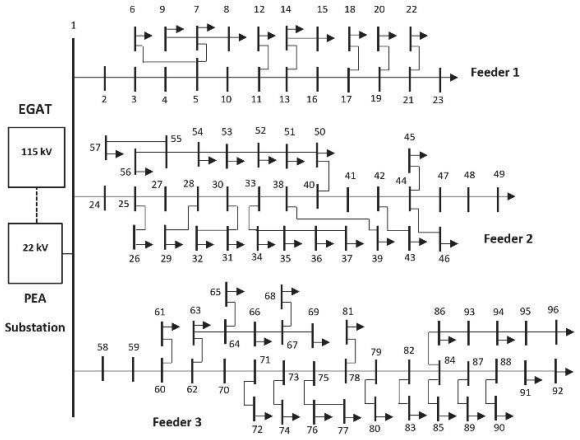
C_I คือ ต้นทุนในการปรับปรุงของแต่ละวงจร (บาท/กม.)

โดยเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาตัดสินใจมีลำดับ ดังนี้

1) คัดเลือกรูปแบบที่มีค่า NPV มากกว่า 0 และ PB ไม่เกิน 5 ปี
2) คัดเลือกรูปแบบที่ใช้งบลงทุนอยู่ในช่วงงบประมาณที่กำหนด
3) เรียงลำดับรูปแบบตาม NPV จากค่าสูงไปค่าต่ำ
4) กรณีมี NPV เท่ากัน หรือใกล้เคียงกันจะใช้ PB เป็นเกณฑ์รอง
5) เลือกรูปแบบที่ดีที่สุดตามลำดับที่ได้

5. กรณีศึกษา

ในการศึกษาจะใช้ข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV ของสถานีไฟฟ้าย่อย สระบุรี 1 (ปี พ.ศ.2548) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จำนวน 3 สายป้อน 96 บัส ความยาวรวม 61.49 กิโลเมตร แผนผังวงจรเส้นเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 สถานีไฟฟ้าย่อย สระบุรี 1 การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

5.1 รูปแบบของการปรับปรุงระบบจำหน่าย

การปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้ จะมีการดำเนินการ 4 รูปแบบ ได้แก่

แบบ A : การเปลี่ยนชนิดสายไฟฟ้า ขนาด 185 ต.มม. จากสาย หุ้มฉนวนบางส่วน (PIC : Partial Insulated Conductor) เป็น สายหุ้มฉนวนไม่เต็มพิกัด (SAC : Space Aerial Cable)

แบบ B : การเปลี่ยนชนิดสายไฟฟ้า ขนาด 50 ต.มม. จากสายอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR : Aluminum Conductor Steel – Reinforced) เป็นสายหุ้มฉนวนบางส่วน (PIC)

แบบ C : การเปลี่ยนชนิดลูกถ้วย จาก PIN TYPE เป็น LINE POST TYPE สำหรับลูกถ้วยที่ติดตั้งในวงจรของสายที่มีขนาด 50 ต.มม. ชนิดอะลูมิเนียมแกนเหล็ก (ACSR)

แบบ BC : การปรับปรุงรูปแบบ B และ C พร้อมกัน ในวงจรของสายที่มีขนาด 50 ต.มม. ชนิดอะลูมิเนียมแกนเหล็ก

การจำลองเหตุการณ์เพื่อปรับปรุงระบบจำหน่ายรูปแบบต่าง ๆ ในแต่ละวงจรสายป้อนนั้น จะกำหนดให้มีการดำเนินการทั้งหมด 50 รูปแบบกรณีศึกษา โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ข้อมูลและต้นทุนการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้า

รูปแบบการปรับปรุง	อัตราการเกิดความผิดพร่อง (ครั้ง/กม./ปี)		ต้นทุนการปรับปรุง (ล้านบาท / กม.)
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
A	2.0	1.5	1.5
B	2.5	2.0	0.75
C	2.5	2.25	0.25
BC	2.5	1.75	0.9

หมายเหตุ อัตราความผิดพร่องแต่ละชนิด มีค่า 3PH 5%, SLG 70%, LLG 10% , LL 5%

ตารางที่ 2 รูปแบบการปรับปรุงของแต่ละกรณีศึกษา

กรณีศึกษา	สายป้อนที่ 1	สายป้อนที่ 2	สายป้อนที่ 3	กรณีศึกษา	สายป้อนที่ 1	สายป้อนที่ 2	สายป้อนที่ 3
1	-	-	-	26	AC	-	-
2	A	-	-	27	-	AC	-
3	-	A	-	28	-	-	AC
4	-	-	A	29	BC	-	-
5	B	-	-	30	-	BC	-
6	-	B	-	31	-	-	BC
7	-	-	B	32	AB	AB	-
8	C	-	-	33	AB	-	AB
9	-	C	-	34	-	AB	AB
10	-	-	C	35	AB	AB	AB
11	A	A	-	36	AC	AC	-
12	A	-	A	37	AC	-	AC
13	-	A	A	38	-	AC	AC
14	A	A	A	39	AC	AC	AC
15	B	B	-	40	BC	BC	-
16	B	-	B	41	BC	-	BC
17	-	B	B	42	-	BC	BC
18	B	B	B	43	BC	BC	BC
19	C	C	-	44	ABC	-	-
20	C	-	C	45	-	ABC	-
21	-	C	C	46	-	-	ABC
22	C	C	C	47	ABC	ABC	-
23	AB	-	-	48	-	ABC	ABC
24	-	AB	-	49	ABC	-	ABC
25	-	-	AB	50	ABC	ABC	ABC

5.2 ต้นทุนการปรับปรุงระบบจำหน่าย

ต้นทุนการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการศึกษานี้ จะรวมถึง ค่าวื้อถอน ติดตั้ง และค่าดำเนินการด้วย เพื่อเป็นการลดค่าความเสียหายจากทั้งแรงดันตกชั่วขณะและไฟฟ้าดับที่มีสาเหตุมาจากการเกิดความผิดพร่อง โดยข้อมูลและต้นทุนสมมติเพื่อใช้คำนวณการปรับปรุงระบบจำหน่ายแสดงในตารางที่ 1

6. ผลการศึกษา

ผลที่ได้จากการศึกษาแสดงในตารางที่ 3 และสามารถทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ ดังนี้

1) รูปแบบที่สามารถลดค่าความเสียหายรวมได้มากที่สุด 5 อันดับแรก (มากกว่า 10 ล้านบาท)ได้แก่ รูปแบบที่ 50, 35, 39, 49 และ 48 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการศึกษา (ตามลำดับงบประมาณ)

งบประมาณ (ล้านบาท)	ลำดับที่	รูปแบบการปรับปรุงที่	ต้นทุนการปรับปรุง (ล้านบาท)	ลดความเสียหายเรงด้นครั้งขณะ/ปี (ล้านบาท)	ลดความเสียหายไฟฟ้าดับ/ปี (ล้านบาท)	ลดค่าความเสียหายรวม/ปี (ล้านบาท)	PB ระยะเวลาการคืนทุน (ปี)	NPV (ล้านบาท) (i =5 ปี และ r= 3 %)
น้อยกว่า 5	1	20	3.48	1.11	0.18	1.29	**2.69**	2.44
	2	21	4.25	1.20	0.22	1.42	**3.00**	2.24
	3	10	2.18	0.85	0.11	0.96	**2.27**	2.21
5 - 10	1	31	7.83	2.53	0.34	2.87	**2.73**	5.30
	2	22	5.55	1.46	0.29	1.75	3.17	2.47
	3	7	6.53	1.68	0.23	1.91	3.42	2.20
10 - 15	1	41	12.51	3.49	0.54	4.03	3.10	5.95
	2	28	13.28	3.67	0.41	4.08	3.26	5.39
	3	26	14.41	3.71	0.57	4.28	3.37	5.20
15 - 25	1	46	18.93	5.32	0.63	5.95	3.18	8.33
	2	12	24.21	6.27	0.79	7.06	3.43	8.13
	3	11	24.36	5.91	0.82	6.73	3.62	6.47
25 - 35	1	**37**	27.69	7.38	0.98	8.36	3.31	**10.59**
	2	**33**	34.64	8.64	1.16	9.80	3.54	**10.23**
	3	38	26.60	6.56	0.83	7.39	3.60	7.26
35 - 40	1	**49**	36.72	9.74	1.34	**11.08**	3.32	**14.00**
	2	14	35.46	8.80	1.12	9.92	3.58	9.98
	3	48	37.65	8.91	1.28	**10.19**	3.70	8.99
มากกว่า 40	1	**50**	55.44	13.33	1.98	**15.31**	3.62	**14.67**
	2	**39**	41.01	10.27	1.41	**11.68**	3.51	**12.46**
	3	35	52.11	11.88	1.69	**13.57**	3.84	10.05

2) รูปแบบที่มีระยะเวลาของการคืนทุนน้อยที่สุด 4 อันดับแรก (ไม่เกิน 3 ปี) ได้แก่ รูปแบบที่ 10 , 20 , 31 และ 21 ตามลำดับ

3) รูปแบบที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เหมาะสมกับต้นทุนในการปรับปรุงหรืองบประมาณ 3 อันดับแรก แต่ละกรณี ดังนี้

- กรณี น้อยกว่า 5 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 20 , 21 และ 10
- กรณี 5 - 10 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 31 , 22 และ 7
- กรณี 10 - 15 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 41 , 28 และ 26
- กรณี 15 - 25 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 46 , 12 และ 11
- กรณี 25 - 35 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 37 , 33 และ 38
- กรณี 35 - 40 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 49 , 14 และ 48
- กรณี มากกว่า 40 ล้านบาท คือ รูปแบบที่ 50 , 39 และ 35

รูปแบบที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ตามลำดับงบประมาณที่มีการปรับเพิ่มขึ้น สามารถดำเนินการได้มีดังนี้

- เส้นทางที่ 1 คือ รูปแบบที่ 31, 46, 49 และ 50 ตามลำดับ
- เส้นทางที่ 2 คือ รูปแบบที่ 31, 41, 49 และ 50 ตามลำดับ
- เส้นทางที่ 3 คือ รูปแบบที่ 20, 41, 49 และ 50 ตามลำดับ
- เส้นทางที่ 4 คือ รูปแบบที่ 20, 37, 49 และ 50 ตามลำดับ

7. สรุป

วิธีการที่นำเสนอนี้เป็นแนวทางที่สามารถนำไปใช้ในการเลือกรูปแบบการลงทุนปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยในการพัฒนาสามารถนำผลของด้านอื่น เช่นการเพิ่มขึ้นของโหลด โอกาสในการขายไฟฟ้ามาร่วมพิจารณา เพื่อทำให้มีความถูกต้องในการตัดสินใจเพิ่มขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สนับสนุนการจัดทำบทความนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Han-Yang He, Wen-Hai Zhang, Ying Wang and Xian-Yong Xiao, “A Sensitive Industrial Process Model for Financial Losses Assessment Due to Voltage Sag and Short Interruptions,” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 36, No. 3, June 2021.

[2] M. Aliakbar-Golkar and Y. Raisee-Gahrooyi, “Stochastic Assessment of Voltage Sags in Distribution Networks,” Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 4, 192 No. 4, October. 2008.

[3] Chinmaya Behera , Abhishek Banik , Jaydeep Nandi , Shiladitya Dey , Galiveeti Hemakumar Reddy and Arup Kumar Goswami , “ Assessment of Financial Loss Due to Voltage Sag in an Industrial Distribution System,” IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP), 2019.

[4] SEMI F47: SPECIFICATION FOR SEMICONDUCTOR PROCESSING EQUIPMENT VOLTAGE SAG IMMUNITY, https://voltage-disturbance.com/voltage-quality/semi-f47-voltage-sag-immunity-standard/

[5] Liu, Y. Evaluation Method Based on NPV and IRR. In Proceedings of the 2nd International Conference on Enterprise Management and Economic Development, Dalian, China, 27–29 May 2022; Volume 656, pp. 817–820.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลของสารทำงานของระบบ ORC ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพโดยใช้วิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Effects of ORC working fluids in geothermal power generation using a computer-based simulation method

ฮามีมี ยูโซะ[1] วสุ สุขสุวรรณ[2] และ มักตาร์ แวหะยี[2*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

[2]ศูนย์วิจัยชีวมวล พลังงานและเทคโนโลยียั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

E-mail: wmakatar@eng.psu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารทำงานของระบบ Organic Rankine Cycle (ORC) ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพโดยใช้วิธีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ วัฏจักรของระบบเริ่มจากของไหลจากใต้ดินจะถูกลดความดันเพื่อให้กลายเป็นสองเฟสก่อนเข้าสู่ห้องแยก จากนั้นส่วนที่เป็นไอถูกนำไปขับกังหันแก๊สเพื่อผลิตไฟฟ้า สำหรับของไหลที่เหลือจะใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานในระบบ ORC เพื่อผลิตไฟฟ้าเสริม โดยสารทำงานของระบบ ORC ได้ศึกษาสามตัวอย่างได้แก่ R123, R113 และ R245fa ในการศึกษาได้ใช้ซอฟแวร์ Engineering Equation Solver (EES) จำลองการทำงานของระบบ ผลการศึกษาพบว่า ชนิดของสารทำงานมีผลต่อกำลังสุทธิของระบบ โดย R245fa ให้กำลังสูงสุด ในขณะที่ R113 ให้กำลังต่ำสุด ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและเลือกสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบ ORC ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อนใต้พิภพในอนาคต

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ, วัฏจักร ORC, การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Abstract

The effects of working fluids of an Organic Rankine Cycle (ORC) system in geothermal electricity generation using computer simulation were studied. The cycle of the system operated with the underground fluid depressurized to become two phases before entering the separation chamber. Then, the vapor part was applied to drive the gas turbine to generate electricity. The heat of the remaining fluid was transferred to the working fluid of the ORC system to generate additional electricity. Three working fluids of the ORC system namely: R123, R113 and R245fa were studied. An Engineering Equation Solver (EES) software was used to simulate the system operation. The results showed that the type of working fluid affected the net power of the system, with R245fa providing the highest power and R113 providing the lowest power. The results of this study are useful to design and select the appropriate working fluid for ORC system applied in a future geothermal power plant.

Keywords: Geothermal power plant, Organic ranking cycle, Computer Simulation

1. บทนำ

การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีคาร์บอนเข้มข้นสูง เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน มากเกินไปก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปริมาณมหาศาล นักวิจัยพยายามค้นหาวิธีลดการปล่อยก๊าซ CO_2 [1, 2] โดยหันมาใช้เทคโนโลยีที่คำนึงถึงการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [3,4] ในทางกลับกัน การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกได้นำไปสู่ความต้องการพลังงานที่สูงขึ้น [5] เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งน้ำมันและก๊าซควรถูกใช้อย่างจำกัดและเหมาะสม [6, 7]

ตามรายงานของ International Energy Agency (IEA) พบว่าความต้องการพลังงานทั่วโลก มีการเติบโตถึง 2.1% ในปี 2017 ซึ่งมากกว่าปี 2016 ถึงสองเท่า หนึ่งในทางเลือกที่สะอาดเพื่อบรรเทาปัญหาด้านพลังงานคือการใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียน [8] เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ [9] พลังงานประเภทนี้สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง หรือจัดเก็บไว้ผ่านเทคนิคการกักเก็บพลังงาน เช่น การผลิตเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเข้มข้น เชื้อเพลิงที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การขนส่ง โรงงานอุตสาหกรรม โรงไฟฟ้า อุตสาหกรรมเคมีและอาหาร เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม พลังงานความร้อนใต้พิภพก็มีข้อจำกัดบางประการ เช่น การละลายของธาตุและสารประกอบในอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงในระบบน้ำเกลือและไอน้ำ ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับพลังงานความร้อนใต้พิภพและข้อจำกัดของระบบสามารถศึกษาได้จากเอกสารอ้างอิง [10]

การนำระบบ Organic Rankine Cycle (ORC) มาใช้ร่วมกับระบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพสามารถที่จะดึงความร้อนเหลือทิ้งมาใช้ผลิตไฟฟ้าเสริมได้ [3-4] ศักยภาพของระบบ ORC ขึ้นอยู่

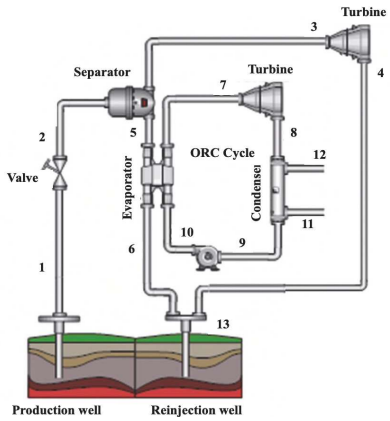
กับสารทำงาน (Working Fluid) เป็นหลัก ซึ่งต้องมีการศึกษาเพื่อเลือกสารทำงานที่เหมาะกับช่วงอุณหภูมิเหลือทิ้งของระบบหลัก

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ผลของสารทำงาน R123, R113 และ R245fa ของระบบ ORC (Organic Rankine Cycle) ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ โดยใช้ซอรฟแวร์ EES (Engineering Equation Solver) จำลองการทำงานของระบบ ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปพัฒนาระบบการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ

2. วิธีการศึกษา

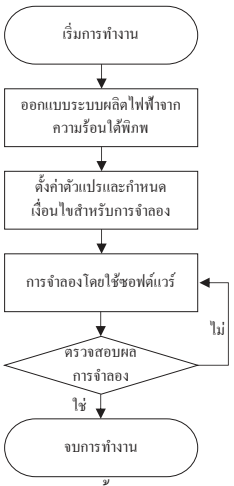
2.1 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยความร้อนใต้พิภพ

ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพแสดงในรูปที่ 1 เริ่มต้นจาก (สถานะ 1) Geothermal fluid ซึ่งอยู่ในรูปน้ำเกลือร้อน ถูกดูดขึ้นมาจากใต้ดินที่สถานะเป็นของเหลวอุณหภูมิสูง ผ่านวาล์วลดความดัน (สถานะ 2) ทำให้น้ำเกลือกลายเป็นสองเฟส (liquid + vapor) จากนั้นถูกส่งเข้า Separation chamber (สถานะ 3) เพื่อแยกเฟส ไอน้ำอิ่มตัวออกทาง สถานะ 3 ถูกส่งเข้า กังหันก๊าส เพื่อผลิตพลังงาน (สถานะ 4) และของเหลวที่เหลือจะไปที่ สถานะ 5 ถูกส่งไปยัง Evaporator เพื่อถ่ายเทความร้อน (สถานะ 6) ให้กับสารทำงานในระบบ ORC (Organic Rankine Cycle) เพื่อผลิตไฟฟ้าเสริมในระบบ ORC (สถานะ 7) สารทำงานในสถานะของเหลวที่ความดันต่ำผ่านกังหันและถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่น (สถานะ 8) และผ่านปั๊มกลายเป็นของเหลวแรงดันสูง ในส่วนของสถานะ 11 เป็น น้ำหล่อเย็น ถูกสูบเข้าสู่ condenser ของ ORC เพื่อลดอุณหภูมิไอของสารทำงานให้กลั่นตัว



รูปที่ 1 แผนผังของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพร่วมกับระบบ Organic Rankine Cycle (ORC)

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนใต้พิภพ โดยเริ่มจากขั้นตอนแรกคือการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าให้เหมาะสมกับแหล่งพลังงานความร้อนใต้พิภพ จากนั้นกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขที่จำเป็นในการจำลอง เช่น ค่าความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล เป็นต้น ต่อมาจะเป็นขั้นตอนการจำลองการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบไว้โดยใช้ซอฟต์แวร์สำหรับจำลองทางวิศวกรรม หลังจากเสร็จสิ้นการจำลองแล้วจะดำเนินการตรวจสอบผลที่ได้จากการจำลองเพื่อวิเคราะห์และประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง หากผลลัพธ์ยังไม่ถูกต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด จะย้อนกลับไปปรับปรุงค่าตัวแปรและเงื่อนไขที่กำหนดใหม่อีกครั้ง จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่เป็นที่น่าพอใจและสอดคล้องกับเป้าหมายของงานวิจัย



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

สำหรับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกของของไหลในระบบผลิตพลังงานโรงไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพร่วมกับระบบ ORC (Organic Rankine Cycle) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของของไหลในระบบ

State No.	Fluid	P [kPa]	T [C]	h [kj/kgK]	s [kj/kgK]	$\dot{m}$ [kg/s]
0	-	100	298.2	3071	8.211	-
1	Water	2795	230	990.1	2.61	50
2	Water	666.5	163	990.1	2.664	1
3	Water	666.5	163	2761	6.724	0.45
4	Water	96.4	98.58	2531	6.988	0.1454
5	Water	666.5	163	688.4	1.972	0.8546
6	Water	666.5	163	2761	6.724	0.8546
7	Geofluid	2637	120	530.4	1.499	40
8	Geofluid	468.8	40	461.2	1.499	40
9	Geofluid	468.8	40	109.1	0.3752	40
10	Geofluid	2637	40.75	112.9	0.3752	40
11	Air	100	25	298.6	5.699	53.86
12	Air	100	35	308.6	5.732	53.86

2.2 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

จำลองการทำงานของระบบใช้ซอร์ฟแวร์ Engineering Equation Solver (EES) โดยมีสมมติฐานมีดังนี้:

1) โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพทำงานใน สภาวะคงที่ (steady-state)

2) ไม่ได้พิจารณาการสูญเสียความดัน (pressure drop) ที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและท่อส่ง

3) กังหัน (turbine) และปั๊ม (pump) พิจารณาเป็นแบบ isentropic หมายถึงไม่มีการสูญเสียพลังงานจากความเสียดทานหรือความร้อนภายในอุปกรณ์

4) ไม่พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ พลังงานจลน์ (kinetic energy) และพลังงานศักย์ (potential energy) ในระบบ

5) ของไหลจากใต้พิภพ (geofluid) อยู่ในสถานะ ของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid) ภายในแหล่งกักเก็บใต้ดิน โดยมีค่า x=0 (หมายถึงไม่มีไอน้ำเลย)

6) ในการวิเคราะห์นี้ ใช้ คุณสมบัติของน้ำจืด แทนที่จะใช้คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของ geofluid จริง

7) ไม่พิจารณาการสูญเสียอุณหภูมิและความดัน ของของไหลจากใต้พิภพระหว่างกระบวนการแยกและควบแน่น

ในการคำนวณการทำงานของระบบ ได้ใช้สมการดังต่อไปนี้ เอ็กเซอร์จีจำเพาะของการไหล (Specific flow exergy) และ อัตราเอ็กเซอร์จีรวม (Rate of total exergy) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้:

$$e = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

$$\dot{E}=\dot{m}_i e \quad (2)$$

โดยที่ T_0 h_0 และ s_0 คืออุณหภูมิสภาพแวดล้อม เอนทาลปีและเอนโทรปีเริ่มต้น กำลังงานและอัตราการถ่ายเทความร้อนของแต่ละอุปกรณ์สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\dot{W}_i=\dot{m}_i(h_{in,i}-h_{out,i}) \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Net}=\sum \dot{W}_i \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{W}_i$ *และ* $\dot{W}_{Net}$ *คืองานของแต่ละอุปกรณ์และกำลังงานสุทธิตามลำดับ*

$$\dot{Q}_i=\dot{m}_i\left(h_{in,i}-h_{out,i}\right) \quad (5)$$

$$\eta_I=\frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_{in}} \quad (6)$$

โดยที่ $\dot{Q}_i$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อนและ η_I ประสิทธิภาพของระบบ

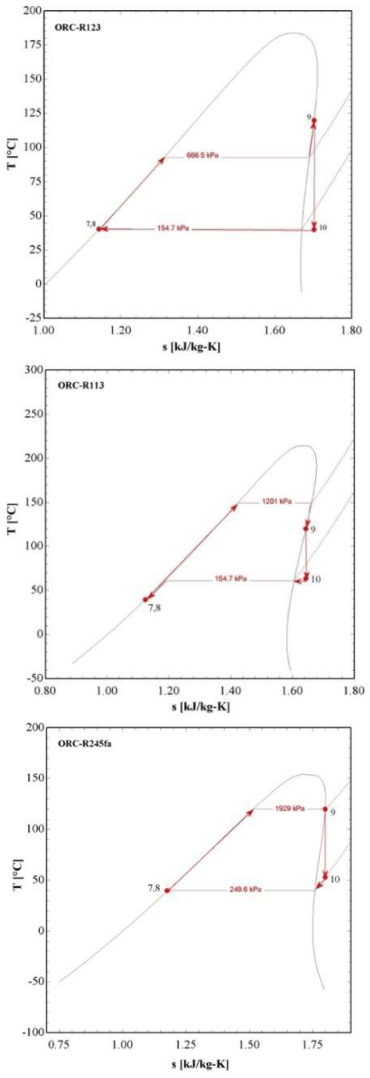
3. ผลการศึกษา

ตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลของ Peixi และคณะ [10] พบว่ากำลังงานที่ได้จากระบบมีค่าใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างไม่เกิน 5%

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบผลของกำลังที่ได้รับจากระบบ

Performance parameter	This work	Ref. [14]	%Error
Steam Turbine	103.4	107.95	4.21
ORC Turbine	1454	1433	1.47

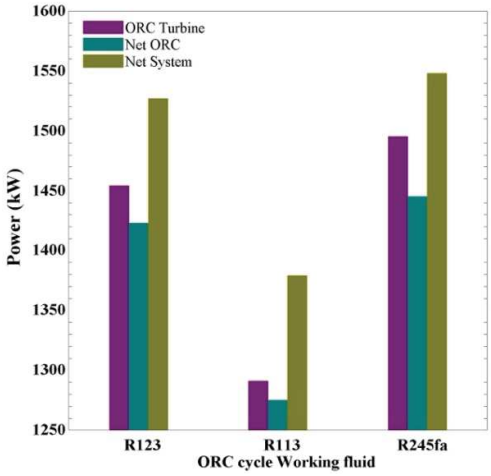
รูปที่ 3 แสดงแผนผังอุณหภูมิ-เอนโทรปี (T–S) ของสารทำงาน R123, R113 และ R245fa ตามลำดับ จากรูปพบว่าเอนโทรปีที่เกิดขึ้นของสารทำงานแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก สำหรับอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงความดันต่ำ (9-7) ของแต่ละสารทำงานมีความแตกต่างกันไม่มากนัก คืออยู่ในช่วงประมาณ 50 °C แต่สำหรับอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงความดันสูง (7-9) พบว่าสาร R123 มีค่าต่ำกว่าสารอื่นๆ



รูป 3 แผนผังอุณหภูมิ-เอนโทรปี (T–S) และความดัน ของสารทำงาน R123, R113 และ R245fa

สำหรับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีผลโดยตรงต่อการขับเทอร์ไบน์คือแรงดันที่อยู่ในช่วงสูง (7-9) จากรูปที่ 3 พบว่า แรงดันที่อยู่ในช่วงสูงของสาร R245 มีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตาม กำลังสุทธิที่ได้จากระบบ ORC จะต้องพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆประกอบด้วย เช่น เอนโทรปี (Entropy) และเอกเซอร์ยี่ (Exergy) เป็นต้น โดยกำลังที่ได้จากระบบ ORC และกำลังที่รวมกับระบบหลักจะแสดงในลำดับต่อไป

รูปที่ 4 แสดงกำลังที่ได้จากระบบ ORC และกำลังที่รวมกับระบบหลัก จากรูปจะเห็นได้ว่ากำลังที่ได้จากระบบ ORC มีค่าต่ำสุดเมื่อใช้สารทำงาน R113 และกำลังที่ได้จากระบบ ORC มีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารทำงาน R245fa เมื่อนำกำลังสุทธิที่ได้จากระบบ ORC รวมกับระบบหลักก็เป็นไปในทางเดียวกันคือ กำลังรวมมีค่าต่ำสุดเมื่อใช้สารทำงาน R113 และกำลังรวมมีค่าสูงสุดเมื่อใช้สารทำงาน R245fa จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้สารทำงาน R245fa สำหรับระบบ ORC สามารถให้กำลังสุทธิสูงกว่ากับการใช้สารทำงานอื่นๆที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 กำลังที่ได้จากระบบ ORC และกำลังที่รวมกับระบบหลัก

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารทำงานของระบบ Organic Rankine Cycle (ORC) ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนใต้พิภพ โดยสารทำงานของระบบ ORC ได้ศึกษาสามตัวอย่างได้แก่ R123, R113 และ R245fa จากการศึกษาพบว่า สารทำงาน R245fa ให้กำลังสูงสุด และ R113 ให้กำลังต่ำสุด ซึ่งสามารถนำผลการศึกษานี้ไปใช้ในการออกแบบสำหรับระบบ ORC ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานความร้อนใต้พิภพในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG6701391S

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Dahari, A.H. Mohd Sidek, M. Hussin, S. Mamat, R. Saidur, "Impact of CO_2 emission from fossil fuel in Malaysia and its mitigation by energy efficiency and renewable energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9, pp. 4083–4094, 2011.

[2] E. Ercan Ataer, "CO_2 mitigation with enhanced hydrogen production by integrating concentrated solar power system with electrolyzers," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 60, pp. 30810–30823, 2021.

[3] Y. Jiao, F. Wang, J. Sun, "Sustainability evaluation of geothermal utilization: A review on thermal and economic indicators," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, 110311, 2020.

[4] A. Khare, M. Sinha, S. Srivastava, "A review on policy and economics of geothermal energy: 2020 status," *Energy Policy*, vol. 144, 111672, 2020.

[5] BP Statistical Review of World Energy 2020. [Online]. Available: https://www.bp.com/statisticalreview

[6] M. Dincer, "Thermodynamic analysis of renewable-based integrated energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 100, pp. 82–92, 2015.

[7] H. Lund, B.V. Mathiesen, "The role of carbon capture and storage in a smart energy system," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 2, pp. 39–56, 2014.

[8] A. Hepbasli, Z. Dincer, "Exergy analysis of geothermal district heating systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 10, pp. 1701–1720, 2003.

[9] A. Barbier, "Geothermal energy technology and current status: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 1–2, pp. 3–65, 2002.

[10] Peixi Guo, N.Bharath Kumar, "CO_2 hydrogenation for geothermal energy storage through systhetic natural gas production and byproduct of refrigeration and freshwater using solid oxide electrolyzer cell (SOEC) and methanation reactor; Techno-economic evaluation and multi-objective optimization," *Geothermics*, 2023.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

Safety Design of Grounding System in Distribution Substation

ภัททิยา พยอมหอม[1] และ อรรถ พยอมหอม[2*]
[1]โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ ไทย-เยอรมัน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2]ฝ่ายออกแบบระบบไฟฟ้าและงานวิศวกรรมโยธา การไฟฟ้านครหลวง
E-mail: a.phayomhom@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบกราด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยนั้นสิ่งแรกต้องทำการวัดค่าความต้านจำเพาะของดินในพื้นที่ก่อสร้างนั้นก่อนเพื่อนำไปคำนวณหาค่ากฎเกณฑ์ความปลอดภัย จากนั้นจึงทำการออกแบบระบบกราวด์กริดไปจนกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดจะต่ำกว่าค่าของกฎเกณฑ์ความปลอดภัยโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-Std. 80-2013 และใช้ค่ากระแสผิดพร่องสูงสุด 40 กิโลแอมแปร์ สำหรับการสร้างแบบจำลอง (Modeling) และการจำลอง (Simulation) นั้น จะใช้โปรแกรม Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) เพื่อเป็นเครื่องมือในการศึกษา

คำสำคัญ: สถานีไฟฟ้าย่อย, ความต้านทานจำเพาะของดิน, แรงดันไฟฟ้าสัมผัส, แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว, กฎเกณฑ์ความปลอดภัย

Abstract

The ultimate goal of distribution substation grounding system design is safety; therefore, the inputs for the system design are meticulously collected. As a result, soil resistivity measurement is the first and most vital step of the procedure. The resistivity and fault current are used to calculate the maximum tolerable voltages for humans. In this paper, 40 kA is set as the maximum fault current. Once the safety benchmark is defined, the system design is iteratively adjusted until the voltages meet the specified criteria, according to IEEE Std. 80-2013. The simulation and modeling are carried out using a commercial software package, Current Distribution, Electromagnetic Field, Grounding and Soil Structure Analysis (CDEGS).

Keywords: distribution substation, soil resistivity, touch voltage, step voltage, safety criteria

1. บทนำ

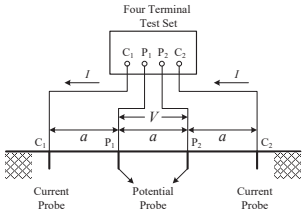
สถานีไฟฟ้าย่อยในการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) นั้น ส่วนมากจะเป็นชนิดใช้ฉนวนเป็นแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS) ซึ่งเป็นชนิดที่ออกแบบเพื่อให้อุปกรณ์หลักติดตั้งภายในสิ่งห่อหุ้ม (Enclosure) ซึ่งมีการอัดแก๊ส SF6 ที่เป็นฉนวนบรรจุอยู่ภายใน ทำให้สามารถลดขนาดระยะความปลอดภัยด้านไฟฟ้าแรงสูงลงได้ ทำให้ตัวสถานีไฟฟ้ามีขนาดเล็กลง โดยสามารถออกแบบและทำการติดตั้งได้ทั้งแบบนอกอาคาร (Outdoor Substation) และแบบติดตั้งในอาคาร (Indoor Substation) และยมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในพื้นที่ของ การไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากพื้นที่ในเมืองบริเวณต่าง ๆ ค่อนข้างหายาก และราคาที่ดินที่ค่อนข้างสูงมาก [1-2]

การเกิดความผิดพร่องจะทำให้เกิดกระแสจำนวนมาก ที่ไหลในโครงสร้างเหนือดิน (Aboveground) และระบบการต่อลงดินจะกระจายลงสู่ดิน ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ ในสถานีไฟฟ้าย่อย และอาจจะเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าย่อยและบริเวณข้างเคียง ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมกันคือ ข้อกำหนดหรือกฎเกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดัน ซึ่งประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุด (Maximum Touch Voltage) และแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Maximum Step Voltage) ที่มนุษย์สามารถทนได้ สำหรับการออกแบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัยด้านระบบไฟฟ้าโดยปราศจากอันตรายจากแรงดันหลังจากที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์เป็นสิ่งสำคัญ ในบทความนี้นำเสนอการออกแบบกราวด์กริด เพื่อให้เกิดความปลอดภัย โดยใช้สถานีไฟฟ้าย่อย 115/24 kV ขนาดหม้อแปลงติดตั้ง 120 MVA (2 x 60 MVA) โดยการสร้างแบบจำลอง (Modeling) และการจำลอง (Simulation) นั้นใช้โปรแกรม Current Distribution Electromagnetic Interference Grounding and Soil Structure (CDEGS) ผลของการจำลองจะแสดงผลของการออกแบบและการวิเคราะห์ระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยของการไฟฟ้านครหลวงโดยอ้างอิงมาตรฐาน IEEE 80-2013

2. การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

2.1 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ใช้วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ซึ่งได้แสดงไว้ในมาตรฐาน ANSI/IEEE Std. 81 แบบ 4 จุด (Wenner Method หรือ Four Point Method) เพราะเป็นวิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่นิยม ดังรูปที่ 1 [3]



รูปที่ 1 วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินแบบ 4 จุด

$$\rho_a = \frac{4\pi aR}{1+\frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}}-\frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}} \quad (1)$$

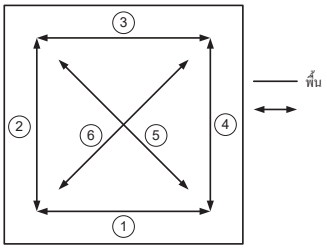
ρ_a คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่คำนวณได้ (Ω·m)
4 คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ที่ระยะห่างโพรบ
= คือ ระยะห่างของโพรบ (เมตร)
> คือ ความลึกของอิเล็กโตรดที่ปักลงดิน (เมตร)

เมื่อ =คือ ระยะห่างของโพรบ มีหน่วยเป็นเมตร และ >คือ ความลึกของโพรบ มีหน่วยเป็นเมตร ในกรณีที่ ≫ =ราพบว่า จากสมการที่ (1) สามารถลดรูปให้เหลือตามสมการที่ (2)

Ø L tŁ= 4 (2)

2.2 แนวการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในพื้นที่ก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยใหม่ ควรมีการวัดหลายๆ แนวประมาณ 4 ถึง 6 แนวตามสภาพพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 2 [4] หลังจากทำการวัดแล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทน



รูปที่ 2 แนวการวัดค่าความต้านจำเพาะของดินในพื้นที่ก่อสร้างใหม่

3. แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้

แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม สามารถทนได้หาตามสมการที่ (3) [3]

′ Ł 94 L :sÆr Æ s wØ % $\frac{r\,ss\ x}{\overline{¥P}}$ (3)

′ Ł 94 คือ แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่ทนได้ (โวลต์)
Ø คือ ความต้านทานจำเพาะของวัสดุปูผิวดิน (Ω·m)
% คือ ระยะห่างของโพรบ (เมตร)
P คือ ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย (วินาที)

แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่มนุษย์มีน้ำหนักเฉลี่ย 50 กิโลกรัม สามารถทนได้หาตามสมการที่ (4) [61]

′ 94 L :sÆr Æ xØ % $\frac{r\,ss\ x}{\overline{¥P}}$ (4)

′ 94 คือ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุดที่ทนได้ (โวลต์)

4. แรงดันไฟฟ้าเมชและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุดและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด สามารถหาได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ [3]

′ L$\frac{Ø - - +}{\cdot}$ (5)

′ คือ แรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (V)
– คือ ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดสำหรับแรงดันไฟฟ้าเมชสูงสุด (Spacing Factor for Mesh Voltage)
– คือ ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของลักษณะรูปทรงของกราวด์กริด (Correction Factor for Grid Geometry)
· คือ ความลึกของอิเล็กโตรดที่ปักลงดิน (เมตร)
+ คือ ค่ากระแสกริดสูงสุด (A)

′ L$\frac{Ø - - +}{\cdot}$ (6)

′ คือ แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (V)
– คือ ตัวคูณสัมประสิทธิ์เนื่องจากผลของระยะห่างระหว่างตัวนำของกราวด์กริดสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด (Spacing Factor for Step Voltage)
· คือ ความยาวยังตัวนำทั้งหมดของกราวด์กริดและความยาวทั้งหมดของแท่งราก สายดินสำหรับแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสูงสุด

เพื่อนำค่าแรงดันที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้ซึ่งถ้ามีค่าน้อยกว่าก็จะเกิดความปลอดภัย

5. ระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อย

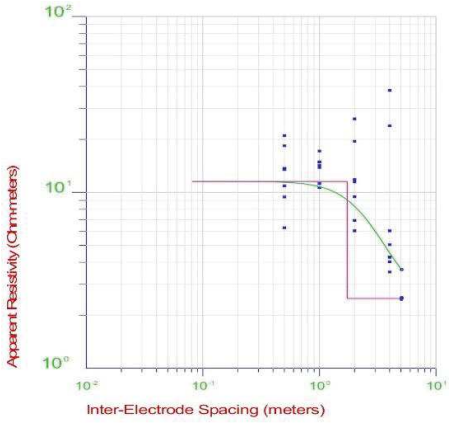
ระบบการต่อลงดินในสถานีไฟฟ้าย่อย เตรียมไว้สำหรับนำกระแสผิดพร่องลงสู่ดินเพื่อให้เกิดความเชื่อถือได้ทางระบบไฟฟ้ากำลัง และเพื่อป้องกันอุปกรณ์ และเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน สำหรับระบบการต่อลงดินนั้น จะรวมการต่อลงทั้งหมดของอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น กราวด์กริด สายดินที่เป็นสายอากาศ สายนิวทรอล สายเคเบิลใต้ดิน ฐานราก เป็นต้น สำหรับระบบกราวด์กริดนั้น จะประกอบไปด้วยการเชื่อมต่อของตัวนำเปลือย (Bare Conductor) และแท่งหลักดิน (Ground Rod) [5]

สำหรับการติดตั้งระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรีใช้พื้นที่หน้าตัดของตัวนำกราวด์กริดคือ 240 ตารางมิลลิเมตร และแต่ละกริด มีขนาด 3 x 3 เมตร ใช้แท่งหลักดินยาว 2.4 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร โดยแท่งหลักดินต่อลงดินโดยตรงกับตัวนำกราวด์กริดด้วยวิธีการเชื่อมแบบ Exothermic Welding ระบบกราวด์กริดนั้นจะติดตั้งอยู่ใต้ดินที่ระดับความลึก 0.5 เมตร

6. กรณีศึกษา

6.1 ผลการวิเคราะห์ความต้านทานจำเพาะของดิน

คุณลักษณะชั้นดินของสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรี ถูกวิเคราะห์ด้วยโมดูลที่อยู่ในโปรแกรม CDEGS ซึ่งเรียกว่า Rural Electric Safety Accreditation Program Module (RESAP) แสดงดังรูปที่ 3 และนำมาแสดงดังตารางที่ 1 สำหรับค่าความต้านทานจำเพาะของดินชั้นบน (Top Layer) มีค่า 11.51425 Ω·m ส่วนดินชั้นล่าง (Bottom Layer) มีค่า 2.490549 Ω·m ที่มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้นที่อยู่ในดิน ส่วนประกอบทางเคมี ความเข้มข้นของเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำ และขนาดของเม็ดดินโดยดินชั้นบนมีความหนา 1.733553 เมตร



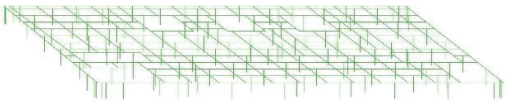
รูปที่ 3 แบบจำลองของความต้านทานจำเพาะของดิน

ตารางที่ 1 คุณลักษณะความต้านทานจำเพาะของดิน

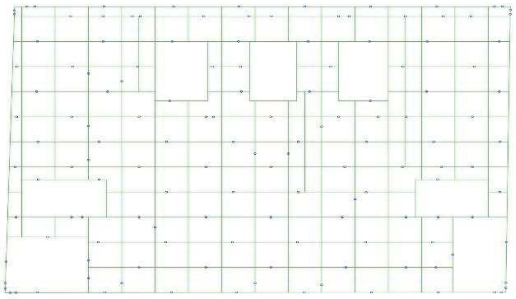
คุณลักษณะของชั้นดิน			
ชั้นดิน	ความต้านทานจำเพาะ (Ω·m)	ความหนา (เมตร)	Reflection Coefficient (p.u.)
ชั้นบน	11.51425	1.733553	-1.0000
ชั้นล่าง	2.490594	Infinity	-0.64433

6.2 แบบจำลองกราวด์กริดและผลการศึกษา

ระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรีที่ใช้โปรแกรม CDEGS โดดูล Malt แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรี



รูปที่ 5 แบบจำลองกราวด์กริด top view ของสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรี

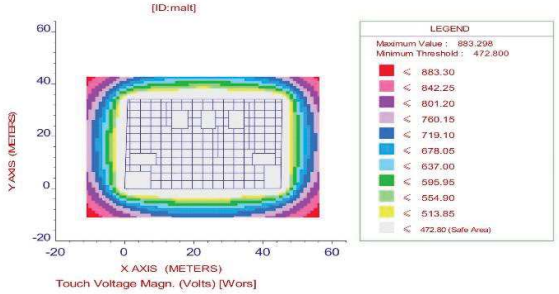
ในการสร้างสร้างแบบจำลองได้ค่าของ Estimated ground conductors grid (m) เท่ากับ 1,141.2 เมตร Estimated ground conductors Rod (m) เท่ากับ 336 เมตร ได้ Estimated ground conductors grid + Rod (m) (Overall) เท่ากับ 1,477.20 เมตรและได้ค่าของ Grounding resistance Rg (Ω) เท่ากับ 0.0318 Ω

ตารางที่ 2 กฎเกณฑ์ความปลอดภัย (safety criteria) ของน้ำหนัก 50 kg

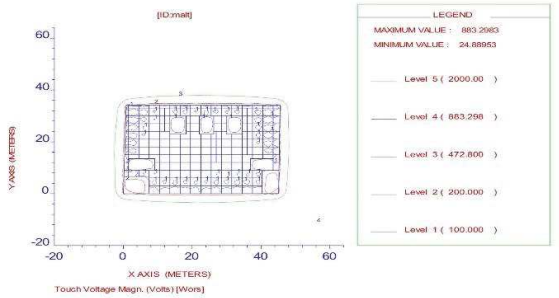
Surface Layer Resistivity (• ;	Fault Clearing Time 1 sec		Foot Resistance 1 Foot (• ;
	Touch Voltage (V)	Step Voltage (V)	
3,000	1,554	472.8	6,408.1

จากนั้นทำการรันโปรแกรม CDEGS ระบบกราด์กริดที่ได้ทำการออกแบบไว้จะได้ผลของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสดังรูปที่ 6 และ 7

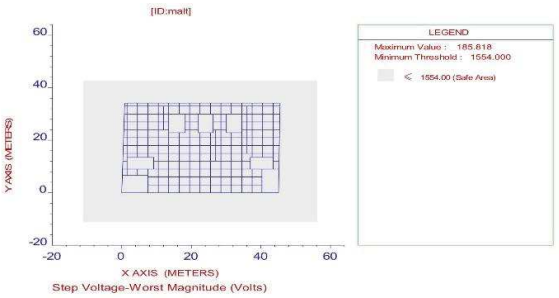
แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวดังรูปที่ 8 โดยใช้กระแสผิดพร่อง 40 kA ได้ผลการศึกษาด้วยโปรแกรม CDEGS ดังนี้



รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรี



รูปที่ 7 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรีระดับคอนทัวร์



รูปที่ 8 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวสถานีไฟฟ้าย่อยเพชรบุรี

จากผลการศึกษาพบว่ารูปแบบกราวด์กริดที่ออกแบบไว้มีความปลอดภัยสามารถรองรับกระแสผิดพร่องที่ 40 kA ได้และเมื่อทำการปูผิวหน้าด้วยวัสดุที่มีความต้านทานจำเพาะ 3,000 Ω·m ซึ่งเป็นหินเบอร์ 2 (Crushed Rock) ทำให้ค่าของ safety criteria ซึ่งประกอบไปด้วยค่าของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ คือ 1,554 โวลต์ และ 472.8 โวลต์ ตามลำดับมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวในสถานีไฟฟ้าที่ออกแบบไว้ ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่เกินค่าของ safety criteria จะอยู่เลยบริเวณขอบเขตมีมีการติดตั้งระบบกราวด์กริดไว้แล้วถือว่าไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายเพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าหลัก ๆ จะอยู่ในอาคารส่วนแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวนั้นถือว่าค่าของ safety criteria รองรับไว้ค่อนข้างมากแล้วจึงมีความปลอดภัยโดยการออกแบบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE-Std. 80-2013

7. แนวทางการประยุกต์ใช้ใน กฟน.

เนื่องจากคุณลักษณะของดินในพื้นที่บริการจะมีความแตกต่างทางกายภาพไม่มากนักจึงใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้ ในงานวิจัยนี้ดินถูกวิเคราะห์ให้เป็นดิน 2 ชั้น โดยดินชั้นบนมีความต้านทานจำเพาะมากกว่าดินชั้นล่าง แต่ถ้าจะนำไปใช้กับพื้นที่อื่น ๆ ที่ดินมีคุณลักษณะแตกต่างไปจากนี้ การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องวัดค่าให้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดเพื่อนำไปสู่การคำนวณหากฎเกณฑ์ความปลอดภัยและใช้ออกแบบระบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้า

และงานวิจัยต่อไปจะทำการศึกษากรณีการเพิ่มขนาดของเมชให้มีขนาดใหญ่ขึ้นรวมทั้งการลดขนาดตัวนำของเมชและแท่งหลักดินให้เล็กลงโดยยังมีความปลอดภัยเป็นไปตามมาตรฐานและประหยัดต้นทุนของการก่อสร้างและติดตั้งระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ การไฟฟ้านครหลวงที่สนับสนุนข้อมูลบทความ

เอกสารอ้างอิง

[1] Thasananutariya, T., Spuntupong, K. and Chatratana, S. “Design of Grounding System for Gis Substation.” Proceeding of IEEE Region 10 Conference (TENCON). Chiang Mai, 2004 : 413-416.

[2] Irwin, T. and Lopez-Roldan, L. “Substation Earthling : Special Consideration for GIS substation, IEE Seminar on Published, 2000 : pp.5/1-5/5.

[3] IEEE Std. 80-2013. Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2013.

[4] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง จุฬาลงกรณ์. โครงการวิจัยรูปแบบกราวด์กริดในสถานีไฟฟ้าและการต่อลงดินระบบจำหน่ายแรงสูงและแรงต่ำของ กฟภ. จุฬาลงกรณ์, 2548

[5] Mcdonald, J. D. “Electric Power Substations Engineering.” New York : CRL Press LLC, 2003.



ภัททิยา พยอมหอม ศึกษาอยู่ระดับ ปวช. สาขาไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์โรงเรียนเตรียมวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. มีความสนใจด้านระบบการต่อลงดินของสถานีไฟฟ้า และการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง



อรรถ พยอมหอม ปริญญาเอกวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มจพ. ทำงานที่ กฟน.มีประสบการณ์ก่อสร้างสถานีไฟฟ้าใต้ดินและการพิจารณาจ่ายไฟแรงสูงให้โครงการ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวที่เหมาะสมสำหรับการประจุแบตเตอรี่แบบแฟลชรถโดยสารสาธารณะไฟฟ้าในระบบจำหน่ายปฐมภูมิ

Optimal Distributed Generators for Flash Charging Battery of Public E-Bus in Primary Radial Distribution System

กิตติวงศ์ สุธรรมโน[1] นพณัฐ จิตกรียาน[1] ชวลิต ทองดี[1] ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง[1] สมศักดิ์ วัชระคุปต์[1]
วุฒิชัย สง่างาม[1] ธงชัย คล้ายคลึง[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] ยุทธณา คงจีน[1,*] และ กาณฑ์ เกิดชื่น[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail: yuttana.ko@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ต้องการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบการประจุแบบแฟลชที่สถานี จำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่และการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ในรถรถโดยสารไฟฟ้า ระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 33 bus ถูกนำมาใช้ในการศึกษา เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมหมาป่าสีเทาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของแหล่งกำเนิดพลังงานแบบกระจายตัวในสองกรณีศึกษา ผลการศึกษาพบว่าการประจุแบบแฟลชส่งผลกระทบอย่างมากต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียและระดับแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัว 1 เครื่องสามารถยกระดับแรงดันและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบลงได้แต่น้อยกว่าในการศึกษาในกรณีที่สอง ที่มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดจำนวน 3 เครื่อง ติดตั้งที่บัส No.28, No.11 และ No.24 ขนาดพิกัด 1.99 MW, 1.06 MW, 0.52 MW ตามลำดับ สามารถยกระดับแรงดันโหลดด้วยค่า LVDI ที่ 90.23% และปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ถึง 72.80% ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ในกรณีระบบมีการติดตั้ง การประจุแบบแฟลชสำหรับ E-bus สามารถเพิ่มความมีเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลังได้

คำสำคัญ: การประจุแบบแฟลช การไหลกำลังไฟฟ้า รถโดยสารไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากำลัง

Abstract

This study investigates the impact of flash charging systems at charging stations by simulating the movement behavior and battery energy consumption of electric bus. The IEEE 33-bus distribution test system is utilized as a simulation model. To determine the optimal placement of distributed generators (DGs), the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm is applied across two case studies. The results reveal that flash charging significantly affects power losses and voltage levels in the network. Installing a single DG helps improve voltage profiles and reduce power losses, although the improvements are less pronounced compared to the second case, where three DGs are installed at bus No. 28, 11, and 24, with rated capacities of 1.99 MW, 1.06 MW, and 0.52 MW, respectively. This configuration improves the Load Voltage Deviation Index (LVDI) to 90.23% and reduces power losses by up to 72.80%. Therefore, optimal DG placement in power systems with flash-charging E-buses can significantly enhance power system stability and efficiency.

Keywords: flash charging, power flow, electric bus, power system

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิมในอดีตอย่างมาก ทั้งปัจจัยการขยายตัวทางเศษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของการประกาศ การพัฒนาเทคโนโลยีในหลายด้านแบบก้าวกระโดด การใช้พลังงานสะอาดในระบบขนส่งสาธารณะเป็นทางเลือกที่ดีในการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น การใช้รถโดยสารไฟฟ้าสาธารณะก็เป็นอีกทางเลือกที่ดี การศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องชี้ให้เห็นว่า การชาร์จรถโดยสารไฟฟ้า (E-bus) แบบไม่เต็มพิกัดสามารถช่วยยืดอายุแบตเตอรี่ได้มากกว่าการชาร์จแบบรวดเร็ว [1] ขณะที่การใช้งานเครื่องอัดประจุแบบ 12 พัลส์ช่วยลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบได้ตามมาตรฐาน IEEE 519 [2] ทั้งนี้ การวางแผนระบบจำหน่ายในอนาคตจึงควรพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานสำหรับ EVs และตำแหน่งสถานีชาร์จอย่างเหมาะสม [3-4]

จากการศึกษาวรรณกรรมพบแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบจำหน่ายไฟฟ้า อาทิ การบูรณาการสมาร์ทกริดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [5] การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน EVs [6] การเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบเพื่อรองรับพลังงานหมุนเวียน [7] อย่างไรก็ตาม ยังพบช่องว่างการวิจัย

ด้านแบบจำลองบูรณาการกับระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า พร้อมรองรับการขยายตัวในอนาคตได้อย่างเหมาะสม

2. การไหลกำลังไฟฟ้าและแบบจำลองระบบที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลกำลังไฟฟ้า

การไหลกำลังไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \quad (2)$$

เมื่อ P_i คือ กำลังงานจริง V_i, V_j คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส และ j ตามลำดับ θ_{ij} คือมุมเฟสต่างระหว่างบัส i และ G_{ij} คือค่าการนำ (Conductance) ระหว่างบัส i และ j B_{ij} คือ ค่าความไวไฟฟ้า (Susceptance) ระหว่างบัส i และ j n คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบ Q_i คือ กำลังรีแอคทีฟ

2.2 กำลังไฟฟ้าสูญเสีย

การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เกิดจากสายส่งระหว่างบัส โดยพิจารณาผลรวมทั้งระบบไฟฟ้าดังสมการที่ (5)

$$P_{loss} = \sum_{(i,j)\in\mathcal{L}} g_{ij} \left(V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos\theta_{ij}\right) \quad (5)$$

เมื่อ g_{ij} คือ ความนำสายส่งระหว่างบัส i และ j V_i, V_j คือค่าแรงดันไฟฟ้าบัสที่ i และ j θ_{ij} คือความต่างเฟสระหว่างแรงดันบัสที่ i และ j

2.3 ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าโหลด (Load Voltage Deviation Index, LVDI)

ค่า LVDI คือค่าที่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่เบี่ยงเบนจากค่าแรงดันมาตรฐานอ้างอิงของระบบดังสมการที่ (6)

$$LVDI = \sum_{i=1}^{N_B} \left| V_i - V_{ref} \right| \quad (6)$$

เมื่อ N_B คือ จำนวนบัสทั้งหมดในระบบ V_i คือแรงดันไฟฟ้าที่บัสที่ i V_{ref} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน

2.4 แบบจำลองเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัว

การศึกษานี้ใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดกระจายตัวในโหมดควบคุมตัวประกอบกำลัง (PF Control) ดังสมการที่ (7,8)

$$S_{DG,i} = P_{DG,i} + jQ_{DG,i} \quad (7)$$

$$PF_{control} = \cos\phi = \frac{P_{DG}}{\sqrt{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2}} \quad (8)$$

เมื่อ $S_{DG,i}$ คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ DG ที่บัส i $P_{DG,i}$ คือกำลังแอคทีฟที่บัส i $Q_{DG,i}$ กำลังรีแอคทีฟที่บัส i

2.5 แบบจำลองการประจุแบบแฟลช

การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการประจุแบบแฟลชของรถบัส ณ ช่วงเวลาที่ถึงสถานีประจุ กำหนดได้จากสมการที่ (9)

$$P_{FC,i,t} = \begin{cases} P_{FC}^{\max} & if\ b_{i,t} \in Buses_{FC}\ \&\ \tau_{i,t} > 0 \\ 0 & Other \end{cases} \quad (9)$$

โดยที่ $Buses_{FC}$ คือตำแหน่งสถานีประจุแบบแฟลช i, τ คือเวลาในการประจุ, $b_{i,t}$ คือตำแหน่งปัจจุบันของรถ E-bus ที่สถานีประจุที่เวลา t, $P_{FC}^{\max}$ คือกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเครื่องชาร์จประจุ

ระยะเวลาในการประจุ $\left(\tau_{i,t}\right)$ จะเกี่ยวข้องกับระยะทางที่รถ E-bus เคลื่อนที่และตำแหน่งในการเดินทางดังสมการที่ (10)

$$\tau_{i,t} = \begin{cases} \tau_{FC} & \text{Arived,No charge} \\ \tau_{i,t-1} - 1 & \text{During Charge} \\ 0 & \text{Others} \end{cases} \quad (10)$$

สมดุลพลังงานในแบตเตอรี่ $\left(E_{i,t}\right)$ ในรถ E-bus แต่ละคัน (i) ที่เวลา (t) จะเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่และการชาร์จดังสมการที่ (11)

$$E_{i,t} = \begin{cases} E_{i,t-1} - E_{travel} & \text{E-bus moving} \\ E_{i,t-1} + \dfrac{P_{ch,i,t} \cdot \Delta t}{60} & \text{E-bus charging} \\ E_{init} & \text{Start } \left(t = t_{start,i}\right) \end{cases} \quad (11)$$

เมื่อ E_{travel} คือพลังงานที่บริโภคขณะเดินทาง ซึ่งจะไปเกี่ยวข้องกับระดับสถานะแบตเตอรี่ ณ เวลานั้น (State of Charge, SOC)

2.7 เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีการหมาป่าสีเทา

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมหมาป่าสีเทา (Graywolf Optimization, GWO) โดยการเลียนแบบพฤติกรรม การล่าเหยื่อมี 4 กลไกดังนี้ [9]

กลไกที่ 1 โครงสร้างลำดับชั้นในฝูงหมาป่า คือ Alpha (α) : ผู้นำฝูง/ตัวแทนของคำตอบที่ดีที่สุด (Best solution), Beta (β) : รองผู้นำช่วยแนะนำ (Second best), Delta (δ) : อันดับ 3 ติดตามสนับสนุน และ Omega (Ω) : หมาป่าทั่วไปที่เหลือในฝูง เรียนรู้จากสามผู้นำ

กลไกที่ 2 การติดตามเหยื่อ (Encircling the Prey) จำลองการล้อมเหยื่อ คือการปรับตำแหน่งของหมาป่าแต่ละตัว $\left(\vec{X}\right)$ โดยอ้างอิงระยะห่างจากหมาปลาผู้นำดังสมการที่ (12,13)

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_{leader} - \vec{X} \right| \quad (12)$$

$$\vec{X}_{new} = \vec{X}_{leader} - \vec{A} \cdot -\vec{D} \quad (13)$$

เมื่อ $\vec{X}_{leader}$ คือตำแหน่งของ Alpha (α), Beta (β) และ Delta (δ), $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ คือเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ควบคุมระยะการเคลื่อนไหว และ $\vec{D}$ คือระยะห่างจากเหยื่อ

กลไกที่ 3 การปรับเวกเตอร์ควบคุม $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ ใช้ในการสำรวจ (Exploration) และ การเจาะจง (Exploitation) ดังสมการที่ (14)

$$\vec{A} = 2\vec{a}\cdot\vec{r}_1 - \vec{a}, \qquad \vec{C} = 2\cdot\vec{r}_2 \tag{14}$$

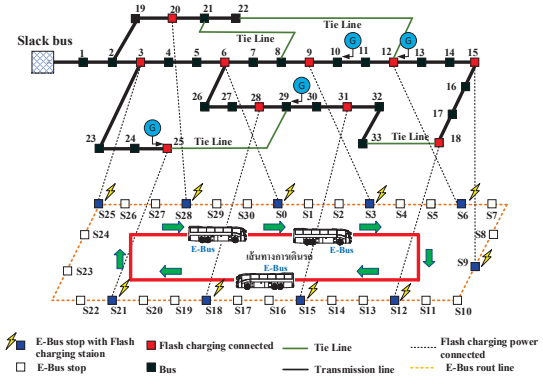
เมื่อ $\vec{r}_1$ และ $\vec{r}_2$ คือการสุ่มค่าระหว่าง 2 ถึง 1 ในขณะที่เวกเตอร์ $\vec{a}$ จะลดค่าลงจาก 2 ถึง 0 ในแต่ละรอบการคำนวณด้วยสูตร $\vec{a} = 2 - (2t / T_{\max})$

กลไกที่ 4 การกำหนดตำแหน่งใหม่ของหมาป่า (Position Update) คือการหาตำแหน่งของหมาป่าทุกตัวจากผู้นำทั้งสามดังสมการที่ (15)

$$\vec{X}_{(t+1)} = \frac{1}{3}\left(\vec{X}_\alpha + \vec{X}_\beta + \vec{X}_\delta\right) \tag{15}$$

3.วิธีการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ปรับปรุงแบบจำลองมาตรฐาน IEEE 33 bus ในการจำลองแฟลชเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ DGs รูปที่ 1



รูปที่ 1 การปรับปรุงระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 33 บัส สำหรับวิเคราะห์การประจุแบบแฟลชสำหรับรถ E-bus

3.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย แบบผสมผสาน ขอบเขตและกรณีศึกษามีดังนี้

$$\min f(x) = w_1 \cdot P_{loss} + w_2 \cdot LVD + P_{penalty} \tag{16}$$

เมื่อ w_1 และ w_2 คือค่าถ่วงน้ำหนัก $P_{penalty}$ คือฟังก์ชันปรับโทษ

เงื่อนไขจำกัด (Equality Constraints) มีดังนี้

1. พิกัดกำลังไฟฟ้าเครื่องกำเนิดอยู่ในขอบเขตพิกัด

$$P_{DG,i}^{\min} \le P_{DG,i} \le P_{DG,i}^{\max} \tag{17}$$

$$Q_{DG,i}^{\min} \le Q_{DG,i} \le Q_{DG,i}^{\max} \tag{18}$$

2. ขนาดแรงดันในแต่ละบัส (i) ในขอบเขตระดับแรงดันอ้างอิง

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max} \tag{19}$$

3. พิกัดสถานะแบตเตอรี่ของ E- bus อยู่ในขอบเขตที่กำหนด

$$SOC_i^{\min} \le SOC_i \le SOC_i^{\max} \tag{20}$$

ฟังก์ชันปรับโทษ (Penalty Function) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_{penalty} = K_P\Big(\sum_{i=1}\Delta V_i \bigcup \sum_{i=1}\Delta SOC_i \bigcup \ldots \sum_{i=1}^{N_B} S_{G,i} - S_{L,i} - S_{FS,i} - S_{Loss}\Big) \tag{21}$$

โดยค่าในวงเล็บมีค่าเท่ากับ 1 ในกรณีแรงดันไม่อยู่ในขอบเขต (ΔV_i), สถานะแบตเตอรี่ไม่อยู่ในขอบเขต (ΔSOC) และไม่สมดุลพลังงาน, K_p คือค่าตัวประกอบการปรับโทษมีค่าเท่ากับ 1,000

3.2 ขั้นตอนในการศึกษาวิจัยมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: เริ่มจากกำหนดขนาดแบตเตอรี่ ระยะทางในการเคลื่อนที่ เครื่องประจุแบบแฟลชเวลาประจุ และ จำนวนรถ

ขั้นตอนที่ 2 : ปรับปรุงระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 33 บัส

ขั้นตอนที่ 3 : ติดตั้งโหลดสถานีประจุแบบแฟลชตามช่วงเวลา ที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 4 : ประยุกต์ใช้ GWO ในการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของ DGs ด้วยฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนด และปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในขั้นตอนที่ 3.3

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณการไหลกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าโหลด

ขั้นตอนที่ 6 : แสดงผลการจำลองขนาดแรงดัน การไหลกำลังไฟฟ้า สถานะแบตเตอรี่ในรถ E- bus เปรียบเทียบ และวิจารณ์ผล

ขั้นตอนที่ 7 : สิ้นสุด

3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

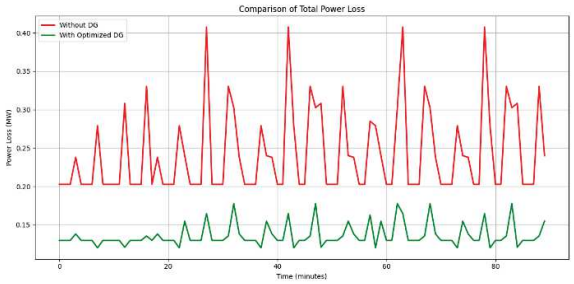
เวลาจำลอง 90 นาที ขนาดแบตเตอรี่ 100 kWh การบริโภคพลังงาน 2 kWh/km ระยะทางระหว่างสถานี 1.5 km เวลาชาร์จ 1 minute ขนาดเครื่องชาร์จ 600 kW ความเร็ว E-bus 40 km/h ตำแหน่งสถานีประจุแบบแฟลชที่บัส 6, 9, 12, 15, 18, 31, 28, 25, 3 และ 20 ตามลำดับ เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม GWO ประกอบไปด้วย จำนวนหมาป่าสีเทา (n_wolves) 50 ตัว จำนวนรอบ (max_iterations) 50 รอบ จำนวนเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัว จำลอง 1 และ 3 เครื่อง ขอบเขตพิกัด [min max] คือ 0.2 ถึง 2.5 MW และ ตำแหน่งติดตั้ง DGs [Bus min Bus max] คือ บัส No.2 ถึง No.33

3.3 กรณีศึกษา

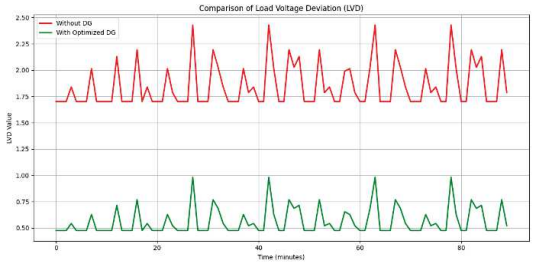
งานวิจัยนี้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณีศึกษา โดยในแต่ละกรณีศึกษาจะมีการเดินรถ E-bus จำนวน 3 คันที่เวลาห่างกัน 15 นาที กรณีศึกษาที่ 1: DG จำนวน 1 สถานี กรณีศึกษาที่ 2: DG จำนวน 3 สถานี

4. ผลการจำลองและวิจารณ์ผลการจำลอง

4.1 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 1 (DGs = 1 เครื่อง)



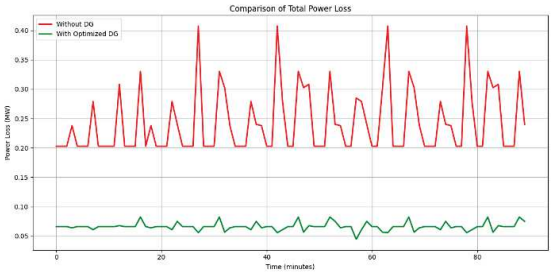
รูปที่ 2 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละช่วงเวลา กรณีศึกษาที่ 1



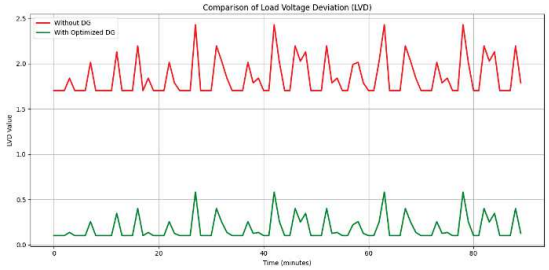
รูปที่ 3 ค่า LVD ในแต่ละช่วงเวลา กรณีศึกษาที่ 1

ผลการจำลองในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่าการติดตั้ง DG สามารถยกระดับแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงได้แต่ทั้งนี้หากพิจารณาโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้ากรณีศึกษานี้ยังไม่ดีพอ

4.2 ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (DGs = 3 เครื่อง)



รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแต่ละช่วงเวลา กรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ 5 ค่า LVD ในแต่ละช่วงเวลา กรณีศึกษาที่ 2

ผลการจำลองในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 พบว่าผลการติดตั้ง DG สามารถยกระดับแรงดันในแต่ละบัส กำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง สามารถปรับปรุงโปรไฟล์แรงดันไฟฟ้าอย่างดีและเหมาะสม

จากตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบเมื่อระบบมีการประจุเร็วแบบแฟลชใน 2 กรณีศึกษาพบว่าทั้งสองกรณีสามารถปรับปรุงคุณภาพของแรงดันและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้จากกรณีที่ 1 ที่ 43.97% และ 69.61% ตามลำดับ ในขณะที่กรณีที่ 2 นั้นมีประสิทธิภาพดีขึ้นทั้งในด้านแรงดันและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ถึง 72.80% และ 90.23%

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการศึกษาการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวในระบบจำหน่ายปฐมภูมิที่มีการติดตั้งการประจุรถ E-bus แบบแฟลชโดยใช้วิธีการ GWO การศึกษาพบว่าการประจุส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างมากทั้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียและค่าระดับแรงดันไฟฟ้า ระบบไฟฟ้าสามารถรองรับการประจุแบบแฟลชได้เมื่อการติดตั้งเครื่องกำเนิดแบบกระจายตัวที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาในกรณีที่ 2 พบตำแหน่งติดตั้งที่บัส No.28, No.11 และ No.24 ขนาดพิกัด 1.99 MW, 1.06 MW, 0.52 MW ตามลำดับ สามารถยกระดับแรงดันโหลดด้วยค่า LVDI ที่ 90.23% และปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้ถึง 72.80% จากการศึกษานี้สามารถนำแนวทางประยุกต์ใช้ในระบบจริงได้ในอนาคตได้

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบสมรรถนะที่เกี่ยวข้อง

รายการ	กรณี 1	กรณี 2
DG_Positions	9	28, 11, 24
DG_Powers_MW	2.39	1.99, 1.06, 0.52
DG_Reactive_Powers_Mvar	0.26	0.20,0.35,0.32
Avg_Power_Loss_Before_DG	0.242	0.242
Avg_Power_Loss_After_DG	0.14	0.07
Loss_Improvement (%)	43.97	72.80
Avg_LVDI_Before_DG	1.84	1.84
Avg_LVDI_After_DG	0.56	0.18
LVDI_Improvement_(%)	69.61	90.23

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ตามสัญญาเลขที่ FET006/2568

เอกสารอ้างอิง

[1] Pour, Amir Abbas Darvish, et al. "Investigating the Effects of Fast Charging and Flash Charging Protocols on Battery Health and Economic Viability in Electric Buses." (2024).

[2] El-Taweel, Nader A., Moataz Mohamed, and Hany E. Farag. "Optimal design of charging stations for electrified transit networks." 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, 2017.

[3] International Energy Agency, "Global EV Outlook 2023," IEA, Paris, 2023.

[4] M. Mohamed, H. Farag, N. El-Taweel, and M. Ferguson, "Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis," Electr. Power Syst. Res., vol. 142, pp. 163-175, 2017.

[5] M. Mahmoud, R. Garnett, M. Ferguson, and P. Kanaroglou, "Electric buses: A review of alternative powertrains," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 62, pp. 673-684, 2016.

[6] S. Y. He, Y.-H. Kuo, and D. Wu, "Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China," Transp. Res. Part C Emerg. Technol., vol. 67, pp. 131-148, 2016.

[7] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 28, no. 1, pp. 102-110, 2013.

[8] Mirjalili, Seyedali, Seyed Mohammad Mirjalili, and Andrew Lewis. "Grey wolf optimizer." Advances in engineering software 69 (2014): 46-61.

Electronics, Circuit and Communications

(EC)

อิเล็กทรอนิกส์ วงจรและสื่อสาร

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

วงจรความต้านทานค่าลบขึ้นกับความถี่แบบใช้อุปกรณ์แอคทีฟเป็นหลัก

Frequency-Dependent Negative Resistance Circuit Employing Only Active Components

นัชนันย์ รุ่งเหมือนฟ้า และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
E-mail: natchanai.ro@kmitl.ac.th, drworapong@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรความต้านทานค่าลบขึ้นกับความถี่ ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากอุปกรณ์แอคทีฟเพียงอย่างเดียว ปราศจากอุปกรณ์พาสซีพจากภายนอก วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 และ LM741 สามารถปรับค่าองค์ประกอบ D ได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการควบคุมกระแสไบอัสจากภายนอก คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอถูกตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานในการสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณแอคทีฟ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการทำงานของวงจรที่มีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ: วงจร FDNR วงจรกรองสัญญาณแอคทีฟ ไอซีสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์

Abstract

This article focuses on designing a frequency-dependent negative resistance (FDNR) circuit solely using active components, eliminating the need for external passive component. The proposed circuit, which utilizes commercially available integrated circuit types LT1228 and LM741, can electrically modify the D-element value by controlling the external bias current. The circuit performance is validated using simulation results obtained from the PSPICE program. Additionally, the implementation of the active filter is emphasized. The simulation results correspond precisely with the theoretical predictions.

Keywords: FDNR circuit, active filter, commercially available integrated circuit

1. บทนำ

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนั้นพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อส่งเสริมปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ให้ดียิ่งๆขึ้น จึงทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กลายเป็นส่วนหนึ่งที่อำนวยความสะดวกในการดำรงค์ชีวิตของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นสำหรับทางภาคอุตสาหกรรมจึงทำการพัฒนาและออกแบบวงจรอิเลิกทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา โดยยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพ โดยภายในอุปกรณ์ดังกล่าวจะมีส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานได้แก่ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ค่อนข้างใหญ่ ทำให้ใช้พื้นที่มากเมื่อนำไปออกแบบวงจรรวม รวมถึงคุณสมบัติที่ไม่สามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นอุปกรณ์แอคทีฟ (active element) จึงถูกนำเสนอขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้งานในหลากหลายวงจร อาทิเช่น วงจรคูณค่าความจุไฟฟ้า (capacitance multiplier circuit) [1] และ วงจรความต้านทานค่าลบขึ้นกับความถี่ (frequency-dependent negative resistance) หรือวงจร FDNR [2] เป็นต้น เพื่อลดพื้นที่ในการออกแบบวงจร และมีคุณสมบัติเด่นที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

วงจร FDNR ถือเป็นหนึ่งในวงจรเลียนแบบที่ถูกสังเคราะห์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานหลากหลาย อาทิเช่น วงจรกรองความถี่ การปรับปรุงค่าตัวประกอบคุณภาพในวงจรรีโซแนนท์ และวงจรกำเนิดสัญญาณ เป็นต้น จากที่กล่าวมาในข้างต้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวงจร FDNR [2] ที่ออกแบบโดยอาศัยอุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีฟเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีโครงสร้างขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองพื้นที่มากเมื่อนำไปออกแบบวงจรรวม กรณีงานวิจัย [3] วงจรที่นำเสนอแม้จะใช้อุปกรณ์แอคทีฟและพาสซีพจำนวนน้อยแต่ก็มีข้อเสียอันเนื่องจากวงจรไม่สามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอวงจร FDNR โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟหลักคือไอซีเบอร์ LT1228 จำนวนหนึ่งตัว ต่อร่วมกับไอซีเบอร์ LM741 จำนวนสองตัว โดยที่ค่าองค์ประกอบ D (D element) ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถปรับค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการแปรค่าอัตราขยายค่าความนำของไอซีเบอร์ LT1228 คุณสมบัติการทำงานของวงจร FDNR ที่นำเสนอถูกแสดงให้เห็นจริงด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยีของบริษัทผู้ผลิตไอซี พร้อมนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ในการออกแบบเป็นวงจรกรองสัญญาณแอคทีฟ (active filter)

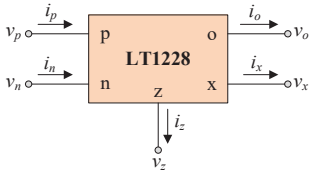
2. ไอซีเบอร์ LT1228

ไอซีเบอร์ LT1228 ถูกผลิตขึ้นโดยบริษัท Linear Technology Corporation [4] มีสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าดังรูปที่ ซึ่งภายในประกอบด้วยวงจร OTA (operational transconductance amplifier) และวงจร CFOA (current feedback operational amplifier) โดยที่มีขั้วอินพุตแบบผลต่างแรงดันระหว่างขั้ว p และขั้ว n (v_p - v_n) กระแสเอาต์พุตที่ขั้ว z (i_z) และแรงดันเอาต์พุตที่ขั้ว o (v_o) สามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_n \\ i_z \\ v_x \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_m & -g_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{OL} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_z \\ i_x \\ i_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยที่ R_{OL} คือค่าส่งผ่านความต้านทานกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transresistance) ซึ่งมีค่าเป็นอนันต์ในทางอุดมคติ และ gm คืออัตราขยายค่าความนำกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal transconductance gain) ของไอซีเบอร์ LT1228 สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการควบคุมกระแสไบอัส (I_B) จากภายนอก ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$g_m = 10I_B \quad (2)$$



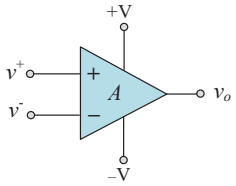
รูปที่ 1 ไอซีเบอร์ LT1228

3. ออปแอมป์

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์แอคทีฟที่มีคุณสมบัติการทำงานแบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled voltage source, VCVS) มีสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าดังรูปที่ 2 เมื่อ v^+ คือแรงดันอินพุตไม่กลับเฟส (non-inverting input voltage) และ v^- คือแรงดันอินพุตกลับเฟส (inverting input voltage) ในขณะที่ +V และ -V คือ แหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุต (v_{in}) กับแรงดันเอาต์พุต (v_o) ของออปแอมป์อธิบายได้ดังนี้

$$v_o = A.\left(v^+ - v^-\right) = A.v_{in} \quad (3)$$

โดยที่ A คือ อัตราขยายแรงดันลูปเปิด (open-loop voltage gain) ของออปแอมป์ มีค่าขึ้นกับความถี่ในการใช้งาน กรณีไม่มีการต่ออุปกรณ์จากภายนอกเข้ากับขั้วต่างๆ จะพบว่าขนาดอัตราขยายแรงดันของออปแอมป์ที่ความถี่ต่ำหรือ $A_0 = |A(j\omega)|$ จะมีค่าสูงมาก สำหรับออปแอมป์เทคโนโลยีแบบไบโพล่าร์มีค่าอัตราขยายอยู่ระหว่างอยู่ที่ $10^8 > A_0 > 10^5$



รูปที่ 2 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของออปแอมป์

ออปแอมป์ในทางปฏิบัติจะถูกออกแบบให้มีตำแหน่งโพลเด่น (dominant pole) อยู่แกนจริงซีกซ้ายบนระนาบเชิงซ้อน s (s-plane) หรือ มีตำแหน่งอยู่ที่ $s = -\omega_a$ ดังนั้นอัตราขยายแรงดันลูปเปิด A(s) ของออปแอมป์เมื่อพิจารณาเทียบกับความถี่ จึงเขียนได้เป็น

$$A(s) = \frac{A_0\omega_a}{s+\omega_a} = \frac{\omega_t}{s+\omega_a} = \frac{B}{s+\omega_a} \quad (4)$$

เมื่อ A_0 คือ อัตราขยายแรงดันลูปเปิดที่ความถี่ต่ำ (open-loop dc gain) ω_a คือ ความถี่ -3dB ของออปแอมป์ และ ω_t คือ ผลคูณระหว่างอัตราขยายแรงดันลูปเปิดที่ความถี่ต่ำกับความถี่ -3dB (gain-bandwidth product, B) หรือเท่ากับ $\omega_t = B = A_0\omega_a$ (rad/s) โดยทั่วไป ω_a มีค่าต่ำมาก เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ $\omega >> \omega_a$ ทำให้ ω_a สามารถละทิ้งได้ สมการ (4) จึงประมาณได้เป็น

$$A(s) \cong \frac{B}{s} \quad (5)$$

กรณีออปแอมป์แบบลูปเปิดนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นวงจรอินทิเกรเตอร์ไม่มีการสูญเสีย (lossless integrator)

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการทำงานของออปแอมป์ในช่วงความถี่สูงแล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากโพลเด่นตัวที่สอง (second dominant pole, ω_b) ของออปแอมป์ ดังนั้นในกรณีนี้อัตราขยายแรงดันลูปเปิด $A(s)$ ดังสมการ (5) จึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$A(s) = \frac{B}{s}\frac{\omega_b}{(s+\omega_b)} = \frac{B}{s\left(1+\frac{s}{\omega_b}\right)} \cong \frac{B}{s}\left(1-\frac{s}{\omega_b}\right) \quad (6)$$

โดยทั่วไป ω_b จะมีค่ามากกว่า B ประมาณ 2.5 ถึง 4 เท่า

4. วงจร FDNR ที่นำเสนอ

วงจร FDNR ที่นำเสนอและวงจรสมมูลทางไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 3 วงจรที่นำเสนอสังเคราะห์ขึ้นจากไอซีเบอร์ LT1228 จำนวนหนึ่งตัว และออปแอมป์จำนวนสองตัวเพียงเท่านั้น ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอคทีฟ

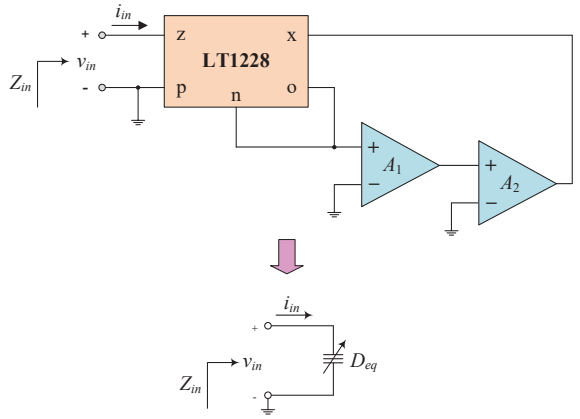
ทั้งหมดโดยปราศจากการใช้อุปกรณ์พาสซีฟ จากการวิเคราะห์วงจร FDNR ที่นำเสนอโดยอาศัยคุณสมบัติพื้นฐานของไอซีเบอร์ LT1228 ในทางอุดมคติดังสมการ (1) พบว่าอิมพีแดนซ์อินพุต (input impedance, Z_{in}) ของวงจร มีค่าเท่ากับ

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{s^2 D_{eq}} = \frac{g_m}{B_1 B_2} \tag{7}$$

เมื่อ

$$D_{eq} = \frac{g_m}{B_1 B_2} \tag{8}$$

สมการ (8) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบ D_{eq} ของวงจรนั้น สามารถแปรค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการควบคุมอัตราขยายค่าความนำ g_m ของไอซีเบอร์ LT1228 และจากคุณสมบัติประจำตัวไอซีเบอร์ LT1228 ซึ่งมีค่ากระแสไบอัสต่ำสุด ($I_{B,min}$) เท่ากับ 1 μA และกระแสไบอัสสูงสุด ($I_{B,max}$) เท่ากับ 1 mA [4] ขณะที่วงจรที่นำเสนอได้เลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ LM741 จากบริษัท Intersil Corporation ที่มีค่า $B_1 = B_2 = 5.65$ Mrad/s [5] ดังนั้นจากสมการ (1) และ (8) จึงพบว่าวงจร FDNR ที่นำเสนอมีค่าองค์ประกอบ D_{eq} อยู่ระหว่าง 3.13 aFs ถึง 3.13 fFs



รูปที่ 3 วงจร FDNR ที่นำเสนอ

5. คุณสมบัติการทำงานของวงจร FDNR ในทางปฏิบัติ

หากพิจารณาคุณสมบัติของไอซี LT1228 ในทางปฏิบัติ (non-ideal) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสดังนี้ [6]

$$i_p = i_n = 0,\ \ i_z = \alpha g_m \left(v_p - v_n\right),\ \ v_x = \beta v_z,\ \ v_o = R_{OL} i_x \tag{9}$$

โดยที่ α คือค่าความเบี่ยงเบนในการส่งผ่านอัตราขยายค่าความนำ (tranconductance tracking error) β คือค่าผิดพลาดในการส่งผ่านแรงดัน (non-ideal voltage gain) ซึ่งในทางอุดมคติ $\alpha = \beta = 1$

เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติของวงจร FDNR ที่นำเสนอ ในกรณี LT1228 และออปแอมป์มีการทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติดังสมการ (9) และ (6) จะทำให้ Z_{in} ของวงจร กลายเป็น

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{s^2 D_{eq}} = \frac{B_1 B_2}{s^2 \left[\beta\alpha g_m \left(1 + \frac{s}{\omega_b}\right)^2\right]} \tag{10}$$

จากสมการข้างต้น เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจาก ω_b ความถี่ปฏิบัติงานของวงจรจึงต้องมีค่าในช่วง $\omega << \omega_b$ และส่งผลให้สมการ (10) มีค่าประมาณ

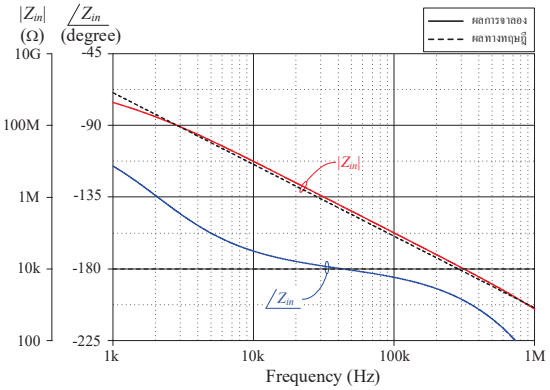
$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{1}{s^2 D_{eq}} = \frac{B_1 B_2}{s^2 \beta\alpha g_m} \tag{11}$$

ในที่นี้จะได้ $D_{eq} = \alpha\beta g_m / B_1 B_2$ ซึ่งจะเห็นว่าตัวแปร α และ β ต่างส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าองค์ประกอบ D_{eq} ของวงจร แต่อย่างไรก็ตามนั้นเราสามารถปรับชดเชยค่าเบี่ยงเบนดังกล่าวได้โดยการแปรค่า g_m ของไอซี LT1228

6. ผลจำลองการทำงานของวงจร FDNR ที่นำเสนอ

การทดสอบผลการทำงานของวงจร FDNR ที่นำเสนอในรูปที่ 3 ถูกนำเสนอผ่านโปรแกรม PSPICE โดยใช้ไอซี LT1228 จากบริษัท Linear Technology Corporation [4] ร่วมกับออปแอมป์เบอร์ LM741 จากบริษัท Intersil Corporation [5] เมื่อกำหนดให้ +V =-V = 5 V ผลการจำลองการทำงานพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของวงจร (total power consumption) มีค่าเท่ากับ 68.1 mW

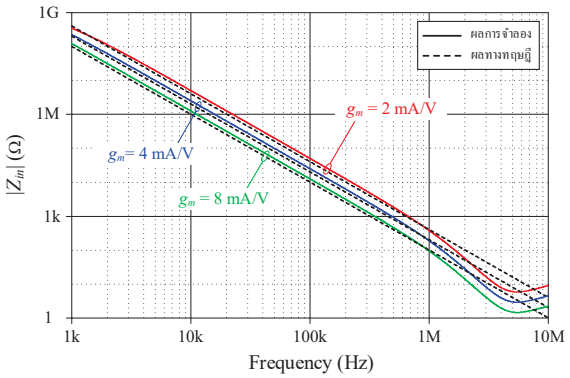
รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร FDNR ที่นำเสนอเมื่อ $v_{in} = 50$ mV, $B = 5.65$ Mrad/s และ $g_m = 1$ mA/V ($I_B = 0.1$ mA) จะได้ $D_{eq} = 31.3$ aFs จากผลการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอจะเห็นว่ามีผลสอดคล้องและเป็นไปตามหลักการทางทฤษฎี



รูปที่ 4 ผลตอบสนองความถี่ของวงจร FDNR ในรูปที่ 3

รูปที่ 5 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ในรูปขนาดเมื่อแปรค่า $g_m = 2$ mA/V, 4 mA/V และ 8 mA/V (หรือ นั่นคือ $I_B = 0.2$ mA, 0.4 mA และ 0.8 mA) ซึ่งจะได้ $D_{eq} = 62.7$ aFs, 0.125 aFs และ 0.251 aFs ตามลำดับ ผล

การจำลองการทำงานของวงจร FDNR ที่นำเสนอแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการปรับแต่งค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกผ่านอัตราขยายค่าความนำของไอซี LT1228 และเมื่อพิจารณาผลตอบสนองของวงจรในช่วงความถี่สูงกว่า 1 MHz จะเห็นว่าผลตอบสนองความถี่ในทางปฏิบัติมีค่าเบี่ยงเบนไปจากผลตอบสนองความถี่ในทางทฤษฎี ทั้งนี้เกิดจากผลกระทบของ ω_b ของออปแอมป์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



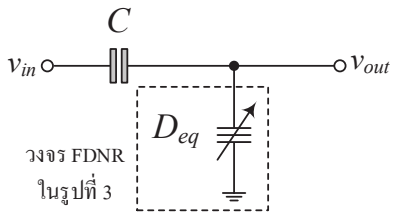
รูปที่ 5 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรที่ในรูปที่ 3 เมื่อแปรค่า g_m

การประยุกต์ใช้งานวงจร FDNR ในรูปที่ 3 ถูกนำไปออกแบบเป็นวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (lowpass filter) ดังรูปที่ 6 เมื่อ $C_{eq} = 20$ pF และ $D_{eq} = 31.3$ aFs โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนแรงดันของวงจร (voltage transfer function) ดังนี้

$$\frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{1}{1+\left(\frac{D_{eq}}{C}\right)s} \qquad (12)$$

โดยที่ ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency, ω_c) ของวงจร เท่ากับ C/D_{eq}

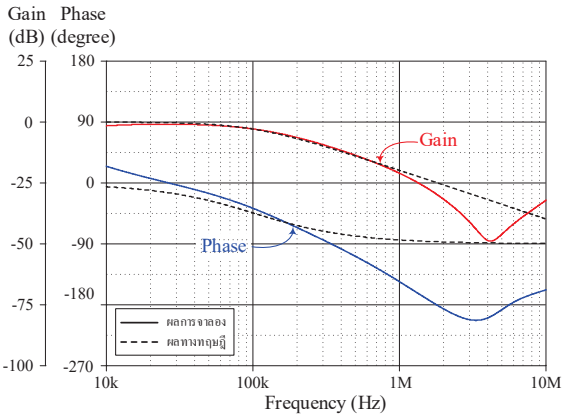
ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรผ่านความถี่ต่ำ แสดงได้ดังรูปที่ 7 โดยที่ $f_c \cong 102.68$ kHz



รูปที่ 6 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำโดยใช้วงจร FDNR ในรูปที่ 3

7. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจร FDNR ที่สังเคราะห์จากไอซีสำเร็จรูปเบอร์ LT1228 จำนวนหนึ่งตัวและ LM741 จำนวนสองตัวเพียงเท่านั้น โดยไม่มีอุปกรณ์พาสซีฟในวงจร ค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่สังเคราะห์ขึ้นออกแบบสามารถแปรค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการปรับแต่งอัตราขยายค่าความนำของไอซี LT1228 ผลการจำลองการทำงานและการประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำถูกตรวจสอบด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันผลการทำงานของวงจรที่นำเสนอซึ่งมีความสอดคล้องกับผลในทางทฤษฎี



รูปที่ 7 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำในรูปที่ 6

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Moonmuang, T. Pukkalanun, and W. Tangsrirat, “Voltage differencing buffered amplifier-based electronically tunable grounded capacitance multiplier,” Proceedings of the 8th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, 2019, pp. 208–211.

[2] M. T. Abuelma’atti and N. A. Tasadduq, “Electronically tunable capacitance multiplier and frequency-dependent negative-resistance simulator using the current-controlled current conveyor,” Microelectronics Journal, vol. 30, no. 9, pp. 869–873, Sep. 1999.

[3] E. Yuce, S. Minaei, and O. Cicekoglu, “Resistorless floating immittance function simulators employing current controlled conveyors and a grounded capacitor,” Electrical Engineering, vol. 88, no. 6, pp. 519–525, Dec. 2005.

[4] Linear Technology, “100MHz current feedback amplifier with DC gain control;” LT1228 datasheet, 1994.

[5] Intersil Corporation, “0.9MHz single and dual, high gain operational amplifiers for military, industrial and commercial applications,” LM741 datasheet, 1998.

[6] N. Roongmuanpha and W. Tangsrirat, “Floating capacitance multiplier realization based on commercially available integrated circuits,” Sādhan ,ฺvol. 47, no. 2, Apr. 2022.

วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์โดยใช้วงจร VDBA

Grounded Parallel RL RC and LC Impedance Simulator Implemented with VDBAs

พิชญานิน มูลเมือง และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 E-mail: pitchayanin.mo@kmitl.ac.th, drworapong@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์โดยใช้วงจร VDBA (voltage differencing buffered amplifier) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร VDBA จำนวนสามตัวต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟจำนวนสองตัวเท่านั้น ซึ่งค่าความต้านทานสมมูล ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลและค่าความจุไฟฟ้าสมมูลสามารถปรับค่าด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการควบคุมกระแสไบอัสจากภายนอก คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอ รวมทั้งการประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองผ่านความถี่สูง (high pass filter) ถูกตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยี CMOS ขนาด 0.18 µm ของบริษัท TSMC

คำสำคัญ: VDBA (Voltage Differencing Buffered Amplifier), วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์, ปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์, วงจรกรองผ่านความถี่สูง

Abstract

This article presents grounded parallel RL RC and LC impedance simulator circuits employing voltage differencing buffered amplifier (VDBA) as an active element. The proposed circuit consists of three VDBAs with two passive elements. The equivalent of resistance, capacitance, and inductance can be modified by electronically tuning through the transconductance gain of the VDBA device, which depends on the external biasing current. The performance validation of the proposed circuits, including the high-pass filter circuit as an application, are proved by simulation results via PSPICE software based on TSMC 0.18-µm CMOS technology.

Keywords: VDBA (Voltage Differencing Buffered Amplifier), impedance simulator, electronically tunable, highpass filter

1. บทนำ

ปัจจุบันอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มีขนาดที่เล็กลง แต่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง ทำให้เทคโนโลยีสำหรับการออกแบบวงจรรวมสำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการในการออกแบบวงจรประมวลผลสัญญาณทางแอนะล็อกประเภทต่างๆให้มีขนาดที่เล็กลง ส่งผลให้อุปกรณ์แอคทีฟ (active device) ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญ โดยเฉพาะคุณสมบัติเด่นของอุปกรณ์แอคทีฟที่มีลักษณะทางกายภาพเล็กทำให้ใช้พื้นที่ในวงจรรวมน้อย รวมถึงมีย่านความถี่ในการปฏิบัติงานสูง เมื่อไม่นานนี้อุปกรณ์แอคทีฟที่มีชื่อว่า วงจร VDBA ได้ถูกนำเสนอขึ้น [1] โดยมีโครงสร้างเรียบง่ายไม่ซับซ้อน ส่งผลให้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น วงจรกรองสัญญาณ (filter circuit) [2] วงจรเลียนแบบตัวเหนี่ยวนำ (inductance simulator) [3] วงจรคูณค่าความจุไฟฟ้า (capacitance multiplier) [4] จากการทบทวนงานวิจัย [5] วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL แบบขนานต่อเทียบกราวด์ที่นำเสนอต้องอาศัยอุปกรณ์แอคทีฟหนึ่งตัวและอุปกรณ์พาสซีฟสามตัวในการสังเคราะห์วงจร ทำให้ใช้พื้นที่มากอีกทั้งวงจรดังกล่าวยังไม่สามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์ ที่สามารถปรับค่าความจุไฟฟ้าสมมูล (equivalent capacitance) ค่าความต้านทานไฟฟ้าสมมูล (equivalent resistance) และค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าสมมูล (equivalent inductance) สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการควบคุมอัตราขยายค่าความนำผ่านการแปรค่ากระแสไบอัสจากภายนอกวงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร VDBA จำนวนสามตัวต่อร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟเพียงสองตัวเท่านั้น คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอถูกวิเคราะห์และตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยี CMOS ขนาด 0.18 µm ของบริษัท TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้งานในการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่สูง (highpass filter)

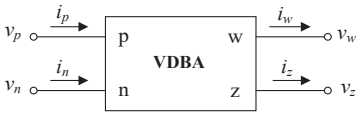
2. วงจร VDBA

2.1 คุณสมบัติการทำงานของวงจร VDBA

สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจร VDBA แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยขั้ว p และขั้ว n ทำหน้าที่เป็นขั้วแรงดันอินพุต ขั้ว z เป็นขั้วกระแสเอาต์พุต และขั้ว w เป็นขั้วแรงดันเอาต์พุต คุณสมบัติการทำงานในทางอุดมคติของวงจร VDBA สามารถเขียนอธิบายได้ดังนี้

$$i_p = i_n = 0, \quad i_z = g_m(v_p - v_n) \quad \text{และ} \quad v_w = v_z \tag{1}$$

โดยที่ g_m คือ อัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain) ของวงจร VDBA ซึ่งทั่วไปสามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการควบคุมกระแสไบอัสจากภายนอก



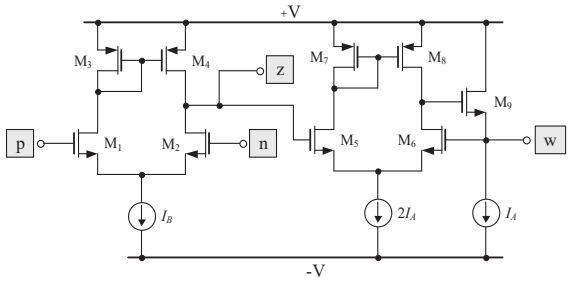
รูปที่ 1 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจร VDBA

2.2 วงจร VDBA แบบใช้เทคโนโลยี CMOS

การสังเคราะห์วงจร VDBA โดยใช้เทคโนโลยีแบบ CMOS มีโครงสร้างภายในแสดงได้ดังรูปที่ 2 [2] ซึ่งประกอบด้วย วงจรขยายค่าความนำ (transconductor circuit, M_1-M_4) และวงจรตามแรงดัน (voltage buffer circuit, M_5-M_9) กรณีนี้อัตราขยายค่าความนำ (g_m) กรณีสัญญาณขนาดเล็กของวงจร เท่ากับ

$$g_m = \sqrt{\mu C_{ox}\left(\frac{W}{L}\right) I_B} \tag{2}$$

เมื่อ I_B คือ กระแสไบอัส μ คือ ค่าความคล่องตัวของพาหะตัวนำ (effective carrier mobility) C_{ox} คือ ค่าความจุไฟฟ้าแผ่งต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (gate oxide capacitance per unit area) W และ L คือ ความกว้างและความยาวประสิทธิผลของช่องนำกระแส (effective channel width and length) ของ M_1 และ M_2 เมื่อพิจารณาสมการ (2) จะเห็นว่าวงจร VDBA ดังรูปที่ 2 นั้นสามารถปรับค่า g_m ได้โดยการควบคุม I_B จากภายนอก



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของวงจร VDBA แบบใช้เทคโนโลยี CMOS

3. วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC ที่นำเสนอ

รูปที่ 3 แสดงวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์ของวงจรที่นำเสนอ เมื่ออาศัยคุณสมบัติของวงจร VDBA ดังสมการ (1) วิเคราะห์วงจรโดยกำหนด Z_A และ Z_B อย่างเหมาะสม จะได้ค่าแอดมิตแตนซ์อินพุต (input admittance, Y_{in}) ของวงจรที่นำเสนอเป็นดังนี้

- เมื่อกำหนดให้ $Z_A = 1/sC_A$ และ $Z_B = R_B$ จะได้วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL แบบขนานต่อเทียบกราวด์ และ

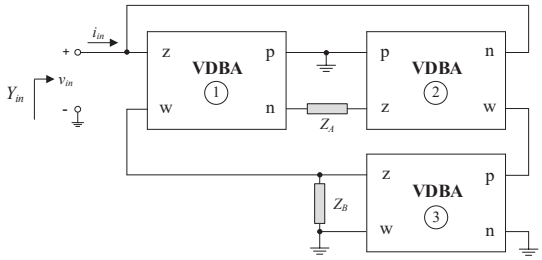
$$Y_{in} = \frac{i_{in}}{v_{in}} = \frac{1}{R_{eq1}} + \frac{1}{sL_{eq1}} = \frac{g_{m1}}{g_{m3}R_B} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC_A} \tag{3}$$

- เมื่อกำหนดให้ $Z_A = R_A$ และ $Z_B = 1/sC_B$ จะได้วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RC แบบขนานต่อเทียบกราวด์ และ

$$Y_{in} = \frac{1}{R_{eq2}} + sC_{eq2} = g_{m1}g_{m2}R_A + \frac{g_{m1}sC_B}{g_{m3}} \tag{4}$$

- เมื่อกำหนดให้ $Z_A = 1/sC_A$ และ $Z_B = 1/sC_B$ จะได้วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์ และ

$$Y_{in} = \frac{1}{sL_{eq3}} + sC_{eq3} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{sC_A} + \frac{g_{m1}sC_B}{g_{m3}} \tag{5}$$



รูปที่ 3 วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC ที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานสมมูล (R_{eqi}) ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล (C_{eqi}) และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล (L_{eqi}) เมื่อ i = 1, 2, 3 ที่สังเคราะห์ได้จากวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3

คุณสมบัติของวงจร VDBA กรณีไม่เป็นไปตามอุดมคติ (non-ideal) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสดังนี้

$$i_p = i_n = 0, \quad i_z = \alpha g_m(v_p - v_n) \quad \text{และ} \quad v_w = \beta v_z \tag{6}$$

เมื่อ α คือ ค่าความเบี่ยงเบนการส่งผ่านอัตราขยายค่าความนำ (tranconductance tracking error) และ β คือ อัตราขยายแรงดันกรณีไม่เป็นไปตามอุดมคติ (non-ideal voltage gain) ของวงจรVDBA ดังนั้นพิจารณาคุณสมบัติการทำงานของวงจรในรูปที่ 3 โดยคำนึงถึงผลจากการ

ทำงานไม่เป็นไปตามอุดมคติของวงจร VDBA ดังสมการ (6) จะทำให้ Y_{in} ของวงจร กลายเป็น

- กรณีวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL จะได้

$$Y'_{in} = \frac{1}{R'_{eq1}} + \frac{1}{sL'_{eq1}} = \frac{\alpha_1\beta_1 g_{m1}}{\alpha_3\beta_2 g_{m3} R_B} + \frac{\alpha_1\alpha_2 g_{m1} g_{m2}}{sC_A} \quad (7)$$

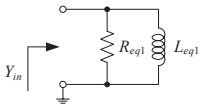
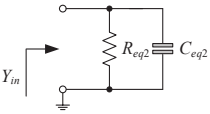
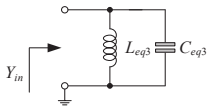
- กรณีวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RC จะได้

$$Y'_{in} = \frac{1}{R'_{eq2}} + sC'_{eq2} = \alpha_1\alpha_2 g_{m1} g_{m2} R_A + \frac{\alpha_1\beta_1 g_{m1} sC_B}{\alpha_3\beta_2 g_{m3}} \quad (8)$$

- กรณีวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC จะได้

$$Y'_{in} = \frac{1}{sL'_{eq3}} + sC'_{eq3} = \frac{\alpha_1\alpha_2 g_{m1} g_{m2}}{sC_A} + \frac{\alpha_1\beta_1 g_{m1} sC_B}{\alpha_3\beta_2 g_{m3}} \quad (9)$$

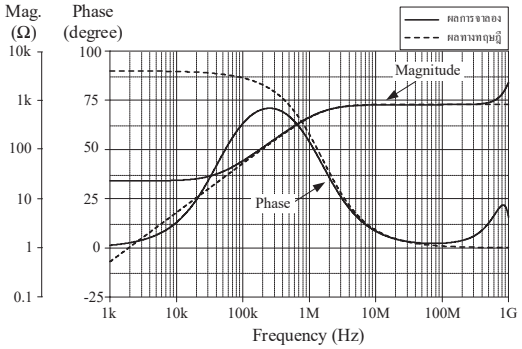
ตารางที่ 1 รายละเอียดวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและค่าอุปกรณ์สมมูลที่ได้

วงจรสมมูลทางไฟฟ้า	ค่าอุปกรณ์สมมูล
วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL 	$R_{eq1} = \frac{g_{m3} R_B}{g_{m1}}$ $L_{eq1} = \frac{C_A}{g_{m1} g_{m2}}$
วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RC 	$R_{eq2} = \frac{1}{g_{m1} g_{m2} R_A}$ $C_{eq2} = \frac{g_{m3} C_B}{g_{m1}}$
วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC 	$L_{eq3} = \frac{C_A}{g_{m1} g_{m2}}$ $C_{eq3} = \frac{g_{m1} C_B}{g_{m3}}$

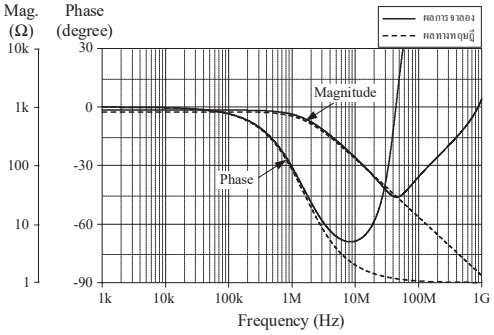
4. ผลการจำลองการทำงานของวงจร

คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3 นั้น จะถูกตรวจสอบด้วยผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยี CMOS ขนาด 0.18-μm ของบริษัท TSMC และใช้วงจร VDBA ดังรูปที่ 2 ในการจำลองโดยกำหนดอัตราส่วน W/L (μm/μm) เป็นดังนี้ M_1-M_2, M_5-M_6 และ M_9 เท่ากับ 2.4/0.18 M_3 และ M_7 เท่ากับ 5/0.18 M_4 และ M_8 เท่ากับ 7.5/0.18 โดยที่ I_A = 50 µA และ +V =-V = 0.75 V ผลการจำลองพบว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด (total power consumption) ของวงจรมีค่าประมาณ 0.61 mW

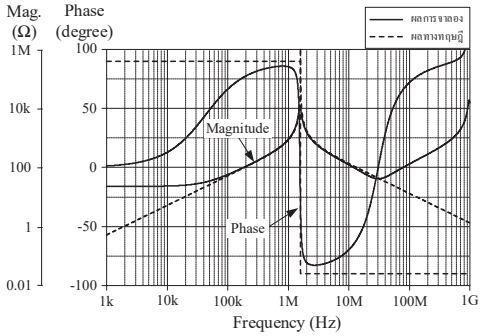
รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ที่นำเสนอในรูปที่ 3 เมื่อ v_{in} = 50 mV (peak), I_{B1} = 320 µA (g_{m1} ≅ 1.21 mA/V) และ $I_{B2} = I_{B3}$ = 220 µA ($g_{m2} = g_{m3}$ ≅ 1 mA/V) รูปที่ 4(ก) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร เมื่อกำหนดให้ C_A = 100 pF และ R_B = 1 kΩ กรณีนี้วงจรที่นำเสนอจะมีคุณสมบัติเป็นค่าอิมพีแดนซ์ RL ขนานเทียบกราวด์ โดยมีค่า R_{eq1} = 828.50 Ω และ L_{eq1} = 82.9 µH รูปที่ 4(ข) แสดงผลตอบสนองทางความถี่แสดงได้ดัง เมื่อ R_A = 1 kΩ และ C_B = 100 pF กรณีนี้วงจรที่นำเสนอจะมีคุณสมบัติเป็นค่าอิมพีแดนซ์ RC ขนานเทียบกราวด์ โดยที่ R_{eq2} = 828.50 Ω และ C_{eq2} = 120 pF ส่วนรูปที่ 4(ค) แสดงผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร เลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC ขนานเทียบกราวด์ เมื่อ $C_A = C_B$ = 100 pF โดยที่ L_{eq3} = 82.9 µH และ C_{eq3} = 120 pF



(ก) กรณี RL



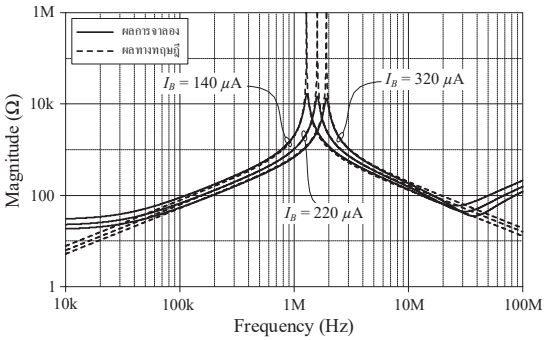
(ข) กรณี RC



(ค) กรณี LC

รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3

รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ในรูปขนาดของ Z_{in} ของวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC ขนานเทียบกราวด์ในรูปที่ 3 เมื่อแปรค่า $I_B = I_{B2} = I_{B3}$ สามค่าได้แก่ 140 μA ($g_m \cong 0.8$ mA/V), 220 μA ($g_m \cong 1$ mA/V) และ 320 μA ($g_m \cong 1.2$ mA/V) ซึ่งทำให้ L_{eq3} มีค่าเท่ากับ 124 μH, 100 μH และ 83 μH ตามลำดับ ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ C_{eq3} แปรค่าไปเป็น 124 pF, 100 pF และ 83 pF เช่นกัน

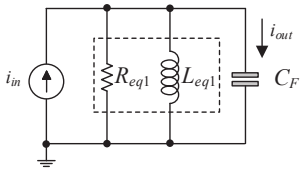


รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางความถี่ของ $|Z_{in}|$ ของวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ LC ในรูปที่ 3 เมื่อแปรค่า I_B

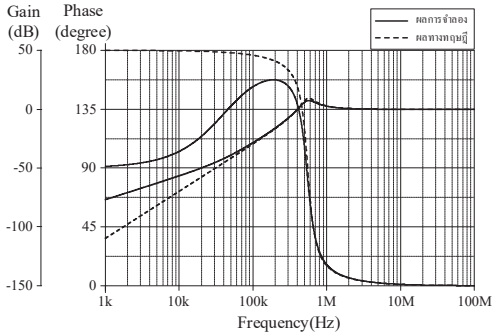
5. การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานของวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL ขนานต่อเทียบกราวด์ของวงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3 ถูกนำไปออกแบบเป็นวงจรกรองผ่านความถี่สูงดังรูปที่ 6 เมื่อกำหนดให้ $v_{in} = 50$ mV (peak) และ $C_F = 1$ nF โดยที่ $R_{eq1} = 828.50\ \Omega$ และ $L_{eq1} = 82.9$ μH พบว่าความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ของวงจร เท่ากับ $\omega_c = 2\pi f_c = 1/L_{eq1}C_F$ หรือ $f_c \cong 553$ kHz ซึ่งผลการจำลองผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่สูงแสดงได้ดังรูปที่ 7

วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL
ขนานเทียบกราวด์ในรูปที่ 3



รูปที่ 6 วงจรกรองผ่านความถี่สูงโดยใช้วงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL แบบขนานในรูปที่ 3



รูปที่ 7 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่สูง

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรเลียนแบบค่าอิมพีแดนซ์ RL RC และ LC แบบขนานต่อเทียบกราวด์ที่ออกแบบด้วยวงจร VDBA จำนวนสามตัว ร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟเพียงสองตัวเท่านั้น โดยสามารถปรับค่าความต้านทานสมมูล ค่าความจุไฟฟ้าสมมูล และค่าความเหนี่ยวนำสมมูล ด้วยการแปรค่ากระแสไบอัส คุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในวงจรกรองผ่านความถี่สูง จำลองผลการทำงานปรากฏผลสอดคล้องและใกล้เคียงกับหลักการทางทฤษฎี

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Biolek, R. Senani, V. Biolkova and Z. Kolka, "Active elements for analog signal processing : Classification, review, and new proposals," *Radioengineering*, vol. 17, no. 4, pp. 15-32, 2008.

[2] N. Roongmuanpha, M. Faseehuddin, N. Herencsar, and W. Tangsrirat, " Tunable mixed-mode voltage differencing buffered amplifier-based universal filter with independently high-*Q* factor controllability," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 20, p. 9606, 2021.

[3] A. Yesil and F. Kacar, "VDBA-based lossless and lossy inductance simulators and its filter applications," *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 2016, pp. 909-912, doi: 10.1109/SIU.2016.7495888.

[4] P. Moonmuang, T. Pukkalanun and W. Tangsrirat, "VDBA-based electronically tunable capacitance multiplier with a grounded capacitor," *2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2018, pp. 485-488, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8619899.

[5] F. Kaçar, and A. YeŞil, "Novel grounded parallel inductance simulators realization using a minimum number of active and passive components," *Microelectronics Journal*, vol. 41, pp. 632-638, 2010.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์สองโหมดปราศจากตัวต้านทานพาสซีฟสังเคราะห์ด้วยวงจร VDGA

Resistorless Dual-Mode Quadrature Oscillator Implemented with VDGAs

จิรพันธ์ พิมพล[1] อรพิน ชาญนำสิน[1] ทัตยา ปุคคละนันทน์[2] และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์[2*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

E-mail: jirapun.pi@rmuti.ac.th, orapin.ch@rmuti.ac.th

[2]ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

E-mail: tattaya.pu@kmitl.ac.th, drworapong@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ที่ปราศจากตัวต้านทานจากภายนอก ซึ่งประกอบด้วยวงจร VDGA (voltage differencing gain amplifier) จำนวนสองตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุเทียบกราวด์จำนวนสองตัว สามารถกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ได้สองโหมด คือ โหมดแรงดัน และโหมดกระแส เงื่อนไขการออสซิลเลตและความถี่ในการออสซิลเลตของวงจรที่นำเสนอสามารถควบคุมได้อย่างอิสระไม่ส่งผลกระทบต่อกันด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ โดยการปรับอัตราขยายความนำ (g_m) ของวงจร ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการทำงานของวงจรที่นำเสนอว่าสอดคล้องตามหลักการทางทฤษฎี โดยมุมต่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตควอดราเจอร์ทั้งสองโหมดมีความผิดพลาดไม่เกิน 4.67 %

คำสำคัญ: วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์, อุปกรณ์แอคทีฟ, วงจรสองโหมด

Abstract

This article introduces the synthesis of a quadrature oscillator circuit free from external resistors. The proposed oscillator circuit consists of two voltage differencing gain amplifiers (VDGAs) connected with two grounded capacitors and is capable of producing quadrature sinusoidal signals in both voltage and current modes. The oscillation condition and frequency can be electronically and orthogonally varied by modifying the VDGA transconductance gains. The simulation results of the oscillator circuit agree with theoretical expectations, as indicated by the phase difference errors of both quadrature output waveforms, which do not exceed 4.67%.

Keywords: quadrature oscillator, voltage differencing gain amplifier (VDGA), dual-mode circuit, resistorless circuit

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

1. บทนำ

ในหลายปีที่ผ่านมาวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ถือว่าเป็นวงจรพื้นฐานที่มีบทบาทเป็นอย่างมาก โดยนิยมนำมาใช้ในส่วนต่างๆ ของการควบคุมเครื่องมือวัด ระบบการสื่อสาร และวงจรประมวลผลสัญญาณ กล่าวคือวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์นั้นเป็นวงจรที่ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณไซน์สองเอาต์พุตที่มีเฟสต่างกัน 90° เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ที่มีความหลากหลายขึ้นโดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟแนวใหม่ประเภทต่างๆ ที่สามารถปรับค่าด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [1], [2], [5] จากการทบทวนบทความที่นำเสนอในช่วงที่ผ่านมาพบว่าวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ [1]-[6] ยังคงใช้ตัวต้านทานพาสซีฟจากภายนอกสำหรับการสังเคราะห์วงจร อีกทั้งในการสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์ของบทความเหล่านี้ [3]-[4] ยังคงใช้อุปกรณ์แอคทีฟต่อแบบลอยตัว จึงยังไม่เหมาะสมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม (integrated circuit; IC) ถึงแม้ว่าในบางวงจรที่นำเสนอใช้อุปกรณ์แอคทีฟน้อยกว่าสามตัว [1], [3]-[4] อย่างไรก็ตามวงจรดังกล่าวเหล่านั้นประกอบด้วยตัวต้านทานพาสซีฟจากภายนอก นอกจากนี้วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอ [1]-[6] สามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ได้เพียงโหมดแรงดันหรือโหมดกระแส โหมดใดโหมดหนึ่งเท่านั้น รวมทั้งเงื่อนไขในการออสซิลเลตของวงจรยังคงส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ในการออสซิลเลตอีกด้วย

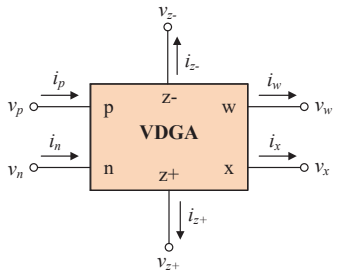
ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ที่ปราศจากตัวต้านทานพาสซีฟจากภายนอก โดยใช้วงจร VDGA (voltage differencing gain amplifier) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟหลัก ซึ่งสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ได้ทั้งโหมดแรงดันและโหมดกระแสพร้อมกัน นอกจากนี้สัญญาณเอาต์พุตของทั้งสองโหมดยังมีมุมเฟสต่างกัน 90° วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอยังสามารถปรับค่าคุณลักษณะเงื่อนไขและความถี่ในการออสซิลเลตได้อย่างอิสระต่อกันด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์จากอัตราขยายค่าความนำของวงจร VDGA ผลการจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอโดยใช้เทคโนโลยี CMOS พบว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎี

2. คุณสมบัติการทำงานของวงจร VDGA

วงจร VDGA เป็นอุปกรณ์แอคทีฟชนิดหนึ่งที่มีสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยขั้ว p และ n เป็นขั้วผลต่างของแรงดันอินพุต ขั้ว z+ z- x และขั้ว w เป็นขั้วกระแสเอาต์พุต อีกทั้งวงจร VDGA ยังมีค่าอิมพิแดนซ์สูงในทุกขั้ว สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสได้ดังนี้ [7]

$$\begin{bmatrix} i_{z+} \\ i_{z-} \\ i_x \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{mA} & -g_{mA} & 0 & 0 \\ -g_{mA} & g_{mA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_{mB} & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_{z+} \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ g_{mA} และ g_{mB} คือ อัตราขยายค่าความนำ (transconductance gain) และ β คือ อัตราขยายแรงดัน (voltage gain) ของวงจร VDGA



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของวงจร VDGA

โครงสร้างภายในของวงจร VDGA แบบใช้เทคโนโลยี CMOS แสดงได้ดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าประกอบด้วยวงจรขยายค่าความนำ (transconductance amplifier) จำนวนสามวงจร คือ ทรานซิสเตอร์ M_{1k}-M_{9k} เมื่อ $k = A, B, C$ ซึ่งพบว่าอัตราขยายค่าความนำ g_{mk} ของวงจร เท่ากับ

$$g_{mk} = \left(\frac{g_{m1k}g_{m2k}}{g_{m1k}+g_{m2k}}\right) + \left(\frac{g_{m3k}g_{m4k}}{g_{m3k}+g_{m4k}}\right) \quad (2)$$

และ

$$g_{mik} = \sqrt{\mu C_{ox}(W_i/L_i)I_{Bk}} \quad (3)$$

เมื่อ I_{Bk} คือ กระแสไบอัส μ คือ ค่าความคล่องตัวของพาหะในช่องนำกระแส C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ W_i และ L_i คือ ความกว้างและความยาวของช่องนำกระแส (channel width and length) ของมอสทรานซิสเตอร์ ตามลำดับ ความสัมพันธ์ในสมการ (2) และ (3) แสดงให้เห็นว่า อัตราขยายค่าความนำ g_{mk} ของวงจร VDGA นั้น สามารถแปรค่าได้ด้วยการควบคุมผ่านกระแสไบอัส I_{Bk} จากภายนอก

ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ M_{1B}-M_{4B} และ M_{1C}-M_{4C} จะทำหน้าที่เป็นวงจรขยายแรงดันควบคุมด้วยกระแส โดยมีอัตราขยาย β เท่ากับ

$$\beta = \frac{v_w}{v_z} = \frac{g_{mB}}{g_{mC}} \quad (4)$$

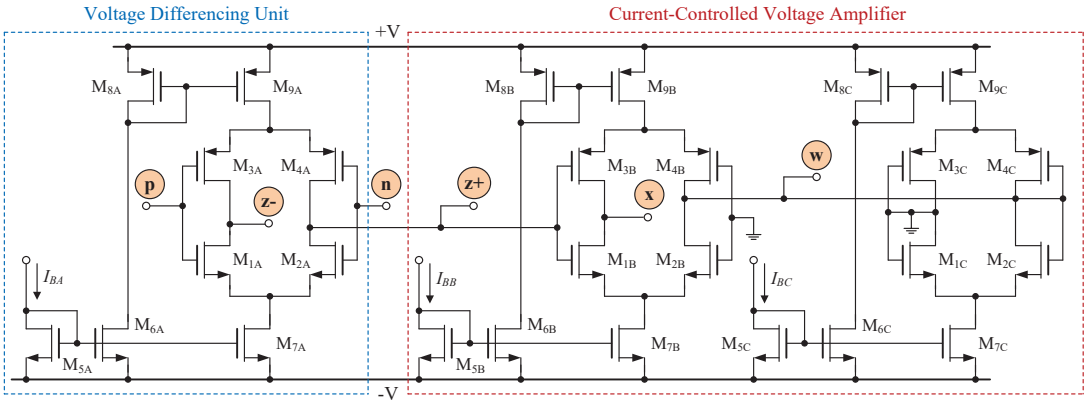
สมการ (4) อัตราขยายแรงดัน (β) สามารถปรับด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ได้จากกระแสไบแอส I_{BB} และ I_{BC}

3. วงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์แบบสองโหมดที่นำเสนอ

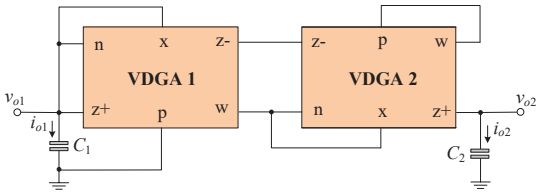
รูปที่ 3 แสดงวงจรออสซิลเลเตอร์ควอดราเจอร์แบบสองโหมด โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจร VDGA จำนวนสองตัวต่อร่วมกับตัวเก็บประจุเทียบกราวด์จำนวนสองตัว ปราศจากการใช้ตัวต้านทานในกสรออกแบบวงจร การวิเคราะห์วงจรสามารถแสดงสมการคุณลักษณะของวงจรได้ดังนี้

$$s^2 + \left(g_{mB1} - \beta_1 g_{mA2}\right)\left(\frac{1}{C_1}\right)s + \left(\frac{\beta_2 g_{mA1} g_{mA2}}{C_1 C_2}\right) = 0 \quad (5)$$

สมการ (5) จะได้เงื่อนไขในการออสซิลเลต (oscillation condition, OC) และความถี่ในการออสซิลเลต (oscillation frequency, OF) ของวงจร เป็นดังนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในวงจร VDGA ด้วยเทคโนโลยี CMOS



รูปที่ 3 วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ที่นำเสนอ

OC: $$g_{mA2} = g_{mC1} \quad (6)$$

และ OF: $$\omega_0 = \sqrt{\frac{\beta_2 g_{mA1} g_{mA2}}{C_1 C_2}} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขการออสซิลเลต OC ตามสมการ (6) แล้ว จะพบว่าสามารถแปรค่าความถี่ ω_0 ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากการปรับค่า g_{mA1} และ/หรือ β_2 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ OC

ความสัมพันธ์ของแรงดันควอดราเจอร์เอาต์พุต v_{o1} และ v_{o2} แสดงได้ดังนี้

$$v_{o2} = \left(\frac{g_{mA1}}{sC_2}\right) v_{o1} \quad (8)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถแสดงความสัมพันธ์ของกระแสควอดราเจอร์เอาต์พุต i_{o1} และ i_{o2} ได้ดังนี้

$$i_{o2} = \left(\frac{g_{mA1}}{sC_1}\right) i_{o1} \quad (9)$$

ดังนั้นจากสมการ (8) และ (9) แสดงให้เห็นว่าแรงดันและกระแสควอดราเจอร์เอาต์พุตของวงจรต่างมีมุมต่างเฟสเท่ากับ 90° ซึ่งเป็นคุณสมบัติประการสำคัญของวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์นั่นเอง

4. ผลกระทบจากการทำงานที่ไม่เป็นอุดมคติ

เมื่อพิจารณาผลการส่งผ่านอัตราขยายของวงจร VDGA ในกรณีไม่เป็นอุดมคติ จะพบว่าคุณสมบัติของวงจร VDGA ในกรณีนี้สามารถเขียนอธิบายได้เป็น

$$\begin{bmatrix} i_{z+} \\ i_{z-} \\ i_x \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_A g_{mA} & -\alpha_A g_{mA} & 0 & 0 \\ -\alpha_A g_{mA} & \alpha_A g_{mA} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_B g_{mB} & 0 \\ 0 & 0 & \delta\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_{z+} \\ i_w \end{bmatrix} \quad (10)$$

เมื่อ α_k และ δ คือ อัตราขยายความนำแฝง และอัตราขยายแรงดันแฝงกรณีไม่เป็นอุดมคติ ตามลำดับ ดังนั้นหากคุณสมบัติของวงจร VDGA ดังสมการ (10) แล้ว จะพบว่าเงื่อนไขและความถี่ของการออสซิลเลตในกรณีนี้จะกลายเป็น

OC: $$\alpha_{A2}\delta_1 g_{mA2} = \alpha_{B1} g_{mC1} \quad (11)$$

และ OF: $$\omega_0 = \sqrt{\frac{\alpha_{A1}\alpha_{A2}\delta_2\beta_2 g_{mA1} g_{mA2}}{C_1 C_2}} \quad (12)$$

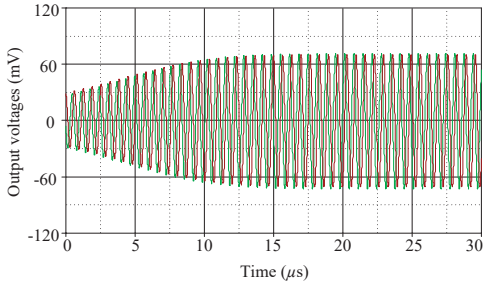
สมการข้างต้นพบว่าเงื่อนไขการออสซิลเลต OC สามารถแปรค่าความถี่ ω_0 ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จากการแปรค่าความนำ g_{mA1} และ/หรือ β_2 โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ OC

5. ผลการจำลองการทำงาน

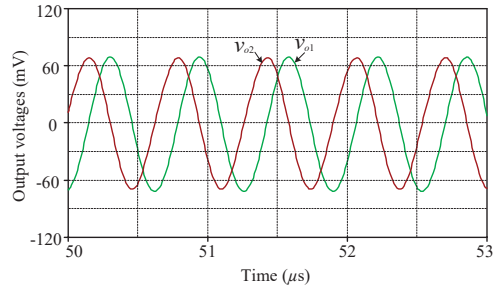
ในหัวข้อนี้ได้จำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอด้วยโปรแกรม PSPICE ภายใต้เทคโนโลยี CMOS 0.25-μm จากบริษัท TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) เมื่อกำหนดอัตราส่วน W/L ของทรานซิสเตอร์เป็นดังตารางที่ 1 และแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมีค่าเท่ากับ +V = -V = 1 V

ตารางที่ 1 อัตราส่วน W/L ของทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 2

ทรานซิสเตอร์	W/L (μm/μm)
M_{1k}-M_{2k}	15/0.25
M_{3k}-M_{4k}	23/0.25
M_{5k}-M_{7k}	4.5/0.25
M_{8k}-M_{9k}	5.5/0.25

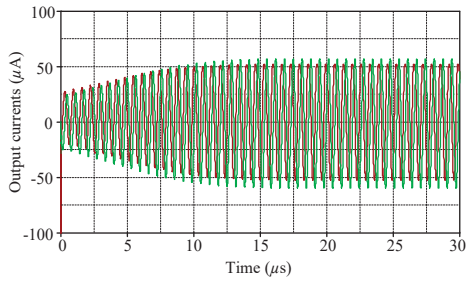


(ก) สภาวะเริ่มต้น

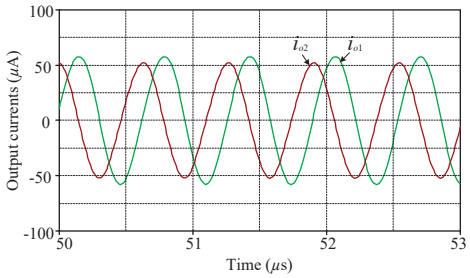


(ข) สภาวะคงตัว

รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางเวลาของแรงดันเอาต์พุต v_{o1} และ v_{o2}



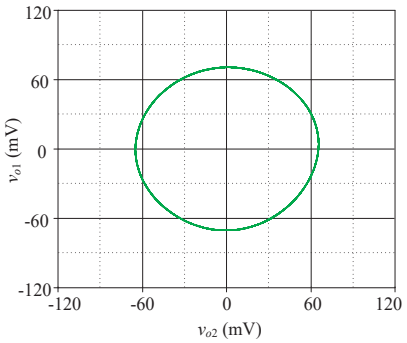
(ก) สภาวะเริ่มต้น



(ข) สภาวะคงตัว

รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางเวลาของกระแสเอาต์พุต i_{o1} และ i_{o2}

การจำลองการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 3 ได้กำหนดให้ $g_{mk} = 1$ mA/V ($I_{Bk} = 100$ μA) และ $C_1 = C_2 = 100$ pF ซึ่งทำให้ได้ $f_0 = \omega_0/2\pi \cong 1.59$ MHz รูปที่ 4 และ 5 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของแรงดันควอดราเจอร์เอาต์พุต และกระแสควอดราเจอร์เอาต์พุตของวงจร ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่ามุมต่างเฟสของแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 92.8° ในขณะที่มุมต่างเฟสของกระแสเอาต์พุตเท่ากับ 94.2° หรือคิดเป็นค่าความผิดพลาดเท่ากับ 3.11 % และ 4.67 % ตามลำดับ โดยที่ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (total harmonic distortion) ของแรงดันเอาต์พุต v_{o1} เท่ากับ 2.63% รูปที่ 6 แสดงแผนภาพ Lissajous ของแรงดันควอดราเจอร์เอาต์พุต สังเกตได้ว่าผลที่ได้มีลักษณะเป็นวงกลม นอกจากนี้วงจรออสซิลเลเตอร์ที่นำเสนอสิ้นเปลืองกำลังงานไฟฟ้ารวมประมาณ 2.84 mW



รูปที่ 6 แผนภาพ Lissajous ของแรงดันควอดราเจอร์เอาต์พุต

6. สรุป

บทความนี้สังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควอดราเจอร์ที่ปราศจากตัวต้านทานจากภายนอก สามารถกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ได้สองโหมด สามารถแปรค่าเงื่อนไขและความถี่ในการออสซิลเลตของวงจรที่นำเสนอได้ด้วยวิธีอิเล็กทรอนิกส์จากการปรับค่าความนำของวงจร นอกจากนี้ยังสามารถแปรค่าความถี่โดยไม่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขการออสซิลเลตของวงจร ผลจำลองการทำงานที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงทฤษฎี ซึ่งเอาต์พุตทั้งสองโหมดเป็นแบบควอเดราเจอร์โดยความต่างเฟสของทั้งสองโหมดพบความผิดพลาดไม่เกิน 4.67 %

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ทุนสนับสนุนตามสัญญาเลขที่ ENG18/65

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Satansup, W. Tangsrirat and W. Surakampontorn, “Voltage differencing gain amplifier-based quadrature oscillator employing passive elements,” *2018 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2018, pp.251-254.

[2] S. Zahiruddin, A. Srinivasulu and M. Sarada, “Dual output sinusoidal oscillator using second generation current controlled conveyor,” *Electronics*, vol.23, no.2, pp.60-66, 2019.

[3] R. Bhagat, D. R. Bhaskar and P. Kumar, “Quadrature sinusoidal oscillators using CDBAs: New realizations,” *Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol.40, pp.2634-2658, 2021.

[4] J. W. Horng, C. M. Wu, S. H. Ku, H. H. Juan, and B. X. Chen, “Quadrature oscillator employing two current conveyors and grounded capacitors,” *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics*, pp.145-146, 2022.

[5] M. K. Jain and A. Singh, “Novel active-C voltage-mode quadrature oscillator realization employing CCCIIs,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol.14, no.4, pp.332-338, 2022.

[6] T. S. Arora and S. Tiwari, “Voltage mode sinusoidal oscillator with non-interacting adjustment of parameters employing VCII,” *International Conference on Computer, Electronics, Electrical Engineering & their Applications (IC2E3)*, 2024.

[7] J. Satansup, W. Tangsrirat, “CMOS realization of voltage differencing gain amplifier (VDGA) and its application to biquad filter,” *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, vol.20, no.6, pp.457-464, 2013.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องอบแห้งแบบพลังงานผสมที่สามารถควบคุมอุณภูมิได้

Mixed Energy Dryer with Temperature Control

จิรพันธ์ พิมพล[1] เมธิน ดลโสภณ[1] อรพิน ชาญนำสิน[1] นัชชนันน์ รุ่งเหมือนฟ้า[2] ทัตยา ปุคคละนันทน์[2*] และ วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์[2]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 4000 E-mail: jirapun.pi@rmuti.ac.th

[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: natchanai.ro@kmitl.ac.th, tattaya.pu@kmitl.ac.th*, drworapong@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องอบแห้งแบบผสมระหว่างพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้ง โครงสร้างของเครื่องอบแห้งเป็นทรงพาราโบลา การควบคุมอุณหภูมิโดย Arduino UNO สั่งงานควบคุมพัดลมและฮีตเตอร์ขนาด 600 วัตต์ ให้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งอยู่ในช่วง 50-60 °C การทดสอบทำปลาตากแห้ง โดยแบ่งการทดสอบวิธีการผลิต 3 รูปแบบ คือ การตากแบบธรรมชาติ การตากโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว และการตากในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ การปลาตากแห้งโดยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ใช้ระยะเวลาในการผลิตน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีจุดคุ้มทุนมากที่สุด

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้ง, พลังงานผสม, ควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

This article presents the development of a hybrid dryer that combines solar thermal energy with heater thermal energy to help increase the temperature during drying. The structure of the dryer is a parabolic shape. Temperature control is managed by an Arduino UNO, which controls a fan and a 600-watt heater to maintain the internal temperature of the dryer between 50-60°C. The testing involved drying fish, with three different production methods: natural drying, drying using only solar energy, and drying using solar energy combined with a heater. The drying method using solar energy combined with a heater required the least production time. However, the solar energy dryer was the most cost-effective.

Keywords: drying machine, mix energy, temperature control

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

1. บทนำ

อาหารเป็นปัจจัยสำคัญในการดรงชีวิตของมนุษย์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การพัฒนารูปแบบของอาหาร กระบวนการผลิต รวมไปถึงวิธีการเก็บรักษาอาหารให้อยู่ได้เป็นเวลานานซึ่งเรียก กระบวนการนี้ว่าการถนอมอาหาร การทำให้แห้งเป็นวิธีการที่นิยมใช้โดยการนำวัตถุดิบมาตากแดดเพื่อให้น้ำระเหยออกจากวัตถุดิบ การตากแดดโดยปกตินั้นอาจจะไม่ถูกสุขลักษณะมีการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองและเชื้อโรคที่ติดมากับอากาศหรือแมลงต่างๆ ซึ่งเป็นอันตรายอย่างมากกับผู้บริโภค จึงได้นำเทคนิคการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ช่วย เพื่อลดเวลาในการอบแห้งที่ใช้เวลานานและปัญหาที่ทำให้เกิดเชื้อโรค เนื่องจากวัตถุดิบจะอยู่ภายในตู้ที่ปิดมิดชิด ส่วนคุณค่าของสารอาหารหลังการอบแห้งก็ยังคงเดิมและสะอาดถูกสุขลักษณะ (Srisittipokakun, 2005) ต่อมาการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มีการพัฒนาใช้พลังงานร่วมกับพลังงานอื่น ๆ เช่น Yaibok, Phethuayluk, WeawSak, Mani and Buaphet (2010) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นผู้จัดทำได้พัฒนาตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ร่วมกับพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตวัตถุดีบอบแห้ง เพื่อลดการปนเปื้อนจากฝุ่นละอองและเชื้อโรค ลดระยะเวลาในการผลิต และควบคุมคุณภาพการผลิตโดยการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแห้ง ให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับความต้องการของวัตถุดิบแต่ละชนิด

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

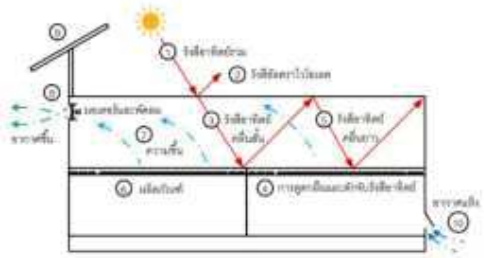
2.1 การอบแห้งด้วยแสงแดดและการอบแห้งด้วยความร้อน

การอบแห้ง หมายถึง กระบวนการกำจัดน้ำหรือความชื้นออกจากวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ โดยใช้ความร้อนหรือวิธีการอื่นๆ เช่น การใช้ลม การใช้แสงแดด หรือการใช้เครื่องอบแห้ง การอบแห้งด้วยแสงแดด ใช้แสงแดดในการกำจัดความชื้น เหมาะสำหรับการอบแห้งผลไม้และผัก การอบแห้งด้วยความร้อน ใช้เตาอบหรือเครื่องอบแห้งในการกำจัดความชื้น เหมาะสำหรับการอบแห้งอาหารและวัสดุที่ต้องการความร้อนสูงการอบแห้งมีวัตถุประสงค์เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดน้ำหนัก และป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่อาจทำให้เกิดการเน่าเสีย

2.2 ตู้อบแห้งด้วยความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดม



รูปที่ 1 ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา



รูปที่ 2 หลักการทำงานของตู้อบด้วยความร้อนจากแสงอาทิตย์

ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา หรือที่เรียกว่า "พาราโบลาโดม" ที่แสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 มีหลักการทำงานที่น่าสนใจและมีประสิทธิภาพสูงในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก การสะสมความร้อนแสงอาทิตย์ส่องผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่เป็นหลังคาของตู้อบ ซึ่งแผ่นนี้จะช่วยให้แสงส่องผ่านได้ดี แต่รังสีความร้อนจะถูกกักเก็บอยู่ภายในตู้อบ ทำให้เกิดผลเรือนกระจก (Greenhouse Effect) และอุณหภูมิภายในตู้อบสูงขึ้น อากาศร้อนภายในตู้อบจะถ่ายเทความชื้นจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้ง ทำให้ความชื้นระเหยออกมา

2.3 ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater)



รูปที่ 3 ฮีตเตอร์แบบอินฟราเรด

ฮีตเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared Heater) แสดงในรูปที่ 3 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อนภายในตู้อบโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งมีคุณสมบัติและการใช้งานที่หลากหลาย ฮีตเตอร์อินฟราเรดจะส่งความร้อนแบบแผ่รังสี คล้ายกับดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมาสู่โลก ทำให้สามารถให้ความร้อนได้ถึงเนื้อในของวัตถุ ฮีตเตอร์แบบอินฟราเรดประหยัดพลังงาน เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนสามารถเข้าถึงวัตถุได้โดยตรง จึงทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่าฮีตเตอร์ทั่วไปที่ต้องอาศัยตัวกลางในการพาความร้อน ฮีตเตอร์อินฟราเรดมักทำจากเซรามิคหรือแก้วควอทซ์ ซึ่งมีความเป็นฉนวนสูง ทำให้ไฟไม่รั่ว

2.4 อาดูโน่ UNO (Arduino UNO)



รูปที่ 4 อาดูโน่ UNO

Arduino Uno ในรูปที่ 4 มีหน้าที่หลักในการควบคุมและประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำงานตามโปรแกรมที่เขียนไว้ โดยมีหน้าที่ในการประมวลผลข้อมูล Arduino Uno ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328P ในการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ตามโปรแกรมที่เขียนไว้ใน Arduino IDE สามารถควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์, หลอดไฟ LED, รีเลย์, และอุปกรณ์อื่นๆ ผ่านขาเอาต์พุตดิจิตอล

2.5 เซนเซอร์ DHT21



รูปที่ 5 เซนเซอร์ DHT21

โมดูลวัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT21 Temperature and Humidity Sensor Module) รูปที่ 5 เป็นโมดูลที่สามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นบริเวณรอบๆทั่วไปหรือในห้องหรือประยุกต์ใช้งานอื่นเช่น Testing, Inspection Equipment, Automatic Control, Data Logger, Weather Station, Humidity Regulator ขึ้นอยู่กับการเขียนโปรแกรมและการต่อใช้งานภายนอก ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐาน มีความน่าเชื่อถือการตอบสนองที่รวดเร็ว และความแม่นยำในการวัดค่าสูง สามารถใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไปได้ ในโมดูลประกอบไปด้วย ส่วนวัดความชื้นแบบ Polymer humidity capacitor และส่วนวัดอุณหภูมิแบบ NTC ให้สัญญาณเอาท์พุทแบบ Digital Output, การตรวจวัดคงที่กับ DHT21 Sensor, ย่านวัดอุณหภูมิ -40-80 องศาเซลเซียส และย่านวัดความชื้น 0-100 %RH

3. การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานผสม

3.1 การออกแบบโครงสร้างเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานผสม

โครงสร้างของเครื่องอบแห้งด้วยพลังงานผสมที่ออกแบบมีขนาด ก.1.5 X ย.2.0 X ส.2.0 เมตร โดยขนาดพื้นที่ของตู้อบที่ใช้อบวัตถุดิบมีขนาด ก.1.5 X ย.2.0 X ส.2.0 เมตร วัสดุโครงสร้างหลักทำจากเหล็กชุบกันสนิม ส่วนห้องอบแห้งมีลักษณะรูปทรงพาราโบลา ครอบด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตเพื่อเก็บความร้อนไว้ภายในที่ได้จากพลังงาน

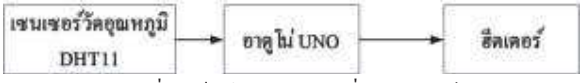
แสงอาทิตย์และความร้อนจากฮีตเตอร์ การถ่ายเทความร้อน ความชื้นใช้พัดลม จำนวน 8 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างเครื่องอบแห้งแบบพลังงานผสม

3.2 การออกแบบระบบให้ความร้อนจากฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์มีหน้าที่ให้ความร้อนภายในเครื่องอบแห้งกรณีที่อุณหภูมิภายในห้องอบต่ำกว่าที่กำหนด Arduino รับค่าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DHT11 รับค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่กำหนด Arduino จะสั่งให้ฮีตเตอร์ทำงานและจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิมีค่าตามที่ตั้งไว้ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 บล็อกไดรแกรมการเชื่อต่อฮีตเตอร์

คำนวณหาขนาดของฮีตเตอร์ สามารถหาได้จากการแสดงในสมการที่ 1

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

เมื่อ Q = พลังงานความร้อน (kJ)

m = มวลของอากาศในตู้อบ (kg)

c = ค่าความจุความร้อนของอากาศ (1kJ/kg.K)

ΔT = อุณหภูมิที่ต้องการ (K)

คำนวณหามวลของอากาศในตู้อบ (m) หาได้จากสมการที่ 2

m = ความหนาแน่นของอากาศ X ความจุของตู้อบ (2)

= 1.2 kg/m^3 X 3 m^3

m = 3.6 kg

พลังงานความร้อน (Q)

หาพลังงานความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C โดย อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 50°C โดยแปลงหน่วยของศาเซลเซียส เป็นหน่วย องศาเคลวิน

Q = 3.6 kg x 1 kJ/kg.K x (333.15-323.15)K

= 36 kJ

เมื่อต้องการเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 °C เป็น 60 °C ภายในเวลา 1 นาที จะต้องใช้ฮีตเตอร์ที่มีกำลังเท่ากับ

กำลังวัตต์ของฮีตเตอร์ = Q/t (3)

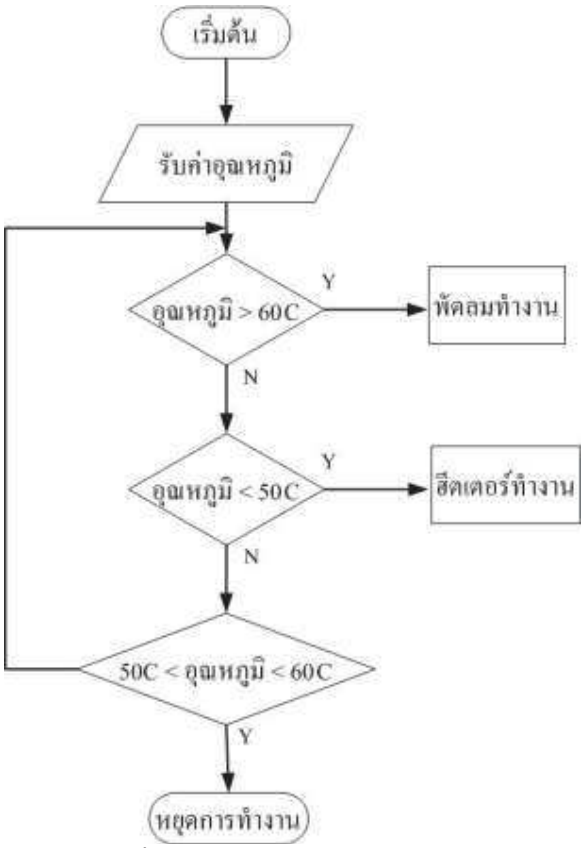
= (36 X 10^3)J/60s

กำลังวัตต์ของฮีตเตอร์ = 600 วัตต์

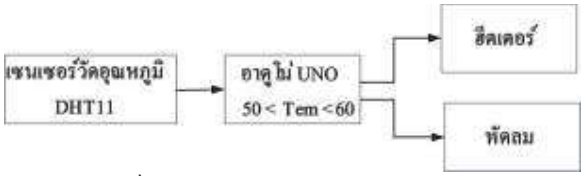
ดังนั้นในตู้อบแห้งที่สร้างขึ้นจึงเลือกให้ฮีตเตอร์ที่มีขนาด เท่ากับ 600 วัตต์ ตามที่คำนวณได้

2.3 ออกบบระบบควบคุมการทำงานภายในตู้อบแห้ง

บอร์ดควบคุมหลักใช้ Arduino UNO เป็นตัวอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องอบผ่านเซนเซอร์ DHT11 เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งมีค่าต่ำกว่าที่ตั้งไว้ Arduino UNO จะทำการสั่งให้ฮีตเตอร์และพัดลมทำงาน จนกว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 60 องศาเซนเซียส ฮีตเตอร์จะทำการหยุดการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9



รูปที่ 8 โฟร์ชาร์ตการทำงานของระบบควบคุม



รูปที่ 9 การทำงานระบบควบคุมอุณหภูมิภายใน

3. การทดสอบและผลการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้ง เป็นการทดสอบการตากวัตถุดิบเป็น ปลา การทดสอบตากวัสถุดิบใน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1.การตากวัตถุดิบแบบธรรมชาติภายนอกเครื่องอบแห้ง โดยอาศัยแสงแดดธรรมชาติเพียงอย่างเดียว 2.การตากวัตถุดิบแบบภายในเครื่องอบแห้งโดยอาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว 3.การตากวัตถุดิบแบบภายในเครื่องอบแห้ง โดยอาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์ควบคู่กับพลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์

3.1 ทดสอบการตากปลาแบบปกติไม่ใช้เครื่องอบ ใช้พลังงานจากแสงแดดอย่างเดียว

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบการตากปลาด้วยวิธีปกติ 5 รอบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักก่อนตาก (กิโลกรัม)	น้ำหนักหลังตาก (กิโลกรัม)
1	35-40	23	5	2.8
2	35-40	25	5	3
3	35-40	24	5	3.1
4	35-40	22	5	2.8
5	35-40	21	5	2.9
ค่าเฉลี่ย	35-40	22.8	5	2.94

3.2 ทดสอบการตากปลาใช้เครื่องอบพลังงานจากแสงแดดอย่างเดียว

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบการตากปลาด้วยวิธีใช้เครื่องอบพลังงานจากแสงแดดอย่างเดียว 5 รอบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักก่อนตาก (กิโลกรัม)	น้ำหนักหลังตาก (กิโลกรัม)
1	40-50	18	5	2.8
2	40-50	16	5	3.2
3	40-50	18	5	3.1
4	40-50	17	5	2.8
5	40-50	15	5	2.9
ค่าเฉลี่ย	40-50	16.8	5	2.96

3.3 ทดสอบการตากปลาใช้เครื่องอบ ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการตากปลาด้วยวิธีใช้เครื่องอบพลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ 5 รอบ

ครั้งที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักก่อนตาก (กิโลกรัม)	น้ำหนักหลังตาก (กิโลกรัม)
1	50-60	12	5	2.8
2	50-60	10	5	3.2
3	50-60	13	5	2.7
4	50-60	12	5	2.9
5	50-60	11	5	3.3
ค่าเฉลี่ย	50-60	11.6	5	2.98

จากตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 4 พบว่าการตากปลาด้วยวิธีตากแดดตามธรรมชาติ อุณหภูมิบริเวณตะแกรงตากปลามีค่าประมาณ 35 – 40 องศาเซลเซียส เมื่อตากปลา น้ำหนัก 5 กิโลกรัม ให้เหลือน้ำหนัก 2.94 กิโลกรัม ใช้เวลา 22.8 ชั่วโมง การตากปลาด้วยวิธีธรรมชาติใช้เวลานาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมไม่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับการตากด้วยเครื่องอบที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว ที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40 – 50 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาประมาณ 16.8 ชั่วโมง เพื่อทำให้น้ำหนักปลาเหลือ 2.96 กิโลกรัม การตากด้วยวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้แต่สามารถทำได้เฉพาะที่มีแสงอาทิตย์เท่านั้น และในส่วนของเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกลับฮีตเตอร์ให้ความร้อนอุณหภูมิภายในเครื่องอบมีค่าอยู่ที่ 50 – 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้เวลา 11.6 ชั่วโมง ในการทำให้ปลามีน้ำหนักเหลือ 2.98 กิโลกรัม วิธีที่สามนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตลอดเวลาแม้ไม่มีความร้อนจากแสงอาทิตย์

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการตากปลาแห้งด้วย 3 วิธี

รายละเอียด	ผลการทดลอง		
	แบบตากใช้แสงแดดปกติ	แบบใช้ตู้อบแห้ง	แบบใช้ตู้อบแห้งร่วมด้วยฮีตเตอร์
อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	35-40	40-50	50-60
เวลา(ชั่วโมง)	22.8	16.8	11.6
น้ำหนักก่อนตากโดยประมาณ (กิโลกรัม)	5	5	5
น้ำหนักหลังตากโดยประมาณ (กิโลกรัม)	2.94	2.96	2.98

4. สรุปผล

การทดสอบเครื่องอบแห้งแบบใช้พลังงานผสมระหว่างพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และพลังงานความร้อนจากฮีตเอตร์ พบว่าการใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแบบผสมสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้คงที่ได้ จึงทำให้วัตถุดิบแห้งเร็วกว่าการตากแบบทั่วๆไป นอกจากนี้ การใช้เครื่องอบแบบผสมยังสามารถกำหนดความชื้นภายในวัตถุดิบได้ โดยการกำหนดเวลาในการอบได้ และยังป้องกันสิ่งเจือปนที่มากับอากาศในบริเวณใกล้เคียงได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] Srisittipokakun, N. (2005). Development of a solar dryer for drying herbs and spices (Master's thesis). Silpakorn University. Nakhon.

[2] Yaibok, T., Phethuayluk, S., WeawSak, J., Mani, M., & Buaphet, P. (2010). Development the fish drying process with a solar-electrical combined energy dryer under the Southern of Thailand Climate. Thaksin University Journal, 12(3), 109-118.

[3] พชร ว่องไพศาลกิจ. (2563). การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริค. คณะวิศกรรมศาสตร์. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[4] ปรีดี วิบูลสวัสดิ์, สมเกียรติ โอกาสเกียรติกุล และ ศิวรักษ์ หาญผดุงธรรม ,(2523).สมรรถนะของกล้วยอบแห้งรังสีดวงอาทิตย์, การประชุมวิชาการครั้งที่ 2 ของสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น เรื่องพลังงานหมุนเวียนและการประยุกต์,วันที่ 25-28 กุมภาพันธ์ 2523.

Investigating the Impact of LoRa and CW Interference on Sigfox Communication Performance

Fumihiko Sato[1*] Rardchawadee Silapunt[1]**

[1]Department of Electronic and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, E-mail: fumihiko.sato01@kmutt.ac.th*, rardchawadee.sil@kmutt.ac.th**

Abstract

Sigfox is a Low Power Wide Area Network (LPWAN) technology that enables low-power, long range communication. However, its performance may be affected by interference from signals such as LoRa and Continuous Wave (CW). This study investigates the impact of such interference on Sigfox using MATLAB and Simulink simulations, with Frame Error Rate (FER) as the key performance metric. Key factors considered include interference power, bandwidth, and transmission distance. The results indicate that LoRa significantly affects Sigfox transmission even at a low power level of - 30 dBm, whereas CW interference only becomes impactful when its power exceeds 16 dBm. Additionally, the bandwidth of interfering signals has a minor impact (approximately 1–2 dB), as LoRa's wide bandwidth overlaps with the Sigfox spectrum. Sigfox can achieve a coverage range of 10 km in an interference-free environment, but this range is reduced to 5 km with CW interference and 4 km with LoRa interference. These findings provide crucial insights for planning and deploying Sigfox networks, particularly in areas where LoRa and CW signals are prevalent.

Keywords: LPWAN, Sigfox, Interference

1. Introduction

With the increasing significance of the Internet of Things (IoT) across various industries, Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies have gained popularity due to their low power consumption and long-range transmission capabilities. Sigfox is one of the leading LPWAN technologies, widely used in applications such as smart metering, smart agriculture, and asset tracking.

RF interference is a critical concern in wireless communication, particularly in unlicensed spectrum where multiple technologies coexist and share the same frequency band. The interference is commonly classified into 4 types [1]. The type that is used in this research is in-band interference. When interference occurs, the receiver may be unable to distinguish between the desired signal and unwanted signals, leading to increased error rates and potential data loss. This problem is especially serious for technologies that lack mechanisms for error checking or retransmission, and it may pose risks to applications involving sensitive or time-critical information, such as medical devices or industrial monitoring systems.

Fortunately, Sigfox employs Ultra Narrowband (UNB) technology, which allows long-range communication while consuming minimal power and offering some immunity to interference. However, as Sigfox operates within the unlicensed frequency spectrum (920–925 MHz in Thailand [2]) alongside other technologies like LoRa, it is highly susceptible to interference. Additionally, Continuous Wave (CW) signals, may also disrupt Sigfox communications.

This study aims to analyze the effects of LoRa and CW interference on Sigfox performance through MATLAB/Simulink simulations with parameter configurations divided into four parts

- Sigfox Transmitter
- LoRa interference transmitter
- CW interference transmitter
- Path loss using Okumura-Hata path loss model [3]

FER exceeding 10% is used as a key performance indicator [4]. The study focuses on the following research questions:

- At what interference power levels do LoRa and CW signals degrade Sigfox transmission quality?
- Does the bandwidth of the interfering signal impact Sigfox transmission quality?
- What is the coverage for Sigfox under interference-free and interference-prone environments?

2. Literature Review

Recent studies on LPWAN technologies have extensively analyzed the performance of Sigfox and LoRa in separate environments. Mikhaylov et al. [5] investigated real-world Sigfox network performance, highlighting factors such as environmental attenuation and signal collisions. Their findings indicate that Sigfox typically achieves a communication range of around 2.5 km in urban settings. Similarly, Md Abu Hemjal [6] reported that Sigfox exhibits high immunity to

interference, provided that the interference power is at least 8 dB lower than Sigfox's transmit power.

Naik et al. [7] examined interference between Ultra Narrowband (UNB) and Spread Spectrum (SS) technologies, finding that SS systems mitigate interference through processing gain techniques, whereas UNB lacks such capabilities, making it more susceptible to wideband interference. While they also studied LoRa's resilience to interference, their work primarily focused on intra-technology interference

Niemah I. Osman & Esra B. Abbas [8] conducted an experiment comparing Sigfox and LoRa, showing that as packet Error Rate (PER) increase in shared channels, packet collisions rise. Sigfox exhibited a lower PER than LoRa. However, their study did not account for external interference, leaving a gap in understanding how LoRa and other signals impact Sigfox performance.

Despite these insights, there remains limited research on the specific impact of LoRa and Continuous Wave (CW) interference on Sigfox, particularly in controlled simulation environments. This study addresses this gap by conducting a detailed interference analysis using MATLAB/Simulink, focusing on how LoRa and CW signals affect Sigfox communication performance.

3. Research Methodology and Parameter Configuration

This section describes the research methodology used to analyze the impact of interference on the Sigfox system. It begins with an explanation of the Sigfox protocol's operation to provide an understanding of the system's structure and characteristics. Then, it presents the components of the Sigfox communication model developed in MATLAB/Simulink, along with the parameter configurations relevant to the experiment.

3.1 Sigfox Technology Overview

Sigfox uses Ultra-Narrowband (UNB) modulation with a bandwidth of 100 Hz or 600 Hz (depending on the country), which increases it resistance to interference. It supports long-range communication of 10–40 km in rural areas and 3–10 km in urban environments [9]. The Sigfox network consists of three main components:
1. End Devices (EDs): IoT devices that transmit data via uplink communication.
2. Gateways (GWs): Receive data from end devices and relay it to the Sigfox Cloud through the internet. Also supports downlink communication if the ED compatible.
3. Sigfox Cloud: Processes, stores, and distributes data to users via APIs.
However, this study primarily only focuses on the uplink transmission of Sigfox end devices.

3.2 Sigfox Communication Model

A Sigfox communication model was developed using MATLAB/Simulink, consisting of:
- Sigfox transmits at 24 dBm (EIRP).
- Sigfox receiver sensitivity is -126 dBm [4].
- Okumura-Hata model is used as the path loss model.
- LoRa interferer simulates the LoRa interference signal.
- CW interferer simulates the CW interference signal.
- FER Measurement Module: Analyzes and measures the Frame Error Rate (FER).

An overview of the Sigfox communication model is presented in Figure 1, while Figure 2 illustrates a simplified block diagram.

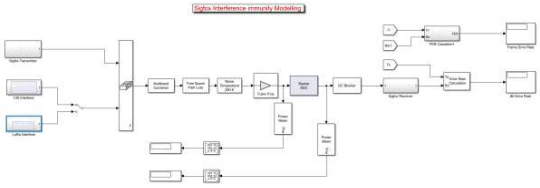


Fig. 1 Sigfox communication model

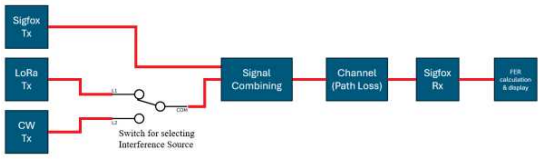


Fig. 2 Simplified block diagram

3.3 Experimental Parameters

To evaluate the performance of Sigfox under different conditions, the key parameters that influence the transmission quality will be defined as follows.
- Sigfox operates at 921 MHz with DBPSK modulation, a 600 Hz bandwidth, and a data rate of 600 bps (per the Sigfox RC4 standard).
- LoRa operates at the same frequency with bandwidths of 125 kHz and 250 kHz, with an interference power level from -31 dBm to -21 dBm.
- CW interference operates at the same frequency with interference power level from 12 dBm to 22 dBm.
- Path loss follows the Okumura-Hata model for urban environments over distances of 1–10 km, as shown in Figure 3.

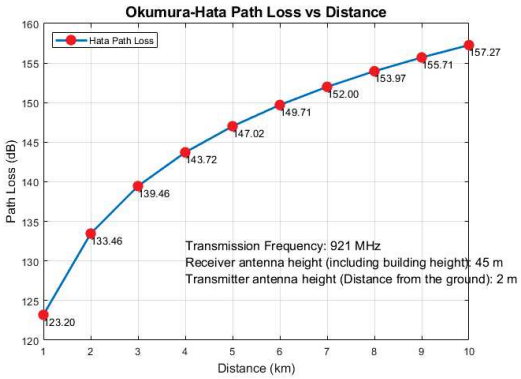


Fig. 3 Path loss value vs distance

4. Experimental Results

4.1 Effects of interference power on Sigfox transmission quality

The first experiment examined the effect of LoRa and CW interference power on Sigfox FER at a 1 km distance. The result is shown in Figure 4.

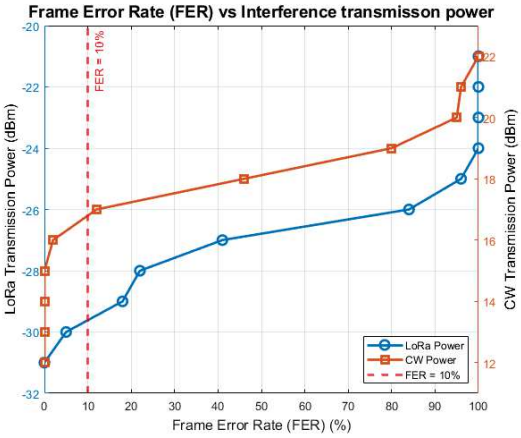


Fig. 4 Frame Error Rate (FER) vs Interference transmission power

Summary: Interference power significantly affects Sigfox performance. LoRa causes disruption at -30 dBm, with FER reaching 100% at -24 dBm, CW interference requires at least 16 dBm to affect Sigfox and reaches 100% FER at 22 dBm.

4.2 Bandwidth impact on Sigfox transmission quality

The second experiment assessed the effect of LoRa bandwidth on Sigfox performance:

- LoRa at 125 kHz bandwidth**:** FER > 10% at -28 dBm.
- LoRa at 250 kHz bandwidth**:** FER > 10% at -29 dBm.

Additional experiment results are shown in Figure 5.

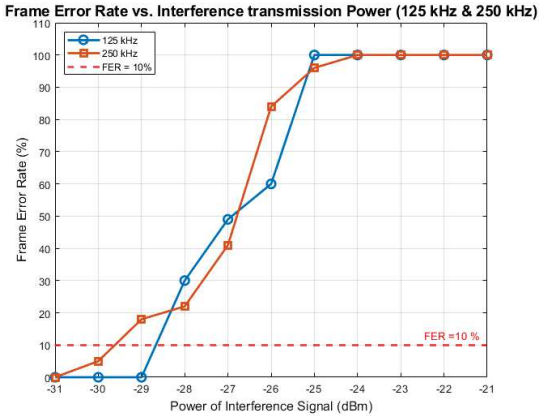


Fig. 5 Frame Error Rate (FER) vs Interference transmission power (125 kHz & 250 kHz)

Summary: LoRa bandwidth has a minor impact on interference levels due to both bandwidths overlapping the Sigfox communication bandwidth. LoRa interference at 125 kHz bandwidth begins affecting Sigfox at -29 dBm, while 250 kHz bandwidth affects it at -30 dBm.

4.3 Sigfox coverage under interference-free and interference-prone environments

The third experiment is to find the coverage of Sigfox transmission under different scenarios:

- Scenario 1 (Interference-Free): Sigfox achieves a maximum coverage of 10 km with a minimal FER
- Scenario 2.1 (CW Interference): Sigfox coverage is reduced to 5 km when the CW power is 16 dBm.
- Scenario 2.2 (LoRa Interference): Sigfox coverage is reduced to 4 km under LoRa interference at -30 dBm.

Detailed FER data across distances and interference powers is shown in Table 1

Table 1 Coverage of Sigfox for each scenario

Distance (km)	Frame Error Rate (%)		
	No interference	LoRa @ -30 dBm	CW @ 16 dBm
1	0	5	2
2	0	7	2
3	0	7	4
4	0	9	4
5	0	23	7
6	0	28	11
7	0	37	20
8	0	38	26
9	0	45	34
10	3	49	42

Summary: The experiment show that Sigfox's coverage is significantly reduced under both CW and LoRa interference.

- Without interference, Sigfox can transmit up to 10 km.
- Under CW interference , it reaches 5 km, while under LoRa interference, it is reduced to 4 km.

5. Result discussion

The results of this study offer important insights into how different types of interference, specifically LoRa and Continuous Wave (CW) that operate on same frequency, affect Sigfox communication performance and coverage. The discussion will be covered into following.

5.1 Why does LoRa affect Sigfox more than CW?

LoRa's much wider bandwidth (125–250 kHz) fully overlaps Sigfox's 600 Hz channel, so even at low power (e.g. –30 dBm), it corrupts a large portion of the signal. In contrast, CW is narrowband, so unless its power exceeds 16 dBm, it cannot fully cover Sigfox's frequency and thus has less impact.

5.2 Why does bandwidth only have a small effect?

Since both 125 kHz and 250 kHz far exceed Sigfox's 600 Hz channel, each fully overlaps it. Therefore,

differences in LoRa's bandwidth add only a slight increase (1–2 dB)in interference impact.

5.3 Sigfox coverage under interference

The experimental results show that Sigfox's coverage is significantly reduced in the presence of both LoRa and CW interference. LoRa interference at low power (–30 dBm) reduced coverage to 4 km, while CW interference at 16 dBm reduced it to 5 km. However, the coverage can be increased when the interference power is lower. These results suggest that signal overlap and interference power are the key considerations on the Sigfox performance. Therefore, proper frequency planning and interference monitoring are critical for maintaining reliable Sigfox communication, especially in urban environments where other LPWAN technologies coexist.

5.4 Effect of interference to Sigfox and practical interference.

To illustrate the practical impact of interference on Sigfox transmission, we observed a significant increase in FER when LoRa signals overlapped the Sigfox channel, even at low power levels. For instance, at –30 dBm LoRa interference, FER exceeded 23% at 5 km distance. This means that around one out of every four transmitted messages may be lost. Although Sigfox uses UNB technology, its resilience is quickly reduced when the interfering signal fully overlaps and particularly when interference is persistent or periodic. These effects emphasize the real-world importance of mitigating interference in the unlicensed spectrum.

The practical interference possibly arise from many sources other than LoRa and CW. Devices that use ISM 900 MHz or 33-centimeter band [10] including amateur radio, medical devices, and the UHF RFID are potentially sources of interference [11]. Mikhaylov et al [5] mentioned an impact of urban environment (i.e., hills and mid-rise buildings) on the radio propagation that causes the slight reduction in actual transmission distance.

5.5 Conclusions

The study reveals that Sigfox is far more vulnerable to LoRa interference showing high FER even at -30 dBm while the vulnerability to CW interference appears at much higher power of around 16 dBm. The choice of LoRa bandwidth (125 vs. 250 kHz) has slight impact since both bandwidths already fully overlap Sigfox's 600 Hz channel. As a result, the effective coverage drops from 10 km in interference-free condition to ~4 km under LoRa and ~5 km under CW, respectively. In areas where both technologies coexist, frequency planning or interference investigation is essential to maintain Sigfox network integrity.

6. Acknowledgments

I would like to express my gratitude to Assoc. Prof. Dr. Rardchawadee Silapunt from the Department of Electronics and Telecommunication Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, for the guidance and support throughout this research.

References

[1] Keysight Technologies, April 23, 2025, " Techniques for Precise Interference Measurements in the Field".[Online].Available: https://shorturl.at/D70qT

[2] National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC), March 26, 2025, "มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์,".[Online].Available: https://shorturl.at/QOcey

[3] Wikipedia Contributors, March 26, 2025,"Hata Model,"Wikipedia.[Online].Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hata_model

[4] Sigfox, Mar. 26, 2025, "Sigfox Public Assets,"GoogleCloudStorage. [Online].Available: https://shorturl.at/k7POj

[5] K. Mikhaylov et al., "Communication Performance of a Real-Life Wide-Area Low-Power Network Based on Sigfox Technology," ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC40277.2020.9148645

[6] Md Abu Hemjal, March 26 2025, " Sigfox based Internet of Things: Technology, Measurements and Development",2022. [Online]. Available: https://shorturl.at/q7tCX

[7] N. Naik, "LPWAN Technologies for IoT Systems: Choice Between Ultra Narrow Band and Spread Spectrum," *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, Rome, Italy, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/SysEng.2018.8544414.

[8] N. I. Osman and E. B. Abbas, "Simulation and Modelling of LoRa and Sigfox Low Power Wide Area Network Technologies," 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCEEE.2018.8515816.

[9] Sigfox, March 26, 2025, "Sigfox Technical Overview," Sigfox. [Online]. Available: https://build.sigfox.com/study

[10] Wikipedia Contributors, April 23, 2025, "33-centimeter_band," Wikipedia.[Online].Available: https://en.wikipedia.org/wiki/33-centimeter_band

[11] M. R. Souryal, D. R. Novotny, D. G. Kuester, J. R. Guerrieri and K. A. Remley, "Impact of RF interference between a passive RFID system and a frequency hopping communications system in the 900 MHz ISM band," *2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2010, pp. 495-500, doi: 10.1109/ISEMC.2010.5711325

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์โดยใช้โปรแกรม PSpice for TI

Design of Transimpedance Amplifier Using PSpice for TI

ปรีชา วงษ์จำปา* ภูดิศ โทอินทร์ บุษกร บุญศรี และ กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
E-mail: preecha.wo@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์ (Transimpedance Amplifier :TIA) การออกแบบในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเลือกวงจรขยายสัญญาณ (Operational Amplifier) ที่หมาะสม และการปรับแต่งค่าตัวต้านทานป้อนกลับ (Resistor Feedback: R_f) รวมถึงค่าตัวเก็บประจุป้อนกลับ (Capacitor Feedback : C_f) สำหรับความถี่ 3 MHzโดยใช้ซอฟต์แวร์ PSpice for TI เพื่อจำลองพฤติกรรมการทำงาน โดยใช้ไอซีเบอร์ OPA656 จากผลจากการวิเคราะห์การทำงานพบว่าสามารถขยายแรงดัน อัตราการขยาย 100 เท่า การตอบสนองความถี่ในการทดลองสามารถทำงานได้ทำที่ออกแบบ

คำสำคัญ: ทรานส์อิมพีแดนซ์แอมพลิฟายเออร์ PSpice for TI การจำลองวงจร วงจรขยายสัญญาณ

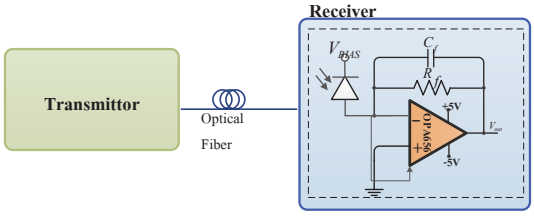
Abstract

This paper presents the design and analysis of transimpedance amplifiers (TIA) using operation amplifier. The design in this research focuses on a bandwidth of 3 megahertz (MHz), where the appropriate operational amplifier (Op-Amp), the feedback resistor (R_f) and the value of the feedback capacitor (C_f) are calculated and considered. The PSpice for TI software is used to simulate, and analysis demonstrated is shown. OPA656 from TI is used. The results showed that it can amplify the voltage with a gain of 100 times. The frequency response in this experiment has a bandwidth of 3 MHz.

Keywords: Transimpedance amplifier, PSpice for TI, Circuit simulation, Op-amp

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบการสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยแก้วนำแสงมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น โดยการสื่อสารดังกล่าวจำเป็นใช้ระบบออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic Systems) การทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) ในการแปลงแสงเป็นสัญญารทางไฟฟ้า อย่างไรกดีอุกรปณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแสงมีค่าเป็นกระแส จึงจำเป็นต้องแปลงสัญญาณกระแสเป็นสัญญาณแรงดันที่ภาครับ (Receiver) พร้อมทั้งขยายแรงดันเอาต์พุต (Output) ให้ได้แรงดันตามต้องการ [1] รูปที่ 1 แสดงระบบการสื่อสารเชิงแสง ประกอบไปด้วยภาคส่ง และภาครับ โดยงานนี้จะพิจารณาส่วนของภาครับ



รูปที่ 1 การสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยแก้วนำแสง

เครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์ หรือ วงจร TIA มีบทบาทสำคัญในการแปลงกระแสไฟฟ้า (Current) ให้เป็นแรงดัน (Voltage) TIA ถูกนำไปใช้ในหลายแอปพลิเคชัน (Applications) ทางเส้นใยแก้วนำแสงไม่เพียงแต่สำหรับตรวจจับแสง แต่ยังใช้ในการสื่อสารทางแสง เช่น การสื่อสารด้วยแสงไร้สายด้วยแสงที่สองเห็นได้ (Visible Communication : VLC) [2] และเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber Optic) [3]

จากดังที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญเป็นอย่างมาก ในบทความนี้จึงเน้นการอธิบายพื้นฐานการทำงานของวงจร TIA การออกแบบ และการเลือกอุปกรณ์ที่เหมาะสมในงานความถี่สูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน รวมถึงการประยุกต์ใช้งานในแอปพลิเคชันต่างๆ ที่ต้องการใช้งานความถี่ $\leq$3MHz ด้วยซอฟต์แวร์ PSpice for TI [4] การเลือกใช้ซอฟต์แวร์นี้ช่วยในการจำลองและทดสอบวงจร โดยสามารถตรวจสอบพฤติกรรมของวงจรในสภาวะต่างๆ นอกจากนี้ยังช่วยในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจร TIA เช่น ความเสถียรของการขยายสัญญาณ (Gain Stability) และการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการทำงานจริง

2. ระบบสื่อสาร

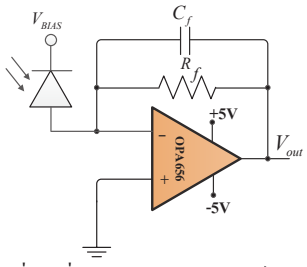
ในยุคปัจจุบัน การสื่อสารเป็นส่วนสำคัญของชีวิตประจำวันที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยง เช่น การติดต่อผ่านอีเมล (Electronic Mail : Email)

จนถึงการประชุมทางวิดีโอ การสื่อสารในรูปแบบต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อผู้คนและองค์กรต่างๆ ทั่วโลก การแลกเปลี่ยนข้อมูลทั้งภายในประเทศ และต่างประเทศที่รวดเร็ว จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ขับเคลื่อนทั้งเศรษฐกิจและสังคม

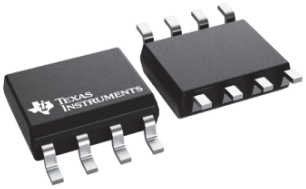
หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการส่งข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพและความเร็วสูง คือ การสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยแก้วนำแสง ที่มีการใช้งานเส้นใยแก้วนำแสง ที่สามารถส่งข้อมูลผ่านแสงได้ในระยะไกลด้วยความเร็วสูงมาก ทั้งในด้านอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง (Internet Hight-Speed) [5] และการส่งข้อมูลในปริมาณที่เยอะ การใช้แสงเป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณช่วยให้การส่งข้อมูลในยุคดิจิทัลไม่เพียงแต่เร็วขึ้น แต่ยังมีประสิทธิภาพและความเสถียรที่สูงกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบเดิม อีกด้วย เนื่องจากการสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยแก้วนำแสงนั้นใช้แสงในการสื่อสาร จึงจำเป็นต้องอาศัยวงจร TIA จะกล่าวในลำดับถัดไป

2.1 เครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์

เครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์ หรือ วงจร TIA มีความสำคัญมากสำหรับการสื่อสารข้อมูลด้วยเส้นใยแก้วนำแสง มีหน้าที่แปลงจากกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า TIA ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆของออปติกไฟเบอร์ มีความง่ายต่อการสร้าง วงจร TIA ประกอบไปด้วย ออปแอมป์ (Operational Amplifier) ตัวต้านทาน เพื่อใช้เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ และค่าตัวเก็บประจุเพื่อใช้เป็นเป็นค่าตัวเก็บประจุอ้างอิง ดังรูปที่ 2 โดยจะกล่าวองค์ประกอบในลำดับถัดไป



รูปที่ 2 เครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 3 ออปแอมป์ เบอร์ OPA656 [6]

2.2 ออปแอมป์

ในบทความนี้ใช้ออปแอมป์เบอร์ OPA656 จากบริษัท Texas Instrument (TI) Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา[6] ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญในหลายๆ วงจร โดยเฉพาะในวงจรที่ต้องการการขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบเชิงเส้น โดยออปแอมป์ที่ใช้มีข้อกำหนดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดที่สำคัญ OPA656 [6]

พารามิเตอร์	ค่าการใช้งาน
Gain-bandwidth product (GBW)	230 MHz
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้งาน	± 5 V
Input voltage noise	6 นาโนโวลต์ ต่อเฮิร์ซ $\left(nV/\sqrt{Hz}\right)$
Input bias current:	2 pA

จากตารางที่ 1 ข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับออปแอมป์ OPA656 พบว่ามีแบนวิดท์ที่กว้าง เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความถี่สูง จึงเลือกใช้ออปแอมป์เบอร์ OPA656 ในการทดลองครั้งนี้

3. การออกแบบและจำลองแบบวงจรขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์

การออกแบบวงจรทรานส์อิมพีแดนซ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงอัตราการขยายของเอาต์พุต และเพื่อกรองความถี่จึงจำเป็นต้องหาความค่าความถี่คัตออป หรือ ค่าความถี่ที่สัญญาณเริ่มลดลงจากระดับปกติดังสมการที่ (1) [2]

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \tag{1}$$

โดยที่ f_c คือ ความถี่คัตออป ที่ต้องการทราบค่า R_f คือ ค่าตัวต้านทางอ้างอิง C_f คือ ค่าเก็บตัวประจุอ้างอิง

การหาค่าตัวต้านทางอ้างอิงได้จากสมการที่ (2) [2] ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของค่าแรงดันที่เอาต์พุตที่ต้องการและค่ากระแสอินพุตที่ไหลเข้าวงจร จากค่าตัวเก็บประจุ และความต้านทานสามารถหาค่าโวลเตจเอาต์พุตแทนด้วย $V_{out}(s)$ ได้ดังนี้

$$V_{out}(s) = \frac{R_f}{1+sR_fC_f} I_{ph}(s) \tag{2}$$

เมื่อ I_{ph} คือค่ากระแสของตัวรับแสง และ s คือ ตัวแปลการแปลงลาปลาซ (Laplace transform)

$$R_f = \frac{V_{out}}{I_{in}} \tag{3}$$

โดยที่ V_{out} คือ ค่าแรงดันที่เอาต์พุตที่ต้องการ (หน่วยโวลต์) และ I_{in} คือ ค่ากระแสอินพุตที่ไหลเข้ามาวงจร (หน่วยแอมแปร์)

การหาค่าเก็บตัวประจุอ้างอิง หาได้จากสมการที่ (4) [2]

$$C_f \le \frac{1}{2\pi R_f f_c} \quad (4)$$

จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (1) - (3) จะได้ค่าที่ใช้งานดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ในการออกแบบวงจร TIA

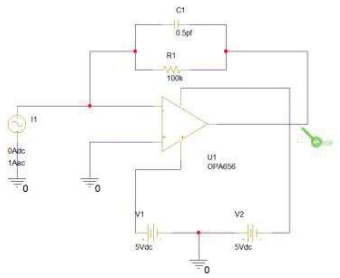
พารามิเตอร์	ค่าการใช้งาน
C_f	0.5 pF
R_f	$100k\Omega$
f_c	3 MHz

ตัวอย่างการคำนวณค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ความต้านทานป้อนกลับ $R_f = \frac{3V}{30\mu A} = 100k\Omega$ และตัวเก็บประจุ

$$C_f \le \frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^3 \times 3 \times 10^6} \le 0.5pF$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^3 \times 0.5 \times 10^{-12}} = 3.183MHz \approx 3MHz$$

เมื่อได้รับค่าพารามิเตอร์ในการออกแบบวงจร TIA สำหรับการจำลองผลจากตารางที่ 2 แล้วนำค่าที่ได้ไปจำลองในซอฟต์แวร์ PSpice for TI โดยมีการจำลองการทำงาน ดังรูปที่ 4 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่าย

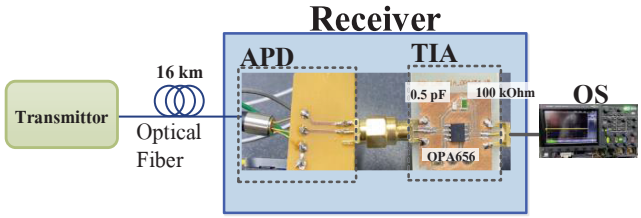


รูปที่ 4 การจำลองการทำงานด้วยซอฟต์แวร์ PSpice for TI.

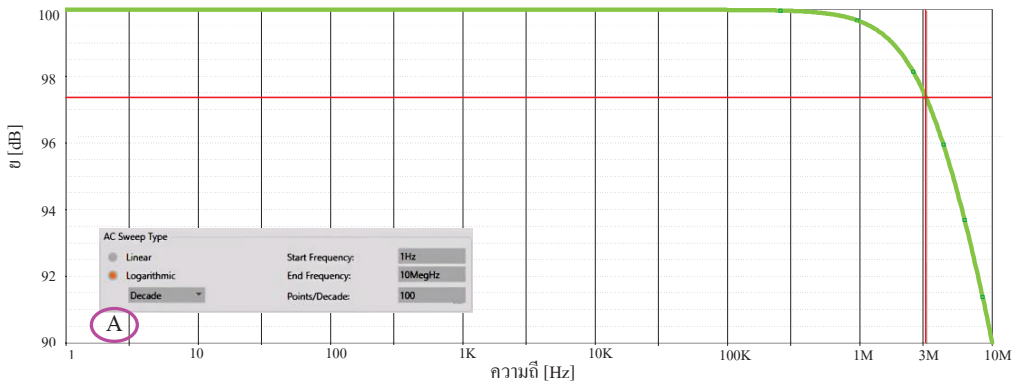
กระแสมีค่าเท่ากับ 1 แอมแปร์ (Am pea : A) ที่ต่อเข้ากับขาลบ ขาที่ 3 ของออปแอมป์เป็นการต่อแบบกลับขั้ว (Inverting Amplifier) ป้อนแรงดันให้ขาออปแอมป์ขาที่ 4 แรงดัน –5V และขาที่ 7 แรงดัน +5V โดยขาเอาต์พุตขาที่ 6 วงจรนี้ต้องการอัตราขยายแรงดันที่ 100 dB ในการวิเคราะห์วงจรกำหนดความถี่ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 10 MHz ค่าตัวต้านทานป้อนกลับและตัวเก็บประจุแสดงดังตารางที่ 2

4. การทดลองวงจรเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองจริง ที่ได้จากการออกแบบจากหัวข้อที่ 3 ดังรูปที่ 5 โดยการทดลองจริงระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสง ทำการทดลองส่งสัญญาณจากภาคส่ง ส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแก้วนำแสง โดยที่ภาครับ ใช้แอวาแลนซ์โฟโต้ไดโอด เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสง โดยป้อนแรงดันแอโนด (Anode) -12V และ



รูปที่ 5 การทดลองจริงระบบการสื่อสารเชิงแสงโดยใช้เครื่องขยายสัญญาณทรานอิมพีแดนซ์



รูปที่ 6 ผลการจำลองการตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ของวงจร TIA ที่จำลองโดยซอฟต์แวร์ PSpice for TI

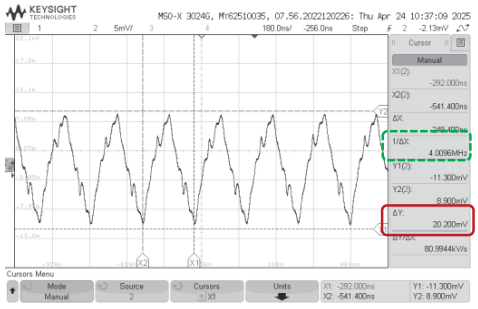
แคโทด (Cathode) ต่อกับเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์ โดยมีออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ใช้สำหรับวัดสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่องขยายสัญญาณทรานส์อิมพีแดนซ์ ที่ภาครับ และภาคส่ง และความยาวของเส้นใยแก้วนำแสงเท่ากับ 16 km และป้อนความเข้มแสงที่ภาคส่งเท่ากับ 4 dB และพลังงานที่ได้รับสัญญาณเท่ากับ 0.33 dB

5. ผลการทดลอง

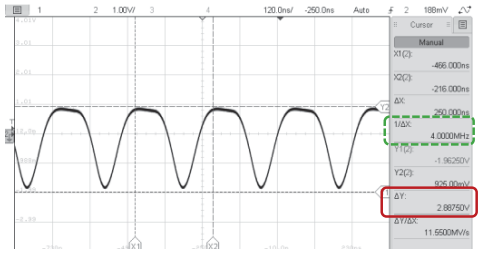
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง โดยประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ผลจากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice for TI และส่วนที่ 2 คือ ผลจากการทดลองจริงที่ได้จากการวัดโดยใช้ออสซิลโลสโคป

ส่วนที่ 1 ใช้ซอฟต์แวร์ PSpice for TI ในการจำลองวงจร TIA โดยการตั้งค่าตามรูปที่ 6A กำหนดให้พล็อต (Plot) แบบลอการิทึม (Logarithmic) ความถี่เริ่มต้น 1 Hz โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เพิ่มค่าความถี่เป็น 10 เท่า ถึงความถี่สุดท้ายเท่ากับ 10 MHz จากผลการจำลองแบบตามรูปที่ 6 จากผลการทดลองการอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 100 dB และเมื่อลดลง -3 dB ที่ 97 dB แถบความถี่ที่ 3 MHz ซึ่งมีค่าตามที่ออกแบบ ผลการทดลองนี้เมื่อเพิ่มค่า R_f จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้น C_f จะมีผลต่อแบนด์วิดท์เมื่อค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แบนด์วิดท์ลดลง

ส่วนที่ 2 ผลการทดลองจริงจากการออกแบบตามรูปที่ 5 โดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณที่ภาคส่ง และที่ภาครับ ผลการทดลองจริงวัดสัญญาณอินพุตที่ภาครับก่อนเข้าวงจรขยายแสดงดังรูปที่ 7(ก) โดยมีขนาดแอมพลิจูดแรงดัน 20.20mV (เส้นทึบ) และมีความถี่ที่ 4MHz (เส้นประ) โดยที่มีความยาวเท่ากับ 16 km ไปยังภาครับ โดยที่สัญญาณเอาต์พุตที่ภาครับ มีผลการทดลองจริงดังรูปที่ 7(ข) มีขนาดแอมพลิจูดแรงดัน 2.88V (เส้นทึบ) และมีความถี่ที่ 4MHz (เส้นประ)



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ผลการทดลองสัญญาณวงจรขยายสัญญาณที่รับได้เมื่อส่งสัญญาณที่ 16 km: (ก) ภาคส่ง (ข) ภาครับ

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและจำลอง วงจร TIA โดยใช้ซอฟต์แวร์ PSpice for TI วิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรก่อนการสร้างจริงของวงจร TIA โดยบทความนี้ใช้ออปแอมป์เบอร์ OPA656 และค่าพารามิเตอร์ $R_f = 100k\Omega$ $C_f = 0.5pF$ และ $f_c = 3MHz$ แสดงให้เห็นว่า ค่า R_f มีผลต่อแรงดันเอาต์พุตและแบนด์วิดท์ของวงจร TIA โดยค่า R_f ที่สูงขึ้นให้แรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น แต่จะทำให้ลดแบนด์วิดท์ลดลงหากเพิ่ม C_f สามารถช่วยลดปัญหาการการออสสิเลตของวงจรและเพิ่มเสถียรภาพ ผลลัพธ์จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการจำลอง PSpice for TI สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของวงจรได้ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานตรวจจับแสงและระบบสื่อสารด้วยแสง

เอกสารอ้างอิง

[1] Tan, Chee Hing, J. P. R. David, B. K. Ng, and others. "Excess Noise Measurement in Avalanche Photodiodes Using a Transimpedance Amplifier Front-End." Measurement Science and Technology 17, no. 7 (2006)

[2] S. Fuada, A. P. Putra, Y. Aska, and T. Adiono, "Trans-impedance amplifier (TIA) design for visible light communication (VLC) using commercially available OP-AMP", Microelectronic Center - Pusat Penelitian Mikroektronika, VLC Research Group ITB, Bandung, Indonesia, Oct. 2016.

[3] Mouri Zadeh Khaki, A., Omoomi, M., & Borzabadi, E. (2016). An ultra-low-power TIA plus Limiting Amplifier in 90nm CMOS technology for 2.5 Gb/s optical receiver. *Proceedings of the 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1-6.

[4] Texas Instruments. (n.d.). PSpice for TI [Software]. Retrieved March 24, 2025, from https://www.ti.com/tool/PSPICE-FOR-TI

[5] ธัชชัย ตระกูลเลิศยศ. (2016, กันยายน 6). เส้นใยนำแสง (Fiber Optic). SCIMATH. Retrieved March 20, 2025, from https://www.scimath.org/article-physics/item/4814-fiber-optic?utm_source=chatgpt.com

[6] Texas Instruments. (2001, ธันวาคม; Revised February 2024). OPA656 550MHz, Unity-Gain Stable, FET-Input Operational Amplifier [Datasheet]. Retrieved March 2, 2025, from https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa656.pdf?ts=1742795366846&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.co.th%252F\

วงจรกรองสัญญาณหลายหน้าที่โหมดแรงดันอันดับหนึ่งโดยใช้ไอซี AD844

First-order Voltage-mode Universal Filters Using ICs AD844

ภัทธาวุธ วงศ์สักดิ์[1] สุชาติ เขียวนอก[2] วินัย ใจกล้า[3] และ โกศล พิทักษ์สัตยาพรต[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
[3]ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: koson.p@pcru.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองสัญญาณอันดับหนึ่งในโหมดแรงดันแบบสองอินพุตหนึ่งเอาต์พุต วงจรที่นำเสนอสามารถกำหนดสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้การตอบสนองการกรองสัญญาณที่เอาต์พุตแบบกรองผ่านความถี่ต่ำ, กรองผ่านความถี่สูง และกรองผ่านทุกความถี่ได้ในวงจรเดียว การสร้างฟังก์ชั่นการกรองทั้งหมดไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ PSPICE ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและจำลองวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ โดยมีการประยุกต์ใช้กับวงจรคลอเดรเจอร์ออสซิลเลเตอร์ พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกับการคาดการณ์ทางทฤษฎีได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: วงจรกรองสัญญาณแอนะล็อก, ไอซี AD844, หลายอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต

Abstract

This paper presents a first-order voltage-mode filter with a dual-input single-output configuration. The proposed circuit is capable of achieving low-pass, high-pass, and all-pass filtering responses within a single structure by appropriately selecting the input signal configuration. Notably, the realization of all filtering functions does not require component matching conditions, thereby enhancing design flexibility and practical implementation. The circuit's performance has been validated through PSPICE simulations were employed to validate the circuit's performance, and its applicability was further demonstrated by integrating it into a quadrature oscillator. The simulation results exhibit excellent agreement with theoretical predictions, confirming the feasibility and effectiveness of the proposed filter for signal processing applications.

Keywords: analog filter, ICs AD844, multiple-input single-output

1. บทนำ

วงจรกรองสัญญาณแบบแอนะล็อกถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการใช้งานด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หลากหลายด้าน เช่น โทรคมนาคมและการสื่อสาร ระบบเสียง เครื่องมือวัด และระบบควบคุม วงจรกรองสัญญาณอันดับหนึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบและประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ ที่กล่าวมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งวงจรกรองสัญญาณหลายหน้าที่ซึ่งให้การตอบสนองในการกรองสัญญาณหลายแบบในวงจรเดียวกันได้รับความสนใจอย่างมากและกลายเป็นหัวข้อการวิจัยที่น่าสนใจ [1], [2] เช่น วงจรกรองสัญญาณแบบ MISO (multiple-input single-output) เป็นวงจรกรองสัญญาณที่มีหลายขั้วสัญญาณอินพุตและหนึ่งขั้วสัญญาณเอาต์พุต [3] การเลือกการตอบสนองของวงจรกรองสัญญาณที่ขั้วสัญญาณเอาต์พุตสามารถควบคุมขั้วสัญญาณอินพุตที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แบบดิจิทัล ตามเงื่อนไขของแต่ละวงจรที่ออกแบบมา [4]

วงจรกรองสัญญาณอันดับหนึ่งได้รับการนำเสนออย่างต่อเนื่อง [5]–[10] จากวงจรที่มีการนำเสนอยังพบข้อด้อยของวงจรดังนี้

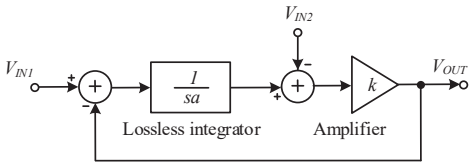
- ใช้อุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟจำนวนมากโดยเฉพาะตัวต้านทานภายนอก [5], [8]
- ต้องการกำหนดเงื่อนไขความสมพงษ์ของค่าอุปกรณ์ (condition matching) [5]
- ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวมเนื่องจากจะมีพื้นที่ขนาดใหญ่และน้ำหนักที่มาก [6], [7], [9], [10]
- ต้องการวงจรขยายสัญญาณเพิ่มเติมจากภายนอก [6]

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขข้อด้วยดังกล่าว โดยนำเสนอวงจรกรองสัญญาณแบบ MISO โดยใช้ไอซี AD844 ซึ่งเป็นไอซีเชิงพาณิชย์

2. หลักการของวงจรที่นำเสนอ

2.1 หลักการแนวคิดในการสังเคราะห์วงจร

การสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณแบบ MISO ที่นำเสนอทำได้โดยใช้บล็อกไดอะแกรมพื้นฐาน ดังรูปที่ 1 วงจรย่อยประกอบด้วยวงจรอินติเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย (lossless integrator) และวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) โดยมีการรวมสัญญาณอินพุต 2 จุด



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐาน

จากรูปที่ 1 วงจรกรองสัญญาณแบบ MISOจะได้สมการแรงดันเอาต์พุตดังนี้

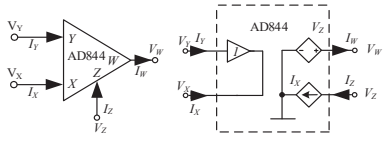
$$V_{OUT} = \frac{\frac{k}{a}V_{IN1} - ksV_{IN2}}{s + \frac{k}{a}} \quad (1)$$

จากสมการที่ (1) วงจรสามาถให้ฟังก์ชั่นการตอบสนองได้ 3 ฟังก์ชั่นคือ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (low-pass filter : LP) , วงจรกรองผ่านความถี่สูง (high-pass filter : HP) และวงจรกรองผ่านทุกความถี่ (all-pass filter : AP) โดยการกำหนดค่าอินพุต

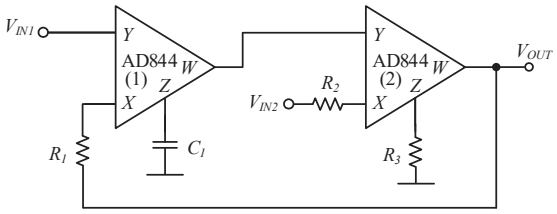
2.2 วงจรที่นำเสนอ

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรที่นำเสนอคือไอซี AD844 ซึ่งมีสัญลักษณ์และวงจรสมมูลดังรูปที่ 2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ current-feedback operational amplifiers (CFOA) [11] โดยความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่ขั้วต่าง ๆ แสดงด้วยสมการดังนี้

$$V_X = V_Y; I_Z = I_X; I_Y = 0; V_W = V_Z \quad (2)$$



รูปที่ 2 ไอซี AD844 (ก) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้า (ข) วงจรสมมูล



รูปที่ 3 วงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ

วงจรกรองสัญญาณหลายหน้าที่อันดับหนึ่งในรูปที่ 3 ประกอบด้วยไอซี AD844 จำนวน 2 ตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 1ตัว และตัวต้านทาน 3 ตัว ขั้วแรงดันอินพุตที่กำหนดคือ V_{IN1} และ V_{IN2}ขั้วแรงดันเอาต์พุตเดียวที่กำหนดคือ V_{OUT} การวิเคราะห์วงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ ได้สมการแรงดันเอาต์พุตดังนี้

$$V_{OUT} = \frac{\frac{k}{R_1C_1}V_{IN1} - ksV_{IN2}}{s + \frac{k}{R_1C_1}} \quad (3)$$

ตารางที่ 1 ฟังก์ชั่นตอบสนองตามการกำหนดอินพุต

ฟังก์ชันตอบสนอง	**อินพุต**	
V_{OUT}	V_{IN1}	V_{IN2}
LP	V_{IN}	0
HP	0	V_{IN}
AP (เฟสล้าหลัง)	V_{IN}	V_{IN}

โดยที่ $k = R_3 / R_2$ จากสมการ (3) V_{IN1} และ V_{IN2} ที่กำนดตามตารางที่ 1 เพื่อให้วงจรกรองสัญญาณทำหน้าที่แต่แบบ ตารางที่ 1 ยังระบุด้วยว่าหน้าที่วงจรกรองสัญญาณลำดับที่หนึ่งแต่ละฟังก์ชั่นสามารถเลือกแบบดิจิทัลได้ ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{\frac{k}{R_1C_1}}{s + \frac{k}{R_1C_1}} \quad (4)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{-ks}{s + \frac{k}{R_1C_1}} \quad (5)$$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{\frac{k}{R_1C_1} - ks}{s + \frac{k}{R_1C_1}} \quad (6)$$

2.3 การวิเคราะห์วงจรกรณีไม่เป็นอุดมคติ

วงจรในกรณีที่ไอซี AD844 ซึ่งใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดคติสามารถวิเคราะห์และแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_X = \beta_Y V_Y ; I_Z = \alpha_X I_X ; I_Y = 0; V_W = \beta_Z V_Z \quad (7)$$

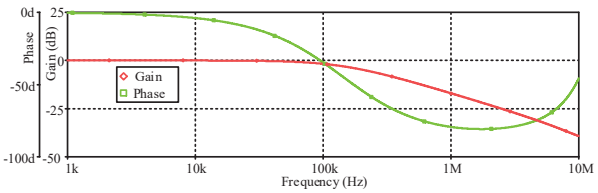
เมื่อพารามิเตอร์ β คือค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปยังเอาต์พุต และ α คือค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านกระแสจากอินพุตไปยังเอาต์พุต จะได้แรงดันเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอดังนี้

$$V_{OUT} = \frac{\beta_{Y1}\beta_{Y2}\beta_{Z1}\beta_{Z2}\alpha_{X1}\alpha_{X2}\left(\frac{k}{R_1C_1}\right)V_{IN1} - \beta_{Z2}\alpha_{X2}ksV_{IN2}}{s + \beta_{Y1}\beta_{Y2}\beta_{Z1}\beta_{Z2}\alpha_{X1}\alpha_{X2}\left(\frac{k}{R_1C_1}\right)} \quad (8)$$

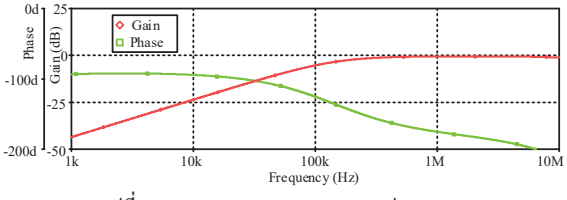
เมื่อพิจารณาสมการที่ (8) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีผลกระทบต่ออัตราขยายและความถี่คัทออฟ (cut-off frequency : f_C) ของวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอ

2.4 ผลการจำลองการทำงาน

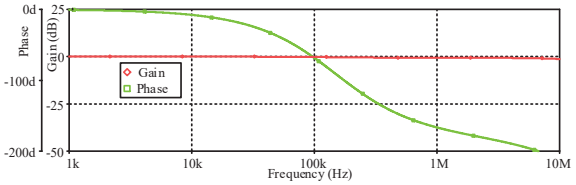
เพื่อเป็นการยืนยันและทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ จึงได้จำลองการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรม PSPICE โดยใช้ไอซี AD844 ซึ่งป้อนแรงดันไฟเลี้ยงวงจร ±5V เมื่อกำหนดให้ C_1= 1nF, R_1= R_2 = R_3 = 1 kΩ จากการคำนวณตามสมการที่ (4) – (6) ทำให้ได้ค่าความถี่คัทออฟ f_C = 159.15 kHz รูปที่ 4 – 6 แสดงผลตอบสนองขนาดและเฟสของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ วงจรกรองผ่านความถี่สูง และวงจรกรองผ่านทุกความถี่ จากรูปความถี่คัทออฟวัดได้มีค่า f_C =142.36 kHz ซึ่งมีค่าผิดพลาด 10.55 % จะเห็นได้ว่าวงจรที่นำเสนอสามารถกำหนดฟังก์ชั่นการตอบสนองได้สามแบบในวงจรเดียวกัน



รูปที่ 4 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ LP

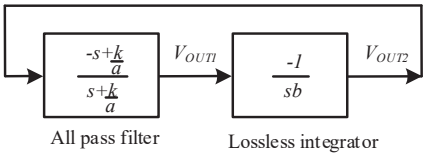


รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ HP

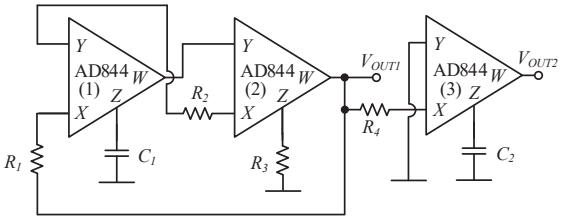


รูปที่ 6 ผลตอบสนองทางขนาดและเฟสของ AP

เพื่อเป็นการยืนยันผลโดยการประยุกต์ใช้วงจรกรองผ่านทุกความถี่และวงจรอินติเกรเตอร์แบบไม่สูญเสียเพื่อใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์ (quadrature oscillator) โดยมีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์



รูปที่ 8 วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์

จากวงจรรูปที่ 8 จะได้สมการคุณลักษณะของวงจรดังนี้

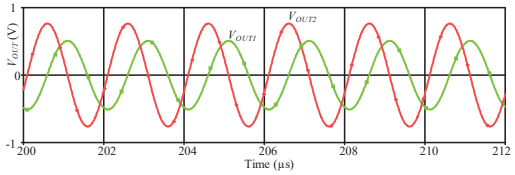
$$s^2 + \left(k - \frac{a}{b}\right)s + \frac{k}{ab} = 0 \quad (9)$$

โดยที่ $a = R_1C_1$, b = R_4C_2 และ $k = R_3/R_2$ จากสมการ (9) จะได้ค่าความถี่การกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Frequency: OF) และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition: OC) ดังนี้

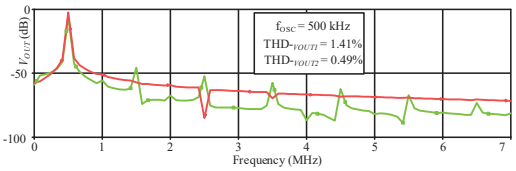
$$\text{OF:} \quad \omega_{OSC} = \sqrt{\frac{\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{R_1R_4C_1C_2}} \quad (10)$$

$$\text{OC:} \quad \frac{R_3}{R_2} \le \frac{R_1C_1}{R_4C_2} \quad (11)$$

เมื่อกำหนดให้ $C_1 = C_2 = 0.2$ nF, $R_1 = R_4 = 1$ kΩ, $R_2 = 10$ kΩ, $R_3 = 5$ kΩ จากการคำนวณตามสมการ (10) ทำให้ได้ค่า $f_{OSC} = 562.70$ kHz รูปที่ 9 – 10 แสดงสัญญาณคลอเดรเจอร์ที่วัดได้โดยค่า $f_{OSC} = 500$ kHz ซึ่งมีค่าความผิดพลาด 11.14 % และ ค่า THD ของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 1.41% และ 0.49%



รูปที่ 9 ผลตอบสนองช่วงอยู่ตัวของการกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 10 เสปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

3. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรกรองสัญญาณหลายหน้าที่โหมดแรงดันอันดับหนึ่งโดยใช้ไอซี AD844 จำนวน 2 ตัว ตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์ 1 ตัว และตัวต้านทาน 3 ตัว สามารถให้ฟังก์ชั่นการตอบสนองได้คือ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ, วงจรกรองผ่านความถี่สูง และวงจรกรองผ่านทุกความถี่ค่าคลาดเคลื่อนของความถี่คัทออฟถือว่าอยู่ในระดับปานกลางสามารถยอมรับได้ในระดับการใช้งานทั่วไปที่ความละเอียดไม่สูงมาก อัตราบริโภคกำลังงานเท่ากับ 120 mW จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Beg and S. Maheshwari, "Generalized filter topology using grounded components and single novel active element," *Circuits, Systems, and Signal Processing,* vol. 33, no. 11, pp. 3603-3619, 2014.

[2] S. Klungtong, D. Thanapatay, and W. Jaikla, "Three-Input Single-Output Voltage-Mode Multifunction Filter with Electronic Controllability Based on Single Commercially Available IC," *Active and Passive Electronic Components,* vol. 2017, no. 1, p. 5240751, 2017.

[3] วรพงศ์ ตั้งศิริรัตน์, "การออกแบบและสังเคราะห์วงจรกรองสัญญาณแอนะล็อกและวงจรออสซิลเลเตอร์," คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2558.

[4] Y. Maruyama, A. Hyogo, and K. Sekine, "A digitally programmable CMOS universal biquad filter using current-mode integrators," *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences,* vol. 85, no. 2, pp. 316-323, 2002.

[5] E. Yuce, R. Verma, N. Pandey, and S. Minaei, "New CFOA-based first-order all-pass filters and their applications," *AEU-International Journal of Electronics and Communications,* vol. 103, pp. 57-63, 2019.

[6] M. Dogan, E. Yuce, and Z. Dicle, "CFOA-based first-order voltage-mode universal filters," *AEU-International Journal of Electronics and Communications,* vol. 161, p. 154550, 2023.

[7] A. Suksawad, A. Charoenmee, S. Panikhom, K. Patimaprakorn, and A. Jantakun, "Design and practice of simple first-order all-pass filters using commercially available IC and their applications," *EUREKA: Physics and Engineering,* no. 3, pp. 40-56, 2022.

[8] M. Kumngern, F. Khateb, and T. Kulej, "Single EX-CCCII-Based First-Order Versatile Active Filter," *Applied Sciences,* vol. 14, no. 16, p. 7396, 2024.

[9] K. Bansal, J. Mohan, and B. Chaturvedi, "Voltage-Mode First-Order All-Pass Filter With Active Tuning," *Recent Patents on Engineering,* 2024.

[10] W. Jaikla *et al.*, "Reconfigurable voltage-mode first-order multifunction filter employing second-generation voltage conveyor (VCII) with complete standard functions and electronically controllable modification," *IEEE Access,* vol. 11, pp. 56152-56169, 2023.

[11] A. Lahiri, W. Jaikla, and M. Siripruchyanun, "First CFOA-based explicit-current-output quadrature sinusoidal oscillators using grounded capacitors," *International Journal of Electronics,* vol. 100, no. 2, pp. 259-273, 2013.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดควอเดรเจอร์ควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โดยใช้ไอซี LT1228

Electronically Adjustable Sinusoidal Quadrature Oscillator Using ICs LT1228

สุชาติ เขียวนอก[1] นิสิต องอาจ[1] สมคิด ฤทธิ์เนติกุล[2] ธนวัฒน์ เฉลิมพงษ์[3*] และ โกศล พิทักษ์สัตยาพรต[3]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
[3*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
E-mail:thanawat@pcru.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบควอเดรเจอร์ในโหมดแรงดัน โดยใช้วงจรไอซีเชิงพาณิชย์ LT1228 วงจรที่นำเสนอประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์ชนิดสูญเสียแบบกลับเฟสและวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและความถี่การกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และปรับได้อย่างอิสระผ่านกระแสไบอัสอินพุต วงจรประกอบด้วย LT1228 จำนวน 2 ตัว ตัวต้านทาน 5 ตัว และตัวเก็บประจุแบบลงกราวด์ 2 ตัว สามารถปรับอัตราขยายสัญญาณที่เอาต์พุตได้ ผลการจำลองด้วย PSPICE แสดงให้เห็นว่าวงจรที่นำเสนอให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับทฤษฎีที่คาดการณ์ไว้ โดยบริโภคพลังงานประมาณ 142 mW ที่แรงดันจ่าย ±5 V

คำสำคัญ: วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นซายน์, ไอซี LT1228, สัญญาณคลอเดรเจอร์

Abstract

This article presents a voltage-mode quadrature oscillator using current ICs LT1228. The proposed circuit is realized from an inverting lossy integrator and a non-inverting lossless integrator. The oscillation condition and oscillation frequency can be electronically/orthogonally controlled via input bias currents. The circuit consists of merely 2 LT1228, 5 resistors and 1 grounded capacitor. The output gain can be adjusted. The PSPICE simulation results are depicted, and the given results agree well with the theoretical anticipation. The power consumption is approximately 142 mW at ±5 V supply voltages.

Keywords: sinusoidal oscillator, ICs LT1228, quadrature

1. บทนำ

วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์แบบควอเดรเจอร์ (Quadrature Oscillators: QOs) เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ โดยมีหน้าที่สร้างสัญญาณซายน์สองชุดที่มีความแตกต่างของเฟสเท่ากับ 90 องศา ความสัมพันธ์ของสัญญาณในลักษณะควอเดรเจอร์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในหลายระบบ เช่น ระบบสื่อสาร, ระบบเครื่องมือวัด และระบบประมวลผลสัญญาณ เป็นต้น โดยใช้กับสัญญาณแบบซิงเกิลไซด์แบนด์ (SSB), การตรวจจับความไวต่อเฟสของสัญญาณ (Phase Sensitive Detection :PSD) เป็นต้น [1]

ความสามารถในการควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัยทำได้ง่ายโดยผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์หรือไมโครคอมพิวเตอร์ ดังนั้นการควบคุมความถี่การกำเนิดสัญญาณ (Frequency of oscillation : FO) และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Condition of oscillation : CO) สามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันและกระแสไฟฟ้า การออกแบบและใช้งานในรูปแบบวงจรรวม (Integrated circuit: ไอซี) โดยเฉพาะเทคโนโลยี CMOS ให้ข้อดีหลายประการเช่น ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ, มีขนาดกะทัดรัด, ความเร็วสูง, ใช้พลังงานต่ำ ฯลฯ ความคุ้มค่าจะเกิดขึ้นจากการผลิตวงจรรวมเหล่านี้ในปริมาณจำนวนที่มาก แต่ไม่คุ้มค่าสำหรับการออกแบบเฉพาะวัตถุประสงค์หรือปริมาณวงจรขนาดเล็กการออกแบบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ไอซีที่มีจำหน่ายเชิงพานิชย์ทั่วไปจะสะดวกและคุ้มค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับการผลิตชิปไอซี [2] ได้มีการนำเสนออย่างต่อเนื่องในการสังเคราะห์วงจรแอนะล็อก โดยเฉพาะการออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์โดยใช้ไอซีที่มีจำหน่ายทั่วไปเชิงพานิชย์ [3]–[12] ซึ่งบางวงจรยังมีข้อด้อยของวงจรดังนี้

- ไม่สามารถปรับอัตราขยายสัญญาณที่เอาต์พุตได้ [5]–[12]
- ไม่สามารถควบคุมได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [6], [7], [9], [12]

• ใช้ตัวเก็บประจุแบบลอยซึ่งไม่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นวงจรรวม [6], [7], [12]

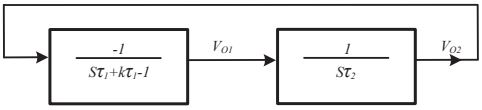
• ไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขและความถี่การกำเนิดสัญญาณได้อย่างอิสระจากกัน [6], [7]

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้น บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดควอเดรเจอร์โหมดแรงดัน โดยใช้ไอซี LT1228 ซึ่งเงื่อนไขและความถี่การกำเนิดสัญญาณสามารถควบคุมได้อย่างอิสระจากกัน

2. หลักการของวงจรที่สำเสนอ

2.1 หลักการแนวคิดในการสังเคราะห์วงจร

วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์สามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้บล็อกไดอะแกรมพื้นฐาน ในรูปที่ 1 วงจรย่อยประกอบด้วยวงจรอินติเกรเตอร์ชนิดสูญเสียแบบกลับเฟส และวงจรอินติเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐาน

จากรูปที่ 1 วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์จะได้สมการคุณลักษณะดังนี้

$$s^2\tau_1\tau_2 + s\tau_2\left(k\tau_1 - 1\right) + 1 = 0 \tag{1}$$

เมื่อ $s = j\omega$ จากสมการที่ (1) ค่าความถี่การกำเนิดสัญญาณและเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณจะได้ดังนี้

$$\text{OF:}\quad \omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{\tau_1\tau_2}} \tag{2}$$

$$\text{OC:}\quad k\tau_1 \le 1 \tag{3}$$

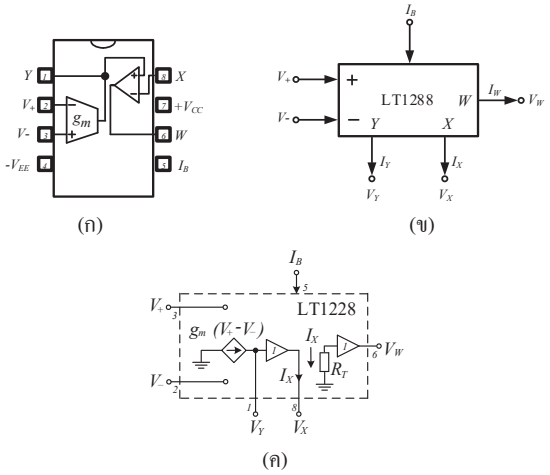
ความสัมพันธ์ขนาดและเฟสของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองของวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดคลอเดรเจอร์หาได้ดังนี้

$$\left|\frac{V_{O2}}{V_{O1}}\right| = \frac{1}{\tau_2\omega_{osc}} \tag{4}$$

$$\theta_{\frac{V_{O2}}{V_{O1}}} = -90° \tag{5}$$

2.2 วงจรที่นำเสนอ

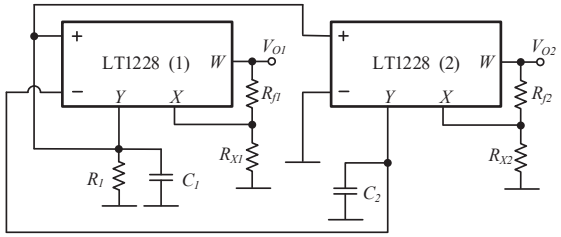
จากสมการที่ (2) เราสามารถกำหนดค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณโดยค่า τ_2 ซึ่งทำให้สามารถปรับเงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณได้โดยค่า τ_1 จากสมการที่ (3) เป็นอิสระจากกัน วิธีควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถดำเนินการโดยนำไอซีเชิงพาณิชย์ที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์วงจรในรูปที่ 2 แสดงวงจรที่ใช้ ไอซี LT1228 เป็น Operational Transconductance Amplifier (OTA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรขยายความนำถ่ายโอน โดย OTA สามารถปรับค่าอัตราขยายความนำถ่ายโอนได้ผ่านกระแสไบอัส I_B ตามสมการที่ (6) จึงเป็นที่นิยมโดยแพร่หลายสำหรับงานออกแบบและประยุกต์ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ [3], [4]



รูปที่ 2 ไอซี LT1228 (ก) ตำแหน่งขาไอซี (ข) สัญญาลักษณ์ทางไฟฟ้า (ค) วงจรสมมูล

$$g_m = 10I_B \tag{6}$$

วงจรที่นำเสนอในรูปที่ 3 เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ชนิดควอเดรเจอร์โหมดแรงดัน ซึ่งวงจรประกอบไปด้วยไอซี LT1228 จำนวน 2 ตัว, ตัวต้านทาน 5 ตัว และตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อีก 2 ตัว



รูปที่ 3 วงจรที่นำเสนอ

เมื่อได้วิเคราะห์วงจรกำเนิดสัญญาณซายน์ที่นำเสนอจะได้สมการคุณลักษณะดังนี้

$$s^2+\frac{g_{m1}}{C_1}\left(\frac{1}{g_{m1}R_1}-1\right)+\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}=0 \quad (7)$$

โดยความถี่และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณสามารถแสดงได้เป็น

$$\text{OF:}\quad \omega_{osc}=\sqrt{\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (8)$$

$$\text{OC:}\quad R_1g_{m1}\geq 1 \quad (9)$$

โดยมีอัตราขยายสัญญาณของ V_{O1} และ V_{O2} เป็น

$$\frac{V_{O1}}{V_{Y1}}=1+\frac{R_{f1}}{R_{X1}} \quad (10)$$

$$\frac{V_{O2}}{V_{Y2}}=1+\frac{R_{f2}}{R_{X2}} \quad (11)$$

2.3 การวิเคราะห์วงจรกรณีไม่เป็นอุดมคติ

วงจรในกรณีที่ OTA ซึ่งใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติ สามารถวิเคราะห์และแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_Z=g_m(\beta_+V_+-\beta_-V_-) \quad (12)$$

เมื่อพารามิเตอร์ β_+ และ β_- คือค่าความคลาดเคลื่อนของการส่งผ่านแรงดันจากอินพุตไปยังกระแสเอาต์พุต ซึ่งจะได้สมการคุณลักษณะของวงจรที่นำเสนอดังนี้

$$s^2+\frac{s(1-\beta_{1+}R_1g_{m1})}{R_1C_1}+\frac{\beta_{1-}\beta_{2+}g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2} \quad (13)$$

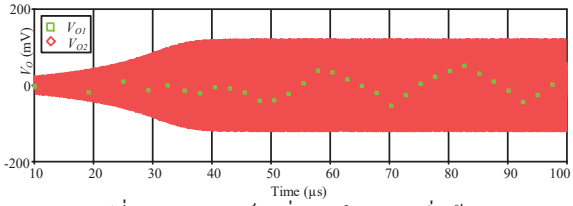
เมื่อพิจารณาสมการที่ (13) จะได้ค่าความถี่และเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณดังนี้

$$\text{OF:}\quad \omega_{osc}=\sqrt{\frac{\beta_{1-}\beta_{2+}g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (14)$$

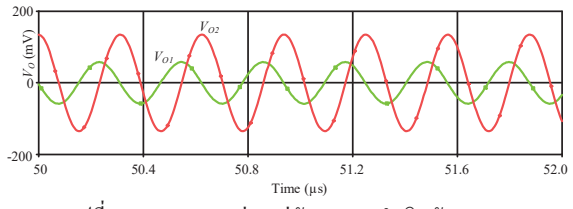
$$\text{OC:}\quad \beta_{1+}R_1g_{m1}\geq 1 \quad (15)$$

2.4 ผลการจำลองการทำงาน

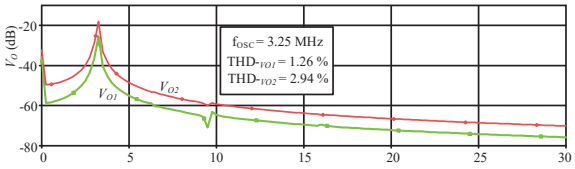
เพื่อเป็นการยืนยันและทดสอบสมรรถนะของวงจรที่นำเสนอ โดยได้จำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSPICE โดยใช้ไอซี LT1228 ซึ่งป้อนแรงดันไฟเลี้ยง ±5V ได้กำหนดค่าต่างให้กับวงจรดังนี้ $C_1=C_2=0.1$nF, $I_{B1}=100$ µA, $I_{B2}=500$ µA, $R_1=850\ \Omega$, $R_{X1}=R_{X2}=R_{f1}=R_{f2}=1$ k Ω จากการจำลองพบว่าแรงดันที่เอาต์พุตทั้งสองของวงจรเป็นรูปคลื่นไซน์ และมีความต่างเฟสกัน 90° ความถี่การกำเนิดสัญญาณเท่ากับ 3.25 MHz แต่จากการคำนวณตามสมการที่ (8) เท่ากับ 3.55 MHz มีค่าผิดพลาด 8.45 % โดยมีค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์รวม (THD) ประมาณ $V_{O1}=1.26$ % และ $V_{O2}=2.94$ % ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4 - 6 จากการปรับค่าอัตราขยายของ V_{O1} โดย $R_{f1}=4.2$ kΩ จะได้สัญญาณ V_{O1} ที่ถูกขยายดังรูปที่ 7 เมื่อปรับกระแสไบอัส I_{B2} ด้วยค่าต่าง ๆ จะได้ค่าความถี่จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีดังแสดงในรูปที่ 8



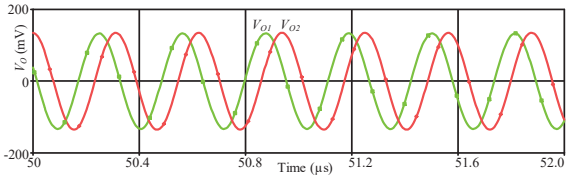
รูปที่ 4 สัญญาณเอาต์พุตชั่วขณะในสภาวะเริ่มต้น



รูปที่ 5 ผลตอบสนองช่วงอยู่ตัวของการกำเนิดสัญญาณ

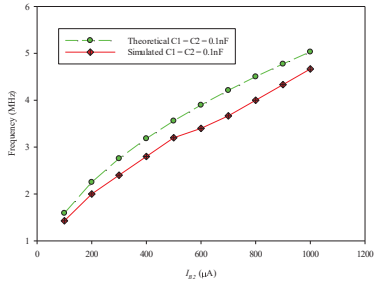


รูปที่ 6 เสปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุต

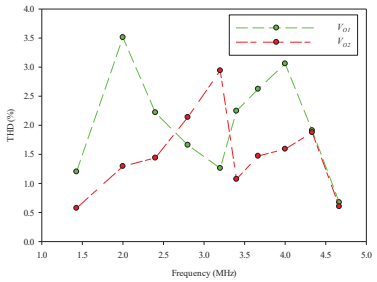


รูปที่ 7 ปรับอัตราขยายของสัญญาณเอาต์พุต V_{O1}

ค่า THD สัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนออยู่ในช่วง 0.57% - 3.51% แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความถี่ในการกำเนิดสัญญาณเมื่อเปลี่ยนกระแสไบอัส



รูปที่ 9 ค่าความผิดเพี้ยนทางฮามอนิกส์รวมของวงจรที่นำเสนอ

3. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปคลื่นไซน์ชนิดควอเดรเจอร์โหมดแรงดัน โดยใช้ไอซี LT1228 จำนวน 2 ตัวร่วมกับตัวต้านทาน 5 ตัว และตัวเก็บประจุต่อที่ลงกราวด์ 2 ตัว เงื่อนไขและความถี่การกำเนิดสัญญาณสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์และแยกอิสระจากกัน และสามารถปรับอัตราขยายสัญญาณที่เอาต์พุตได้ อัตราบริโภคกำลังงานเท่ากับ 142 mW จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE พบว่าวงจรทำงานได้สอดคล้องกับที่คาดการณ์ไว้

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ให้การสนับสนุน

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Jaikla, S. Adhan, P. Suwanjan, and M. Kumngern, “Current/voltage controlled quadrature sinusoidal oscillators for phase sensitive detection using commercially available IC,” in Sensors, vol. 20, no. 5, pp. 1319, 2020.

[2] S. Siripongdee and W. Jaikla, “Electronically controllable grounded inductance simulators using single commercially available IC: LT1228,” AEU-Int. Electron. Commun., vol. 76, pp.1-10, 2017.

[3] S. Pawasarn, A. Charoenmee, T. Janda, S. Fungdetch, K. Patimaprakorn, and A. Jantakun, "Implementation of Low-output-impedance Sinusoidal Oscillator and Its Modification for use in Filters," *Przeglad Elektrotechniczny,* vol. 97, no. 8, 2021.

[4] W. Jaikla, S. Adhan, P. Suwanjan, and M. Kumngern, "Current/voltage controlled quadrature sinusoidal oscillators for phase sensitive detection using commercially available IC," *Sensors,* vol. 20, no. 5, p. 1319, 2020.

[5] R. Nandi, K. Mathur, and P. Venkateswaran, "A linear electronically tunable quadrature oscillator," in *TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference*, 2017: IEEE, pp. 695-699.

[6] C. S. Pittala and A. Srinivasulu, "Quadrature oscillator using operational transresistance amplifier," in *2014 International Conference on Applied Electronics*, 2014: IEEE, pp. 117-120.

[7] M. Ghosh, S. S. Borah, A. Singh, and A. Ranjan, "Third order quadrature oscillator and its application using CDBA," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing,* vol. 107, pp. 575-595, 2021.

[8] R. Sotner *et al.*, "Comparison of two solutions of quadrature oscillators with linear control of frequency of oscillation employing modern commercially available devices," *Circuits, Systems, and Signal Processing,* vol. 34, pp. 3449-3469, 2015.

[9] T. S. Arora and A. K. Singh, "A new voltage mode sinusoidal quadrature oscillator employing second generation voltage conveyor," *AEU-International Journal of Electronics and Communications,* vol. 154, p. 154304, 2022.

[10] S. Roy and R. R. Pal, "Electronically tunable third-order dual-mode quadrature sinusoidal oscillators employing VDCCs and all grounded components," *Integration,* vol. 76, pp. 99-112, 2021.

[11] M. Kumngern, P. Suksaibul, F. Khateb, and T. Kulej, "Electronically tunable universal filter and quadrature oscillator using low-voltage differential difference transconductance amplifiers," *IEEE Access,* vol. 10, pp. 68965-68980, 2022.

[12] R. Bhagat, D. R. Bhaskar, and P. Kumar, "Quadrature sinusoidal oscillators using CDBAs: New realizations," *Circuits, Systems, and Signal Processing,* vol. 40, pp. 2634.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

สายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอปรับจูนด้วยสตับรูปวงแหวนและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานสามย่านความถี่ในระบบ 4G/5G

Tri-Band I-Shape Monopole Antenna with Ring and I-Shaped Stubs Tuning for 4G/5G Applications

สุวัฒน์ สกุลชาติ [1] ตฤณภพ บุญเส็ง [1] นิยวดี ศรีสุวรรณ [1] สมมาตร พรหมพุฒ [2] วัชรพล นาคทอง [3] และ ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล [4*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

[3]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[4*]สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

E-mail: phatsakul.th@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและจำลองโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปตัวไอที่ปรับจูนด้วยสตับรูปวงแหวนและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสำหรับประยุกต์ใช้งานสามย่านความถี่ในระบบ 4G/5G โดยใช้เทคนิคทางด้านการปรับจูนตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจนเป็นรูปตัวไอร่วมกับการเพิ่มสตับรูปวงแหวนคู่ที่ด้านหลังระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน ทำให้สามารถใช้งานความถี่ได้ 2 ย่านความถี่คือ 2.50 GHz และ 5.80 GHz และทำการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำให้สามารถใช้งานความถี่เพิ่มเป็น 3 ย่านความถี่คือ 2.50 GHz, 5.20 GHz และ 5.80 GHz ซึ่งมีอัตราการขยายทุกย่านความถี่มากกว่า 2 dBi ตอบสนองตามมาตรฐาน IEEE 802.11b/g ตามมาตรฐานในช่วงความถี่ต่ำของระบบ 4G IEEE 802.11b/g และระบบ 5G ในประเทศและต่างประเทศ LTE2500 โดยสายอากาศออกแบบบนแผ่นฟิล์มไม่ล่าร์โพลีเอสเทอร์ ที่มีค่าไดอิเล็กตริก (εr) เท่ากับ 3.3 และมีค่าความหนา (h) เท่ากับ 0.3 mm จำลองผลด้วยโปรแกรม Computer Simulation Technology (CST)

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, สตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, สตับรูปวงแหวน

Abstract

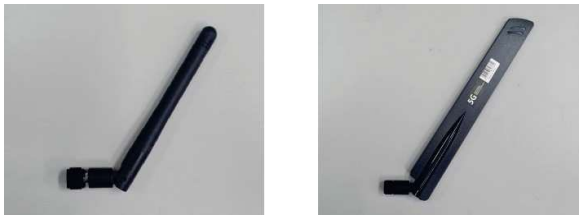
This article presents the design and simulation of an I-shaped monopole antenna structure tuned with ring and rectangular stubs for tri-band applications in 4G/5G systems. The design uses the technique of tuning a rectangular radiator into an I-shaped, combined with adding dual-ring stubs at the back of both ground planes. It allows the use of dual-band: 2.50 GHz and 5.80 GHz, and adding a rectangular stub enables the use of tri-band: 2.50 GHz, 5.20 GHz, and 5.80 GHz. Which has a gain of more than 2 dBi across all frequency bands, complying with the IEEE 802.11b/g standard in the low-frequency range of the 4G IEEE 802.11b/g system and the 5G system in both domestic and international LTE2500. The antenna is designed on a polyester film substrate with a dielectric constant (εr) of 3.3 and a thickness (h) of 0.3 mm, simulated using the Computer Simulation Technology (CST) program.

Keywords: monopole antenna, rectangular stub, ring stub

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารไร้สาย WiFi ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วในด้านของช่วงความถี่ใช้งานหรือระบบอุปกรณ์การรับ-ส่งสัญญาณและที่ขาดไม่ได้ คืออุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณที่เป็นหัวใจหลักคือสายอากาศ ซึ่งในการสร้างสายอากาศนั้นจะต้องศึกษาช่วงความถี่ใช้งานในระบบ WiFi 4G/5G ในประเทศไทยจะเป็นที่นิยมใช้งานตามมาตรฐาน คือ ความถี่ต่ำในระบบ 4G IEEE 802.11b/g 2.45 GHz (2.40-2.48 GHz) ระบบ 5G ในประเทศและต่างประเทศ LTE2500 (2.40-2.69 GHz) ความถี่สูง IEEE.802.16a 5.20 GHz (5.13-5.35 GHz) และ 5.8 GHz (5.725-5.825 GHz) [1-6] จากที่กล่าวมานั้น สายอากาศที่วางจำหน่ายตามท้องตลาดในปัจจุบัน สามารถใช้งานได้เพียงหนึ่งย่านความถี่คือที่ความถี่ต่ำ 2.45 GHz ดังรูปที่ 1(ก) และความถี่สูงที่ 5.20 GHz หรือใช้งานได้ทั้งสองย่านความถี่คือที่ความถี่ต่ำ 2.45 GHz และความถี่สูง 5.20 GHz หรือ ที่ความถี่ต่ำ 2.45 GHz และความถี่สูง 5.80 GHz ดังรูปที่ 1(ข) จากปัญหาที่ได้กล่าวมานั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านำมาพัฒนาให้สามารถใช้งานได้ 3 ย่านความถี่คือ

ความถี่ต่ำ 2.45 GHz ความถี่สูง 5.20 GHz และ 5.80 GHz โดยเลือกทำการปรับจูนตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าร่วมกับสตับรูปวงแหวนและสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [7-9] เพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานได้ 3 ย่านความถี่ดังกล่าว โดยใช้โปรแกรม CST ในการจำลองแบบเพื่อหาค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ดีที่สุด โดยขั้นตอนการออกแบบปรับจูนโครงสร้างสายอากาศจะนำเสนอดังนี้



(ก) 2.45 GHz (ข) 2.45 GHz และ 5.80 GHz

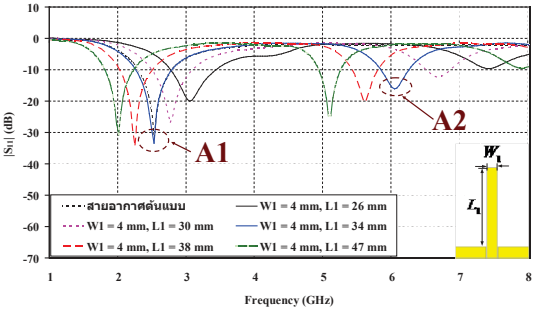
รูปที่ 1 สายอากาศใช้งานที่ 1 ย่านและ 2 ย่านความถี่

2. การออกแบบและการจำลองแบบสายอากาศ

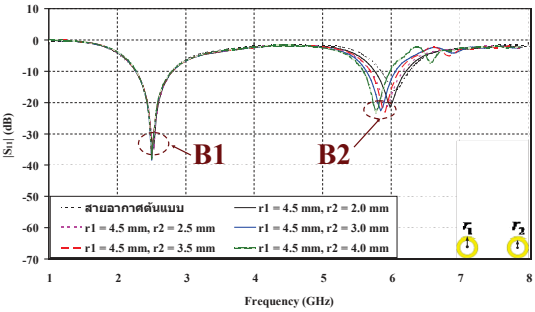
โครงสร้างสายอากาศแบบโมโนโพลรูปตัวสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [7-8] ถูกออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิดฟิล์มที่มีความหนา 0.3 mm และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 3.3 โดยใช้แผ่นโลหะทองแดงมีค่าความหนา t = 0.01 mm นำมาออกแบบเริ่มต้นที่ความถี่ใช้งาน WiFi (2.50 GHz) ด้วยใช้โปรแกรม CST จะมีการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศและเพิ่มสตับที่ด้านหลังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและรูปวงแหวนของสายอากาศ [9] โดยแสดงขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนแรกทำการศึกษาการปรับตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นรูปตัวไอ [7] เพื่อทำให้สายอากาศใช้งานได้ 2 ย่านความถี่คือ 2.50 GHz และ 5.80 GHz ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ค่าความกว้าง W_1 = 4.0 mm และเลือกปรับค่าความยาว L_1 ในการปรับจูนจะเลือกปรับตั้งแต่ 26, 30, 34, 38 และ 47 mm โดยค่าที่ดีที่สุดคือ W_1 = 4.0 mm และมีค่าความยาวคงที่ L_1 = 34 mm มีช่วงความถี่ต่ำ 22.57% (2.24 - 2.81 GHz) และช่วงความถี่สูง 7.76% (5.82 - 6.29 GHz) ซึ่งยังไม่ตอบสนองช่วงความถี่ 5.80 GHz ตามที่ต้องการ ดังจุด A1 ที่ส่งผลต่อช่วงความถี่ใหม่ดังจุด A2 ในรูปที่ 2

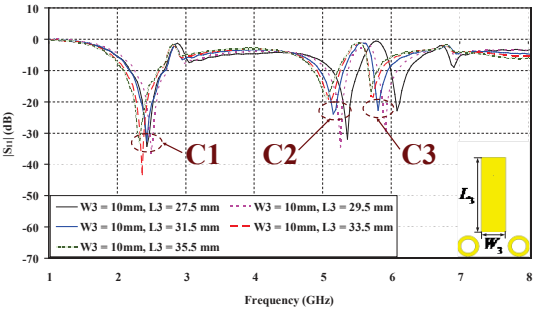
ขั้นตอนที่สองทำการศึกษาการเพิ่มสตับรูปวงแหวนคู่ที่ด้านหลังระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน [9] เพื่อทำให้สายอากาศใช้งานได้ 2 ย่านความถี่คือ 2.50 GHz และ 5.80 GHz ดังกล่าว ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของรัศมีวงนอก r_1 = 4.5 mm และเลือกปรับค่ารัศมีวงใน r_2 ในการปรับจูนจะเลือกปรับตั้งแต่ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 mm โดยค่าที่ดีที่สุดคือ r_2 = 3.0 mm มีช่วงความถี่ต่ำ 22.57% (2.24-2.81 GHz) และช่วงความถี่สูง 7.191% (5.63-6.05 GHz) ตอบสนองช่วงความถี่ 5.80 GHz ตามที่ต้องการดังจุด B1 ที่ส่งผลต่อช่วงความถี่ใหม่ดังจุด B2 ในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ผลการจำลองแบบค่า |S11| (dB) เมื่อปรับ W_1 และ L_1



รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับ r_2

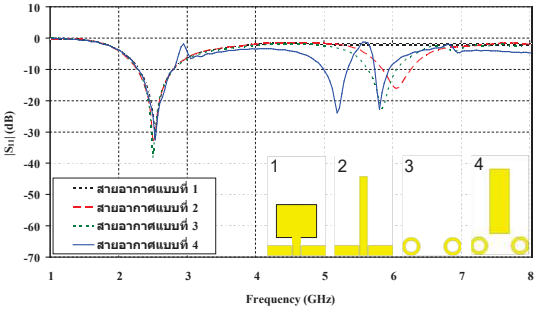


รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อปรับ W_3 และ L_3

จากขั้นตอนที่สองการปรับจูนยังไม่ทำให้สายอากาศใช้งานได้ 3 ย่านความถี่ ในขั้นตอนที่สามได้ทำการศึกษาการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านหลังของปรับตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [7-8] ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ค่าความกว้าง W_3= 10 mm และเลือกปรับค่าความยาว L_3 ในการปรับจูนจะเลือกปรับตั้งแต่ 27.5, 29.5, 31.5, 33.5 และ 35.5 mm โดยค่าที่ดีที่สุดคือ W_3 = 10 mm และมีค่าความยาวคงที่ L_3 = 31.5 mm มี

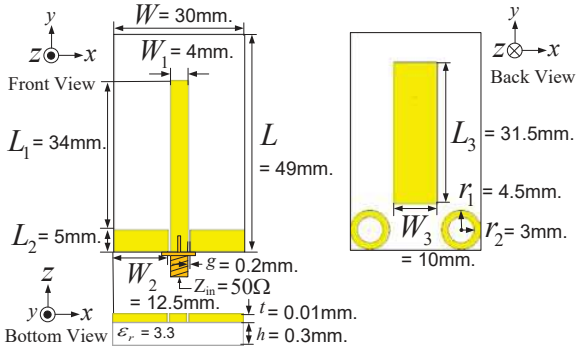
ช่วงความถี่ต่ำ 22.57% (2.24-2.81 GHz) ช่วงความถี่สูง 5.65% (4.98-5.27 GHz) และช่วงความถี่สูง 3.94% (5.71-5.94 GHz) ตอบสนองสามย่านความถี่ตามที่ต้องการ ดังจุด C1 – C3 ในรูปที่ 4

ในส่วนของการเปรียบเทียบผลจากการปรับตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบที่ 1 จนกลายเป็นรูปตัวไอ ในแบบที่ 2 แล้วทำการเพิ่มสตับรูปวงแหวนคู่ที่ด้านหลังระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน ในแบบที่ 3 และการเพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ด้านหลังของตัวแผ่พลังงานในแบบที่ 4 สามารถแสดงผลการปรับจูนที่ส่งผลให้ได้ความถี่ใช้งานทั้ง 3 ช่วงความถี่ จะได้แสดลผลที่ชัดเจนดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) ทั้ง 4 แบบ

โดยจากการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคที่กล่าวมาแสดงให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากที่สุด ดังรูปที่ 6



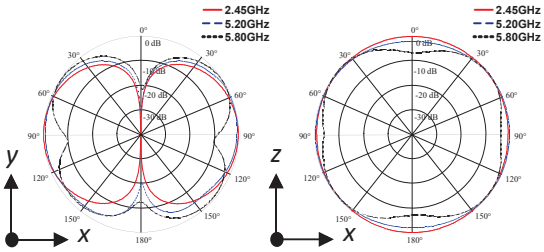
รูปที่ 6 โครงสร้างสายอากาศ

การเปรียบเทียบผลการจำลอง โครงสร้างสายอากาศเพื่อแสดงให้เห็นช่วงความถี่ใช้งาน WiFi 2.50 GHz, 5.20 GHz และ 5.80 GHz ได้ชัดเจนมากขึ้นดังตารางที่ 1

ส่วนสุดท้ายทำการจำลองแบบของการแผ่พลังงานในรูปแบบสนามไฟฟ้า (E-plane) ระนาบ x-z ดังรูปที่ 7 และแบบรูปสนามแม่เหล็ก (H-plane) ระนาบ y-z ที่ความถี่ 2.50 GHz, 5.20 GHz และ 5.80 GHz พบว่าสายอากาศมีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางดังรูปที่ 7

ตารางที่ 1 ผลการจำลองคุณสมบัติของสายอากาศ

Frequency (GHz)	S_{11} (dB)	VSWR	Z_{in} (Ω)	Gain (dBi)	BW (dB)
2.50	- 32.55	1.16:1	54.30+j16.77	2.25	2.25 – 2.83
5.20	- 23.90	1.28:1	43.85-j26.27	3.85	4.99 – 5.27
5.80	-22.24	1.27:1	42.38+j20.86	5.23	5.71 – 5.94



(ก) ระนาบ E (ข) ระนาบ H

รูปที่ 7 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 2.50 GHz, 5.20 GHz และ 5.80 GHz

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล ปรับจูนเป็นรูปตัวไอร่วมกับการเพิ่มสตับรูปวงแหวนทำให้ได้ 2 ย่าน คือ ความถี่ต่ำ 2.50 GHz และความถี่สูง 5.80 GHz และได้เพิ่มสตับรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำให้ได้ความถี่เพิ่มเป็น 3 ย่าน คือช่วงความถี่ต่ำ 22.57% (2.24-2.81 GHz) ช่วงความถี่สูง 5.65% (4.98-5.27 GHz) และช่วงความถี่สูง 3.94% (5.71-5.94 GHz) มีค่าอัตราขยาย 2.25 dBi, 3.85 dBi และ 5.23 dBi ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง โดยโครงสร้างสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้ มีขนาดกะทัดรัด ขั้นตอนการออกแบบมีความซับซ้อนน้อยกว่างานวิจัยก่อนหน้า [7-8] สามารถนำไปใช้กับระบบ MIMO ซึ่งมีช่วงความถี่ใช้งานที่ครอบคลุมการส่งสัญญาณไร้สาย WiFi ในงานวิจัยถัดไปคณะผู้วิจัยจะได้นำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ เพื่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ Access Point ทั้งแบบสายอากาศเดี่ยวและแบบ MIMO ต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST

เอกสารอ้างอิง

[1] W. A. Awan, T. Islam, F. Alsunaydih, F. Alsaleem and K. Alhassoonc, "Dual-Band MIMO Antenna with Low Mutual Coupling for 2.4/5.8 GHz Communication and Wearable Technologies," in PLos one, vol. 19, no. 4, pp. 1-22, 2024, doi: 10.1371/journal.pone.0301924.

[2] S. Mekki et al., "Design and Investigation of Orthogonal Hybrid Dual-Mode Single-CDR-Based MIMO Antenna with High Self-Isolation at 5.8 GHz," in IEEE Access, vol. 12, pp. 187234-187254, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3467035.

[3] J. Wu, G. M. Yang, Y. Wang, N. Yan and Y. Q. Jin, "Metal-Frame Slot Antenna With a Small Ground Clearance for the Wi-Fi 6E Operation in Laptop Applications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Early Access Article, pp. 1-6, 2025, doi: 10.1109/TAP.2025.3526895.

[4] M. Budania, B. Singh and V. Satam, "A Trident Shaped EBG Integrated Monopole Antenna for Wearable Applications. In Technologies for Energy," in Agriculture, and Healthcare, pp. 267-276, 2025.

[5] C. S. R. Krishna, P. Livingston, S. J. Chandra, J. H. Babu and K.S. Babu, "Multi‐Band Self‐Grounding Antenna for Wireless Technologies," in Quantum Computing Models for Cybersecurity and Wireless Communications, pp. 169-181, 2025.

[6] N. Chudpooti et al., "Implementing A Triple L-shape Resonator on A Monopole Antenna for Multiband Operation in WLAN, WiMAX, 4G LTE, and 5G Sub-6G Networks," in ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, vol. 23, no. 1, pp 1-10, 2025.

[7] Y. Xu et al., "A Compact Multi-Band Monopole Antenna for 5G NR Coal Mine Applications," in Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 115, pp. 57-62, 2024, doi:10.2528/PIERL23102302.

[8] Z. G. Wang, R. You, M. Yang, J. Zhou and M. Wang, "Design of a Monopole Antenna for WiFi-UWB Based on Characteristic Mode Theory," in Progress In Electromagnetics Research M, vol. 125, pp. 107-116, 2024, doi:10.2528/PIERM24012611.

[9] P. R. Meher and S. K. Mishra, "Design and Development of Mathematical Equivalent Circuit Model of Broadband Circularly Polarized Semi-Annular Ring-Shaped Monopole Antenna," in Progress In Electromagnetics Research C, vol. 129, pp. 73-87, 2023, doi:10.2528/PIERC22120909.



สุวัฒน์ สกุลชาติ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband, IoT applications



สมมาตร พรหมพุฒ กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาคสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกงานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband, IoT applications



วัชรพล นาคทอง สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาคสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานงานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband MIMO, Antenna Sensor



ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลขอนแก่น พ.ศ.2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ ประจำภาค สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานงานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Filter Design

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวัดค่าความชื้นในไม้ยูคาลิปตัสด้วยคลื่นความถี่สูงสำหรับใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม

Moisture Measurement in Eucalyptus Wood by Microwave for Industrial plants

สุวัฒน์ สกุลชาติ [1] วิกร วงษ์เสถียร [1] วราภรณ์ ลือใจ [1] วารุณี ศรีสงคราม [1] สมมาตร พรหมพุฒ [2] และวัชรพล นาคทอง [3*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

[3*]สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

E-mail: Watcharaphon.na@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการวัดค่าความชื้นในไม้ยูคาลิปตัสด้วยคลื่นความถี่สูงอาศัยการวัดผ่านสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐานร่วมกับสตับรูปตัวยูซึ่งเพิ่มอัตราขยายและควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นด้วยแผ่น EBG รูปกองไม้ ที่จัดวางแบบ 6x6 เพื่อรองรับย่านความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานรอง FR4 ค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดงที่ตัวแผ่พลังงานเท่ากับ 0.017 mm ค่าความหนาวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.764 mm มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 และแผ่น EBG สร้างจากวัสดุตัวนำทองแดงซึ่งเป็นตัวส่งผ่านพลังงานมีค่าความหนาเท่ากับ 0.1 mm วางอยู่ในแผ่นฟิล์มโพลีเอสเทอร์ โดยโครงสร้างสายอากาศต้นแบบร่วมกับแผ่น EBG มีผลต่อการตอบสนองที่ย่านความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6.03 dB และผลการทดลองวัดค่าความชื้นในท่อนไม้ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Nano VNA ซึ่งวัดค่าความชื้นตั้งแต่ 1 - 100% wb แสดงค่ากำลังงานอยู่ในช่วง 0.099 ถึง 0.018 mW หรือ -10.026 dBm ถึง -17.447 dBm ตามลำดับ โดยที่ค่าความชื้นในไม้ตั้งแต่ 1 - 50% wb มีค่ากำลังงานที่แตกต่างกันชัดเจนที่สุดอยู่ในช่วง 0.036 ถึง 0.023 mW หรือ -14.437 dBm ถึง -16.382 dBm ตามลำดับ

คำสำคัญ: รูปตัวยู, รูปกองไม้, ไม้ยูคาลิปตัส, ความชื้น

Abstract

This article presents a study on measuring the moisture content in eucalyptus wood by microwave, employing a basic rectangular microstrip antenna along with a U-shaped stub that enhances gain and controls the radiation pattern direction with an EBG plate shaped like a woodpile, arranged in 6x6 units to support the 2.45 GHz frequency range. The antenna is fabricated on an FR4 substrate. The thickness of the copper material of the radiator is 0.017 mm, the thickness of the substrate is 0.764 mm, and the dielectric constant (εr) is 4.3. The EBG plate is fabricated from copper, which acts as a power transmitter with a thickness of 0.01 mm, and placed in a polyester film. The prototype antenna structure with the EBG plate affects the response in the 2.45 GHz frequency range, with a gain of 6.03 dBi. The experimental results of measuring the moisture content in wood using the Nano VNA network analyzer, which measures moisture content from 1 to 100% wb, show that at power output ranges of 0.099 to 0.018 mW or -10.026 dBm to -17.447 dBm, respectively. While the moisture content in wood ranges from 1 - 50% wb, the power values differ significantly within the range of 0.036 to 0.023 mW or -14.437 dBm to -16.382 dBm, respectively.

Keywords: U-shaped, woodpile, eucalyptus wood, moisture

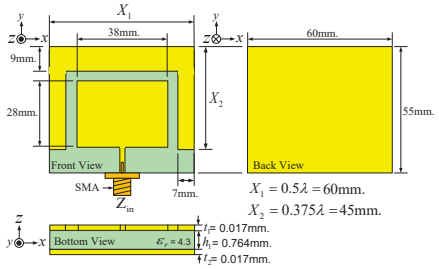
1. บทนำ

การผลิตถ่านจากไม้ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม เริ่มจากภูมิปัญญาที่สืบทอดกันมาอย่างยาวนาน โดยไม้ที่นิยมนำมาผลิตถ่านในประเทศไทย ได้แก่ ไม้โกงกาง ไม้มะขามเทศ ไม้ก้ามปู ไม้ยูคาลิปตัส และไม้ไผ่ เป็นต้น [1-3] ซึ่งถ่านไม้ยูคาลิปตัสจะให้พลังงานความร้อนสูงสุด [3-5] โดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้ถึง 7,400 แคลอรีต่อกรัม อีกทั้งยังมีข้อดีคือราคาถูกและหาได้ง่ายในประเทศไทย ในส่วนของการผลิตถ่านคุณภาพสูงจากไม้ยูคาลิปตัสจำเป็นต้องควบคุมความชื้นของเนื้อไม้ก่อนเผา ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เครื่องวัดความชื้นที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเครื่องวัดความชื้นที่มีประสิทธิภาพสูงเหล่านี้จะมีราคาแพงและส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้การผลิตถ่านคุณภาพสูงเป็นเรื่องยาก โดยเฉพาะสำหรับผู้ผลิตรายย่อย จากปัญหาที่กล่าวมานั้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาพัฒนาระบบวัดความชื้นด้วยการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [6] ร่วมกับสตับรูปตัวยู [7-8] เพื่อช่วยส่งผ่านพลังงานและควบคุมทิศทางการแพร่กระจายคลื่นด้วยแผ่น EBG รูปกอง

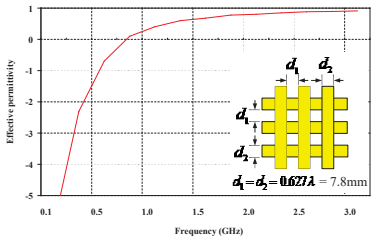
ไม้ แบบ 6x6 [9] ที่เป็นตัวรับ-ส่งสัญญาณผ่านไม้ยูคาลิปตัสด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัดด้วยเครื่องรับสัญญาณความถี่ [9-12] ซึ่งออกแบบสายอากาศและการวัดค่าความชื้นของไม้จะได้นำเสนอในหัวข้อไปต่อนี้

2. การออกแบบและวัดผลคุณสมบัติของสายอากาศ

สายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าพื้นฐาน [6] ร่วมกับสตับรูปตัวยู [7-8] ออกแบบใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยเลือกใช้วัสดุฐานรอง FR4 ค่าความหนาของฐานรอง (h_1) เท่ากับ 0.764 mm ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.3 ค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดงตัวแผ่พลังงาน (t_1) กับระนาบกราวด์ (t_2) เท่ากับ 0.017 mm ดังรูปที่ 1(ก) และค่าความหนาของวัสดุตัวนำทองแดงแผ่น EBG เท่ากับ 0.1 mm ค่าความนำทองแดง $\sigma = 5.8\times10^7$ S/m หลังจากนั้นทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST ดังรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ช่วงความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ร่วมถึงแผ่น EBG ทำงานที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ซึ่งมีค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้า (Effective Permittivity Strip Line Medium) เข้าใกล้ 1 ตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 1(ข)



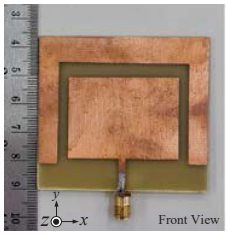
(ก) สายอากาศไมโครสตริป

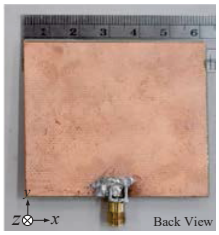


(ข) สายอากาศร่วมกับแผ่น EBG

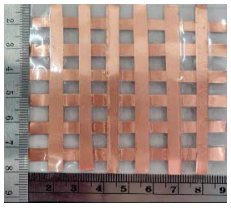
รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปและแผ่น EBG

โดยมีค่าอัตราขยาย เริ่มต้นเท่ากับ 5.98 dB หลังใส่สตับรูปตัวยูมีค่าเท่ากับ 6.31 dB และเพิ่มแผ่น EBG รูปกองไม้ [9-12] มีค่าเท่ากับ 6.75 dB ตามลำดับ จึงนำมาสร้างสายอากาศ ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำการวัดผลของสายอากาศสร้างจริงร่วมกับแผ่น EBG ระยะห่างเท่ากับ 12 mm ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น E5071C ค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้นตามที่ต้องการ ค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ย่านความถี่ใช้งาน 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้นเท่ากับ 6.03 dB ดังรูปที่ 3 และแบบรูปการแผ่พลังงานดังรูปที่ 4 ซึ่งการเปรียบเทียบคุณสมบัติสายอากาศแสดงดังตารางที่ 1

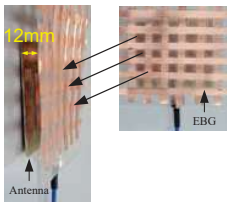




(ก) สายอากาศไมโครสตริปต้นแบบ

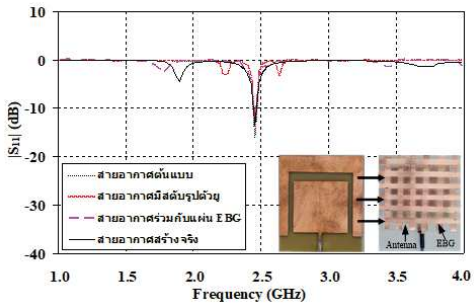


(ข) แผ่น EBG แบบ 6x6

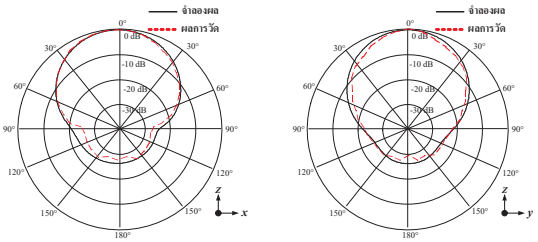


(ค) สายอากาศร่วมกับแผ่น EBG

รูปที่ 2 สายอากาศไมโครสตริปต้นแบบร่วมกับแผ่น EBG



รูปที่ 3 ผลวัดค่า $|S_{11}|$ (dB) สายอากาศไมโครสตริปแผ่นร่วมกับแผ่น EBG

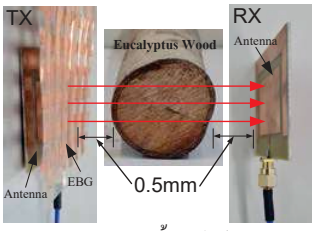


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

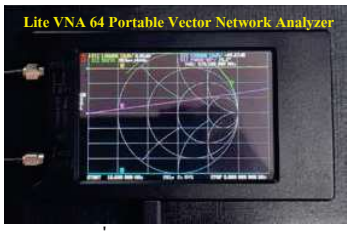
รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศไมโครสตริปร่วมกับแผ่น EBG

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลคุณสมบัติของสายอากาศ

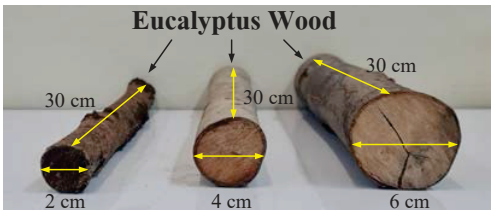
สายอากาศ 2.45 GHz	$\lvert S_{11}\rvert$ (dB)	VSWR	Bandwidth (GHz)	Gain (dB)	
				ไม่มี EBG	มี EBG
จำลองผล	-12.93	1.41	2.40 - 2.46	6.31	6.75
ผลการวัด	-13.55	1.47	2.39 - 2.45	5.28	6.03



(ก) ระบบตรวจวัดความชื้นในไม้ยูคาลิปตัส



(ข) เครื่อง Nano VNA 6.1 GHz

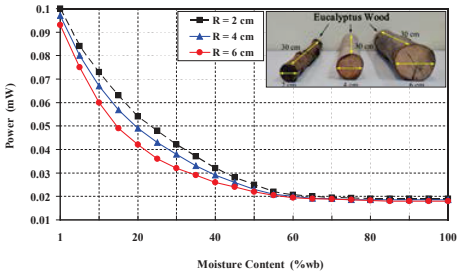


(ค) ไม้ทั้ง 3 ขนาด

รูปที่ 5 ระบบการวัดค่าความชื้นและไม้ทั้ง 3 ขนาด

3. การวัดค่าความชื้นของไม้ด้วยคลื่นความถี่

การทดลองวัดค่าความชื้นในไม้ด้วยสายอากาศร่วมกับแผ่น EBG ดังรูปที่ 5(ก) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Nano VNA ใช้งานช่วงความถี่ 2.45 GHz [11-12] ที่กำหนดค่าความแรงในการส่งที่ 0 dBm ดังรูปที่ 5(ข) วัดที่ระยะห่างที่ดีที่สุด 12 mm ดังรูปที่ 5(ก) ซึ่งไม้ที่นำมาวัดมีค่าความชื้นด้วยเครื่อง Hot Air Oven วัดตั้งแต่ช่วง 1 - 100% wb มีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อนละประมาณ 2 cm, 4 cm และ 6 cm ดังรูปที่ 5(ค) ทำการวัดผล 10 ครั้งต่อท่อน จากการทดลองพบว่าที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 cm มีค่าตั้งแต่ 0.099 ถึง 0.019 mW หรือ -10.026 dBm ถึง -17.167 dBm ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 cm มีค่าตั้งแต่ 0.097 ถึง 0.018 mW หรือ -10.128 dBm ถึง -17.328 dBm และที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 cm มีค่าตั้งแต่ 0.093 ถึง 0.018 mW หรือ -10.301 dBm ถึง -17.447 dBm ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 6 ผลการวัดที่กล่าวมานั้น ในช่วงค่าความชื้นตั้งแต่ 1 - 50% wb มีค่าแตกต่างกันของไม้ทั้ง 3 ขนาด เป็นไปตามที่ต้องการ และในช่วงค่าความชื้นตั้งแต่ 51 - 100% wb มีค่าแตกต่างที่น้อยมาก มีค่าประมาณ -16.575 dBm ถึง -17.447 dBm เนื่องจากค่าความชื้นในไม้ที่มีค่าประมาณ 51 - 100% wb ดังกล่าว การแพร่กระจายพลังงานจากการส่งผ่านในไม้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถวัดผลหาความแตกต่างได้ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลการวัดค่าความชื้นของไม้ทั้ง 3 ขนาด

4. สรุปผลการวิจัย

การวัดค่าความชื้นในไม้ยูคาลิปตัส ด้วยสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเพิ่มสตับรูปตัวยูร่วมกับแผ่น EBG รูปกองไม้ แบบ 6 x 6 ออกแบบที่ย่านความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้รูปแบบการแผ่พลังงานและค่าอัตราขยายครอบคลุมพื้นที่ของท่อนไม้ตามที่ต้องการ จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ที่ช่วงความถี่ใช้งาน 2.47% (2.39 -2.45 GHz) มีอัตราขยายเท่ากับ 6.03 dB ซึ่งมีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบเจาะจงทิศทาง ในส่วนของการวัดใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Nano VNA 6.1 GHz วัดไม้ 3 ขนาด ที่มีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2 cm, 4 cm และ 6 cm วัดค่าความชื้นตั้งแต่ 1 - 100% wb พบว่าการวัดด้วยคลื่นความถี่สูงสามารถหาค่าความแตกต่างที่ชัดเจนของไม้ทั้ง 3 ขนาดจากค่าความชื้นได้ตั้งแต่ 1 - 50% wb ซึ่งช่วยลดเวลาการอบไล่ความชื้นและลดค่าใช้จ่ายได้ 50-70% ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส โดยสายอากาศที่นำเสนอมีข้อดีด้านโครงสร้างของสายอากาศตัวรับ-ส่งที่มีขนาดเล็กกว่างานวิจัย [11, 12] และสามารถหาค่าความแตกต่างทางขนาดของไม้ที่มีความชื้นสูงได้ดีกว่างานวิจัย [12] อยู่ประมาณ 20% ซึ่งผู้วิจัยจะได้มุ่งเน้นในการนำผลการวิจัยไปพัฒนาปรับเปลี่ยนย่านความถี่ใช้งานที่เหมาะสมกับไม้ยูคาลิปตัสไปทดลองกับไม้ในชนิดที่แตกต่างกันต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรมจำลองแบบและเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายวัดผลคุณสมบัติสายอากาศ

เอกสารอ้างอิง

[1] W. Homjabok, K. Nuilek, N. Posungnoen and H. Humthaisong. (2024). กระบวนการสเฟียร์รอยไคชิงและการนำไปใช้กับ กระบวนการแพ็กคาร์เบอร์ไรชิง. *RMUTP Research Journal Sciences and Technology*, 18(1), 186-197.

[2] เอื้อมพร รัตนสิงห์ โชคชัย แจ่มอำพร และอภิชาติ จิณแพทย์. (2024). การดูดซับตะกั่ว (II) และสังกะสี (II) ไอออนในน้ำเสีย

สังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ได้จากเปลือกและเมล็ดมะขาม. *วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 19(1), 77-91.

[3] N. Phimpabutra. (2020). ผลของชนิดเนื้อไม้ต่อลักษณะเฉพาะอุณหภูมิเผาไหม้และคุณสมบัติของถ่านที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสอุณหภูมิสูง. *Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal*, 12(16), 50-60.

[4] A. Heman, S. Reungrit, P. Kraisoda, W. Heman and S. Raungsan. (2022). การพัฒนาเตาเผาถ่านไม้หุงต้มมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. *Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation*, 1(1), 1-10.

[5] P. Chunkaew, A. Khadwilard, A. Tevata, C. Thawonngamyingsakul and S. Kosalanun. (2024). ผลของพารามิเตอร์ควบคุมก๊าซไอเสียของการคาร์บอไนเซชั่นชีวมวลร่วมกับขดลวดความร้อนต่อการผลิตถ่านบัวสำหรับการดูดกลิ่น. *Frontiers in Engineering Innovation Research*, 22(2), 93-103.

[6] C. A. Balanis. Antenna theory: analysis and design. 2015, John wiley & sons.

[7] L. Hasan, M. Nassr, M. Anbar and H. A. A. Alasadi, "Inverted U-Shaped Frequency Reconfigurable Microstrip Patch Antenna for 5G Communication Systems," in Óptica Pura y Aplicada, vol. 56, no. 3, 2023, doi: 10.7149/OPA.56.3.51153.

[8] A. Khabba et al., "High Gain Double U-Shaped Slots Microstrip Patch Antenna Array for 28 GHz 5g Applications," 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA), 2022, pp. 1589-1592, doi: 10.1109/DASA54658.2022.9765096.

[9] F. Frezza, L. Pajewski, E. Piuzzi, C. Ponti and G. Schettini, " Radiation-Enhancement Properties of An Xband Woodpile EBG and Its Application to A Planar Antenna," Int. J. Antenn. Propag. 2014, pp. 729187.

[10] C. Ponti, P. Baccarelli, S. Ceccuzzi and G. Schettini, "3D Additive Manufacturing of Tapered EBG Layers for A Resonant-Cavity Antenna," Proceedings of the 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 2022, pp. 564-568, doi: 10.1109/MELECON53508.2022.9843130.

[11] W. Naktong, S. Prapakarn, N. Prapakarn and N. Wattikornsirikul, "Cantenna Adjustment with 1×6 Woodpile Shaped EBG for Application in Goat Manure Moisture Content and Bulk Density Monitoring," in Progress in Electromagnetics Research C, vol. 126, pp. 49-62, 2022, doi: 10.2528/PIERC22082801.

[12] W. Naktong et al., "An Adjusted Waveguide Antenna with A Woodpile-Shaped EBG for Eucalyptus Wood Moisture Content Measurement, " in Trends in Sciences, vol. 21, no. 6, pp. 7645, doi:10.48048/tis.2024.7645.



สุวัฒน์ สกุลชาติ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาคสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband, Wireless Power Transfer, IoT applications



วิกร วงษ์เสถียร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา Energy and Environment Technology Management จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ งานวิจัยที่สนใจ Energy Conservation, Power Transfer, Illumination, IoT applications



สมมาตร พรหมพุฒ กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำภาคสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband, IoT applications



วัชรพล นาคทอง สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พ.ศ.2565 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาคสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design and Wireless Communication, Ultra-Wideband MIMO, Antenna Sensor

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

Design and Implementation of Graphene Sheet Monopole UHF 860-960 MHz RFID Tag Antenna for Transportation and Logistics

Prach Asavanarakul [1*] Aran Asavanarakul [1] Phongsuk Ampha [1]
Suwat Sakulchart [2] Thanat Sooknuan [3] and Nikorn Kaewpraek [4]

[1*]Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani
[2]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Ayutthaya
[3]Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima
[4]Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Pathum Thani
E-mail: prach_a@rmutt.ac.th, prach.d@en.rmutt.ac.th*

Abstract

Transportation and logistics connect people, whether it is a neighboring country or a different continent of the world. In every region including Thailand, the volume of vehicles traveling through border crossings and ports has increased significantly. Radio frequency identification (RFID) has been proposed as a new method to identify and authenticate vehicles and containers crossing borders. The RFID tag sticker adheres to the acceptable surface location of vehicles and containers. In general, these tag stickers will make border crossings more secure and efficient. This article focuses on designing an RFID tag antenna for use as a tag sticker attached to a vehicle windscreen. The rectangular-shape graphene sheet monopole antenna is proposed for this situation. The UHF 860-960 MHz frequency band was chosen for this research. The proposed antenna is mathematically designed and analyzed with a CST simulator to determine the optimum parameters. The design parameters are then used to implement an antenna on a prepared graphene sheet. The proposed antenna provides a bandwidth of approximately 200 MHz from 840 to 1,040 MHz. The best reflection coefficient occurred at 936 MHz with a value of -28.208 dB. The radiation is an Omnidirectional pattern. When the tag antenna was attached to the windscreen, the frequency response shifted to a lower frequency range of 715 to 965 MHz. However, it still covered the UHF RFID frequency band. The proposed antenna is small, inexpensive, and can be bent along the curved surface of windscreen while maintaining acceptable wave propagation.

Keywords: graphene, graphene antenna, radio frequency identification: RFID, Transportation and logistics

1. Introduction

In the previous research article, a Graphene-based RFID tag antenna was proposed for improving vehicular border crossing efficiency and security [1]. This monopole, rectangular-shaped RFID tag antenna is designed as a sticker that can be attached to a vehicle's windscreen. It operates in the 2.4 MHz microwave RFID frequency band and offers several advantages, including a wide bandwidth, compact size, and potential for widespread future use. However, it is important to note that other components, such as integrated circuits (ICs) and reader modules operating in the microwave band, are still relatively expensive compared to those in the ultrahigh-frequency (UHF) band. Therefore, this research aims to redesign the monopole rectangular-shaped RFID tag antenna to operate in the UHF frequency range of 860-960 MHz, making it more cost-effective for transportation and logistics applications.

In recent years, many companies have begun offering graphene sheets for flexible electronic applications. These new graphene sheets have high conductivity levels of up to S/m. They are also inexpensive, flexible, and easy to cut to fit specific designs. We believe that these properties make them suitable for use in graphene tag antennas for RFID applications. This research article proposes the development of a RFID sticker tag antenna based on graphene sheets. The objective of the research is to design, verify, and propose a graphene sheet monopole UHF RFID tag antenna operating in the 860-960 MHz frequency range for use in transportation and logistics.

2. Graphene Antenna Design

Based on the theory of antenna design [2] and surveying previous research [3-6], antennas can be classified into two main categories: dipole and monopole antennas. In this research study, a monopole antenna model is proposed for this situation due to its simplicity of fabrication using standard cutting tools and graphene sheets. Dipole antennas certainly have their advantages. But we will do so in the other study.

The following is an empirical equation for any dimension in Fig. 1. The width W_1 of rectangular monopole antenna is calculated from the following equation.

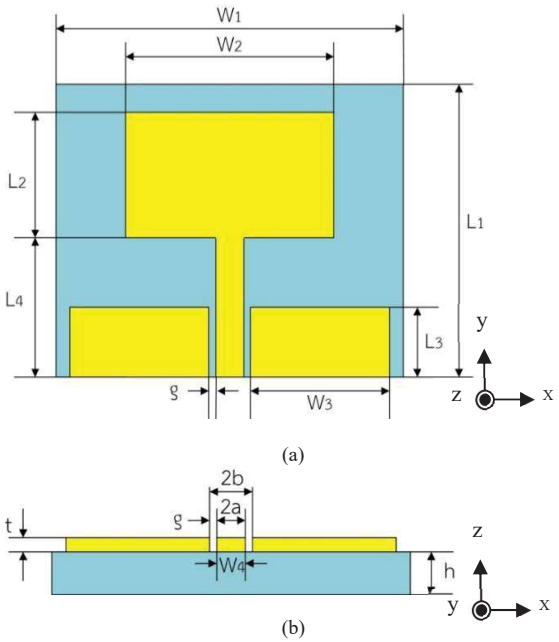


Fig. 1 Proposed graphene sheet monopole antenna model (a) Top view (b) Side view

$$W_1 = 6h + W \tag{1}$$

where h is substrate thickness and W is given by

$$W = \frac{c}{2f_r\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \tag{2}$$

where $c = 3\times10^8$ m/s, f_r is the resonant frequency (in this case, is UHF 960 RFID frequency), and ε_r is the dielectric constant of the substrate. The length L_1 of rectangular monopole antenna is calculated from the following equation.

$$L_1 = L_{eff} - 2\Delta L \tag{3}$$

where

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{4}$$

and

$$\Delta L = 0.412h\frac{\left(\varepsilon_{eff} + 0.3\right)\left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{\left(\varepsilon_{eff} - 0.258\right)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \tag{5}$$

while $\sqrt{\varepsilon_{eff}}$ is a relative dielectric constant which given by

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} ; \quad \frac{W}{h} > 1 \tag{6}$$

The length L_2 L_3 and L_4 are calculated from the following equation.

$$L_2 = \frac{0.42\times\lambda}{2\sqrt{\varepsilon_r}} - 2\Delta L \tag{7}$$

$$L_3 = \frac{0.187\times c}{f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{8}$$

and

$$L_4 = \frac{\lambda_g}{4} \tag{9}$$

where $\lambda_g = c/(f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}})$ is the relative wavelength.

An impedance of antenna is calculated from a following equation.

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}\frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \tag{10}$$

where

$$\varepsilon_{re} = 1 + q(\varepsilon_r - 1) \tag{11}$$

$$q = \frac{1}{2}\left[\frac{K'(k_1)}{K(k_1)}\frac{K(k_2)}{K'(k_2)}\right] \tag{12}$$

$$\frac{K'(k_1)}{K(k_1)} = \frac{\pi}{\ln\left[2\frac{1+\sqrt{k_1}}{1-\sqrt{k_1}}\right]} \tag{13}$$

$$\frac{K(k_2)}{K'(k_2)} = \frac{\pi}{\ln\left[2\frac{1+\sqrt{k_2}}{1-\sqrt{k_2}}\right]} \tag{14}$$

$$k_1' = \sqrt{1-k_1^2} \tag{15}$$

$$k_2' = \sqrt{1-k_2^2} \tag{16}$$

$$k_1 = a/b \tag{17}$$

$$k_2 = \frac{\sinh[\pi a/2h]}{\sinh[\pi b/2h]} \tag{18}$$

$$a = \frac{W_4}{2} \tag{19}$$

and

$$b = \frac{2g + W_4}{2} \tag{20}$$

The width W_2 W_3 and W_4 are calculated from the following equation.

$$W_2 = 0.22\lambda\left[\frac{\varepsilon_r + 1}{2}\right]^{-1/2} \tag{21}$$

$$W_3 = \frac{0.093 \times c}{f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{22}$$

and

$$W_4 = \frac{0.063 \times c}{f_r\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{23}$$

The gap (G) between the feed line and the ground plane is assumed to be 0.5 mm, as indicated in Table 1. This gap is designed to accommodate an antenna impedance close to 50 ohms, allowing for optimal matching with the SMA connector during performance testing. However, when the antenna is used with RFID tag ICs, the impedance will need to be redesigned, and a matching technique must be implemented to ensure optimal performance.

Table 1 Optimized parameters of proposed antenna

Parameters			
Variable	***Dimension [mm.]***	***Variable***	***Dimension [mm.]***
W_1	100	L_1	100
W_2	62	L_2	59.5
W_3	41	L_3	20
W_4	7	L_4	35.5
g	0.5	h	0.095

The dimensions of proposed antenna are calculated using monopole antenna equations as shown above. However, the calculated values are adjusted to optimized values to achieve a usable frequency and possible to implementation. The optimized dimensions in the UHF 860-960 MHz band are listed in Table I. A graphene sheet with polyimide substrate has thickness h = 0.095 mm., dielectric constant $\varepsilon_r = 3.5$ and loss tangent $\tan\delta = 0.004$, graphene conductivity $\sigma = 1.9 \times 10^4$ S/m and thickness $t = 0.012$mm., is used to design the proposed antenna, simulated with CST microwave studio and also used for implementation.

In order to implement the designed graphene monopole antenna, first, print the draft antenna according to the dimensions in Table I. on a paper. Second, paste the draft paper on the prepared graphene sheet. Third, cut the graphene sheet according to the draft and remove an unwanted conductive part from substrate part. And fourth, assemble the SMA connector to the graphene antenna with silver conductive glue. The completed graphene sheet monopole antenna is shown in Fig. 2.

The proposed graphene sheet monopole tag antenna will be tested for performance in the microwave chamber room. In order to measure the wave propagation of an antenna, the testing equipment is set up as shown in Fig. 3. The Vivaldi antenna transmits UHF wave to the proposed graphene tag antenna, which is connected to the PNA network analyzer.



Fig. 2 Completed graphene sheet monopole tag antenna

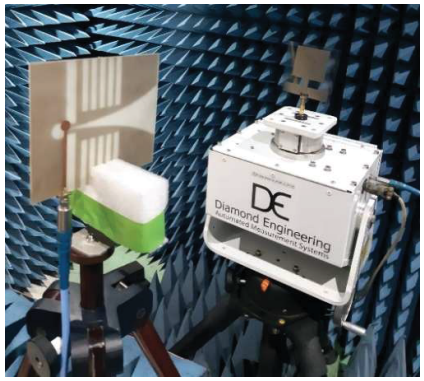


Fig. 3 Wave propagation measurements for the proposed graphene sheet monopole tag antenna

3. Simulation and Measurement Results

The reflection coefficient S_{11} of the designed antenna for the UHF 860-960 MHz RFID band is illustrated in Fig. 4, while the radiation pattern is shown in Fig. 5. The antenna exhibits a bandwidth of approximately 250 MHz, ranging from 840 to 1,040 MHz. This corresponds to a reflected power of less than 10% around the center frequency of 940 MHz, effectively covering the UHF 860-960 MHz RFID band. The measured S_{11} is slightly better than the simulated

S_{11}, but they have similar patterns. The lowest reflection coefficient occurred at 936 MHz with a value of -28.208 dB, as shown in Fig. 4. When the tag antenna was attached to the car windscreen, the frequency response shifted into the range of 715 to 965 MHz. However, it still covered the UHF RFID frequency band. The best radiation coefficient is slightly lower than the unattached case due to the effect of a windscreen made from glass. That is because the glass becomes another substrate layer beneath the polyimide layer, causing the coefficient constant of the graphene substrate to change. It will cause the resonant frequency to shift lower.

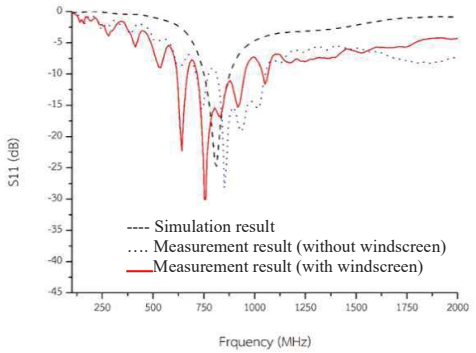
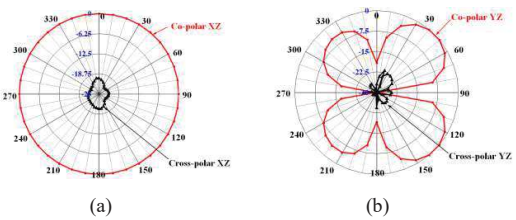


Fig. 4 Reflection coefficients S_{11} of the proposed graphene sheet monopole tag antenna

The radiation pattern and gain are also measured as shown in Fig. 3, while the results are shown in Fig. 5. In Fig. 5(a), the radiation in XZ plane is shaped as Omnidirectional pattern. At co-polar plane, it has a wider shape. Whereas, at cross-polar plane, it has a narrower and asymmetrical shape. In Fig. 5(b), the radiation in YZ plane, at co-polar plane, it has an Omnidirectional pattern with a narrower shape than the XZ plane. Whereas, at cross-polar plane, it has a bi-directional pattern with a wider shape than the XZ plane. The input impedance and radiation gain can be measured to be 51.22+j12.44 Ω and 1.25 dBi respectively. The gain of a graphene antenna may not be as high as a copper antenna. The main reason is that the connection between graphene and the SMA connector uses conductive glue, cannot conduct electromagnetic waves as well as soldering. However, it provides an acceptable result.



(a) (b)

Fig. 5 Measured radiation patterns at 960 MHz UHF band (a) XZ plane (b) YZ plane

4. Conclusions

In this article, the graphene sheet monopole UHF 860-960 MHz RFID antenna is designed and proposed for use as an RFID tag antenna in transportation and logistics. The proposed graphene sheet monopole antenna is modeled and tested in CST simulator in order to optimize its dimensions. After that it is implement on prepared graphene sheet with the cutting tool. It is tested in a laboratory with Agilent PNA network analyzer in order to verify its efficiency. The proposed antenna provides approximately 200 MHz bandwidth from a frequency of 840 to 1,040 MHz around the center frequency of 940 MHz. That bandwidth is covers the frequency range of UHF RFID band. The radiation is an Omnidirectional pattern. Due to its low cost, small size, and bendable features, it is, therefore, suitable to attack a curved surface of a vehicle's windscreen. With this advantage, it has the potential to be further developed for use in transportation logistics in further research.

Acknowledgment

The authors thank the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and All Instrument Solution Co.,Ltd., Thailand, for equipment support and research funding. The authors also thank the anonymous reviewers for their valuable comments, which helped this research article successfully accomplished.

References

[1] P. Asavanarakul, A. Ruengwaree and S Sakulchat, "Graphene-based RFID Tag Antenna for Vehicular Smart Border Passing," Computers, Materials and Continua, vol. 71, no. 3, pp. 4737-4748, 2022.

[2] C.A. Balanis, "Microstrip antennas," in Antenna theory: analysis and design, 3rd ed. NY, USA: Wiley, 2005, ch. 14, pp. 811-882.

[3] W. Naktong, A .Ruengwaree and T. Pumpoung, "A study of tuning the CPW fed basic geometric monopole antenna for UWB applications," Naresuan University Engineering Journal, Vol. 15, No.1, pp. 17-32, 2020.

[4] W. Naktong and A .Ruengwaree, "Four-port rectangular monopole antenna for UWB-MIMO applications," Progress in electromagnetics research B, Vol. 87, pp.19-38, 2020.

[5] W. Naktong et al, "Resonator rectenna design based on metamaterials for low-RF energy harvesting," Computer, Materials & Continua, Vol. 68, no. 2, pp.1732-1750, 2021.

[6] S Sakulchat, A. Ruengwaree, V. Thongpool and W. Naktong, "Low-Cost Flexible Graphite Monopole Patch Antenna for Wireless Communication Applications," Computer, Materials & Continua, Vol. 71, no. 3, pp.6069-6088, 2022.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรงที่มีแอมปลิจูดไม่สม่ำเสมอโดยใช้ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์

Analysis of Linear Array Antenna with Non-Uniform Amplitude Based on Mathematical Averages

พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์ และ ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์*

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

E-mail: ponlakit.j@rmutp.ac.th, chatkaew.s@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรงที่มีแอมปลิจูดไม่สม่ำเสมอ โดยค่าแอมปลิจูดนั้นได้จากค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของสัมประสิทธิของตัวประกอบแถวลำดับระหว่างแถวลำดับแบบไบโนเมียลและแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ บีมวิธและระดับของพูข้างถูกใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบ ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน บีมวิธและระดับพูข้างของแถวลำดับที่เสนอได้แสดงไว้สำหรับแถวลำดับแบบ 10 และ 11 องค์ประกอบ ผลการคำนวณพบว่าวิธีการค่าเฉลี่ยเรขาคณิตทำให้ระดับพูข้างลดลง 21.6 dB และ 18.5 dB สำหรับ 10 และ 11 องค์ประกอบ ตามลำดับ ส่วนบีมวิธนั้นกว้างขึ้น 4.3°

คำสำคัญ: สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรง, แถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ, ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

Abstract

This article presents an analysis of linear array antenna with non-uniform amplitude. The amplitude distribution of the array factor is obtained by the geometric mean between those obtained by the binomial and Dolph-Tschebyscheff array. Beamwidth and sidelobe level are used as the criteria for comparison. The simulation of radiation pattern, beamwidth and sidelobe level for the proposed excitation technique are shown for the number of elements of 10 and 11. The results shows that the proposed technique reduce the SLL by 21.6 dB and 18.5 dB for 10 and 11 elements respectively while the HPBW broaden by 4.3° for both cases.

Keywords: linear array antenna, Dolph-Tschebyscheff array, geometric mean

1. บทนำ

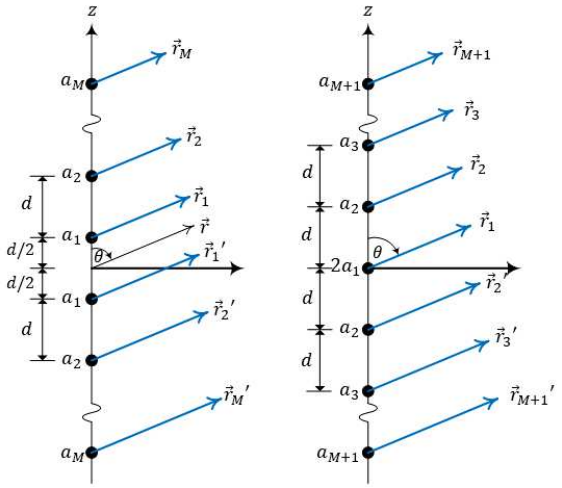
การสื่อสารเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยให้โลกเราพัฒนาและเจริญก้าวหน้ามาจนถึงทุกวันนี้ ทั้งด้านเศรษฐกิจ การศึกษา การเผยแพร่ข้อมูลข่าวสาร และ ความมั่นคง เป็นต้น การสื่อสารไร้สายโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นหนึ่งในรูปแบบของการสื่อสารที่ได้รับความนิยมมากขึ้นและยังคงมีการพัฒนาอยู่ตลอดซึ่งมีสายอากาศเป็นอุปกรณ์หลักในการรับส่งคลื่นวิทยุ

สายอากาศแถวลำดับสามารถเพิ่มอัตราการขยาย รวมถึงยังสามารถควบคุมการกวาดลำคลื่นได้อีกด้วย โดยสายอากาศแบบแถวลำดับแบบเส้นตรง (linear array) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย อย่างไรก็ตามทำให้เกิดเกิดพูรอง [3] โดยแถวลำดับแบบเส้นตรงมีองค์ประกอบเรียงกันเป็นเส้นตรง แถวลำดับแบบเส้นตรงสม่ำเสมอ (uniform linear array) ซึ่งมีบีมวิธแคบ แต่มีระดับพูรองสูง อย่างไรก็ตามแถวลำดับแบบไบโนเมียล (binomial array) และ (Dolph-Tschebyscheff) เป็นแถวลำดับที่มีแอมปลิจูดไม่สม่ำเสมอนั้นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงพูข้าง และจำกัดขนาดของพูข้างได้ตามลำดับ [5]

โดยสัมพันธ์ระหว่างแถวลำดับทั้ง 3 แล้ว แถวลำดับแบบสม่ำเสมอมีบีมวิธแคบที่สุด รองลงมาคือแถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟและแถวลำดับแบบไบโนเมียล ตามลำดับ ในขณะที่แถวลำดับแบบไบโนเมียลจะมีระดับพูข้างที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ และ แบบสม่ำเสมอ ตามลำดับ [3] ใน [4-5] ได้ศึกษาการลดพูข้างของแถวลำดับแบบเส้นตรงที่มีการกระจายแอมปลิจูดแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ อย่างไรก็ตามสำหรับจำนวนองค์ประกอบสูงจะทำมีความซับซ้อนในการออกแบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเห็นว่า เพื่อจำกัดความซับซ้อนของการออกแบบและการหาสัมประสิทธิ์ของแถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ อันดับสูงและเป็นการประณีประนอมกันกับแถวลำดับแบบไบโนเมียล จึงประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวประกอบแถวลำดับของดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ และ ไบโนเมียล เพื่อศึกษาผลกระทบของแถวลำดับค่าเฉลี่ยที่เสนอต่อบีมวิธและระดับพูข้างดังเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

2. สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรง

สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นตรงในการวิเคราะห์นี้ มีองค์ประกอบเป็นตัวแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) เหมือนกันทุกองค์ประกอบ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสม่ำเสมอ d และวางอย่างสมมาตรบนแกน z ดังแสดงในรูปที่ 1 จำนวนองค์ประกอบรวมของแถวลำดับเป็น N โดยรูปที่ 1(a) สำหรับจำนวนองค์ประกอบคู่ $N = 2M$ และรูปที่ 1(b) สำหรับจำนวนองค์ประกอบคี่ $N = 2M + 1$ โดยที่ M เป็นจำนวนเต็มบวก แอมปลิจูดของสัญญาณและเวกเตอร์การกระจัดที่ชี้จากแต่ละองค์ประกอบไปยังระนาบของจุดสังเกตในบริเวณสนามระยะไกลเป็น $a_1, a_2, \ldots, a_M$ หรือ a_{M+1} และ $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \ldots, \vec{r}_M$ หรือ $\vec{r}_{M+1}$ ตามลำดับ เครื่องหมาย ($'$) ของ $\vec{r}_n$ แสดงถึงองค์ประกอบที่อยู่บริเวณ $-z$



รูปที่ 1 โครงสร้างของแถวลำดับแบบเส้นตรงของตัวแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิก เมื่อจำนวนองค์ประกอบเป็น (a) จำนวนคู่ และ (b) จำนวนคี่

2.1 ตัวประกอบแถวลำดับ

สนามไฟฟ้ารวมที่แผ่จากแถวลำดับนั้นเป็นผลรวมทางเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจากทุกองค์ประกอบ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นผลคูณของสนามไฟฟ้าของหนึ่งองค์ประกอบที่จุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ซึ่งเขียนได้เป็น

$$E_{\text{total}} = E_{\text{element}} \times AF \tag{1}$$

ให้งานวิจัยนี้ได้กำหนดชนิดขององค์ประกอบของแถวลำดับเป็นตัวแผ่พลังงานแบบไอโซทรอปิกซึ่งแผ่พลังงานเท่ากันตลอดทุกทิศทาง ดังนั้นตัวประกอบแถวลำดับจะถูกคำนึงเป็นหลักแทนการใช้สนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศ ซึ่งตัวประกอบแถวลำดับสำหรับแถวลำดับแบบเส้นตรงที่มีระยะห่างสม่ำเสมอแต่แอมปลิจูดไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 1 สามารถใช้เขียนได้เป็น [2]

$$AF_{2M}(\text{even}) = \sum_{n=1}^{M} a_n \cos\big((2n-1)u\big) \tag{2}$$

$$AF_{2M+1}(\text{odd}) = \sum_{n=1}^{M+1} a_n \cos(2(n-1)u) \tag{3}$$

เมื่อ $u = (\pi d/\lambda)\cos\theta$

2.2 แถวลำดับแบบไบโนเมียล

เมื่อกำหนดสัมประสิทธิ์ a_n ของตัวประกอบแถวลำดับใน (2) และ (3) ให้สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์ของทวินาม (binomial) เราจะเรียกสายอากาศแถวลำดับชนิดนี้ว่าแถวลำดับแบบไบโนเมียล โดยสัมประสิทธิ์ค่าบวกของทวินาม :sET;?5เมื่อ IF คืออันดับของทวินาม โดยสัมประสิทธิ์ทวินามสำหรับ Iระหว่าง 1 ถึง 11 สามารถแสดงได้เป็นสามเหลี่ยมของปาสคาล ดังรูปที่ 2 [2]

$m = 1$	1
$m = 2$	1 1
$m = 3$	1 2 1
$m = 4$	1 3 3 1
$m = 5$	1 4 6 4 1
$m = 6$	1 5 10 10 5 1
$m = 7$	1 6 15 20 15 6 1
$m = 8$	1 7 21 35 35 21 7 1
$m = 9$	1 8 28 56 70 56 28 8 1
$m = 10$	1 9 36 84 126 126 84 36 9 1
$m = 11$	1 10 45 120 210 252 210 120 45 10 1

รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์ค่าบวกของทวินามอันดับ I= 1 ถึง 11 ในรูปแบบสามเหลี่ยมปาสคาล

ในการออกแบบแถวลำดับแบบไบโนเมียลทำได้โดยกำหนดให้ Iเท่ากับจำนวนองค์ประกอบ Qและเมื่อกำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ @Q ª ยแบบรูปของ # ดจะไม่มีพูรองเกิดขึ้น

2.3 แถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ

แถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟนั้นสามารถออกแบบให้ควบคุมระดับพูรองได้ แอมปลิจูดของแต่ละองค์ประกอบนั้นสัมพันธ์กับโพลิโนเมียลของเชฟบีเชฟซึ่งได้ถูกเสนอไว้ครั้งแรกโดย Dolph [1] สำหรับเชฟบีเชฟโพลีโนเมียลอันดับ Iเขียนได้เป็น

$$T_m(z) = 2zT_{m-1}(z) - T_{m-2}(z) \quad (4)$$

เมื่อ $T_0(z) = 1$ และ $T_1(z) = z$ โดยที่ $z = \cos u$ สำหรับ $m = 9$ และ 10 สำหรับจำนวนองค์ประกอบ $N = 10$ และ 11 ตามลำดับเขียนได้เป็น

$$T_9(z) = 256z^9 - 576z^7 + 432z^5 - 120z^3 + 9z \quad (5)$$

$$T_{10}(z) = 512z^{10} - 1280z^8 + 1120z^6 - 400z^4 + 50z^2 - 1 \quad (6)$$

ในการออกแบบแถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟนั้น กำหนดให้อันดับ m สูงสุดของเชฟบีเชฟโพลีโนเมียลที่ใช้น้อยกว่าจำนวนองค์ประกอบอยู่ 1 เสมอ อัตราส่วนโวลท์เตจของพูหลักต่อพูรอง (major-to-minor ratio) R_0 ที่ต้องการจะถูกใช้ในการหาสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับ โดยเริ่มจากหา z_0 ที่ทำให้ $T_m(z_0) = R_0$ โดยใช้

$$z_0 = \cosh\left[\frac{1}{m}\cosh^{-1}(R_0)\right] \quad (7)$$

และแทน $\cos(u) = z/z_0$ หลังจากนั้นเทียบสัมประสิทธิ์ของโพลิโนเมียลกับตัวประกอบแถวลำดับเพื่อหาสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับ

2.4 การเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Means)

ค่าเฉลี่ยทางคณิตศาสตร์ (mathematical means) หรือค่าเฉลี่ยพีทาโกรัส (Pythagorean means) แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ 1) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean) $\bar{a}_a$ 2) ค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (geometric mean) $\bar{a}_g$ ได้จากรากที่ N ของผลคูณของชุดข้อมูล N ตัว มักนำไปใช้กับการหาค่าเฉลี่ยข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลง (rate of change) หรือค่าเปอร์เซ็นต์ และ 3) ค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิค (harmonic mean) $\bar{a}_h$ เป็นส่วนกลับของค่าเฉลี่ยเลขคณิตของส่วนกลับของข้อมูลซึ่งแสดงได้ใน (8) (9) และ (10) ตามลำดับ

$$\bar{a}_a = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} a_n \quad (8)$$

$$\bar{a}_g = \sqrt[N]{|\Pi_{n=1}^{N} a_n|} \quad (9)$$

$$\bar{a}_h = \frac{N}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \cdots + \frac{1}{a_N}} = \frac{N}{\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{a_n}} \quad (10)$$

3. ผลการทดลอง

จากแบบจำลองของการหาสัมประสิทธิ์ตัวประกอบแถวลำดับและค่าเฉลี่ยเรขาคณิตและค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิคดังในหัวข้อที่ 2 ในการทดลองแถวลำดับเส้นตรงกำหนดองค์ประกอบเป็น 10 และ 11 เป็นตัวอย่าง สำหรับแถวลำดับแบบไบโนเมียลนั้นหาสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับได้จากรูปที่ 2 และสำหรับแถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ กำหนด R_0 = 26 dB และใช้ (4) – (7) ผลการคำนวณตัวประกอบแถวลำดับแสดงได้ดังตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

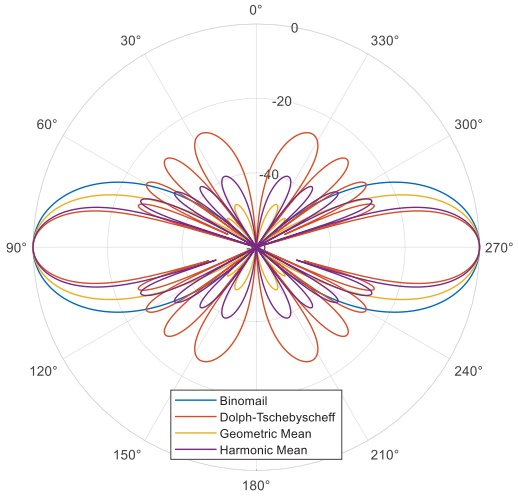
ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ตัวประกอบแถวลำดับ N = 10

	Binomial	Dolph-Tschebyscheff	$\bar{a}_g$	$\bar{a}_h$
a_1	126	2.798	18.776	5.474
a_2	84	2.496	14.479	4.847
a_3	36	1.974	8.429	3.742
a_4	9	1.357	3.494	2.358
a_5	1	1	1	1

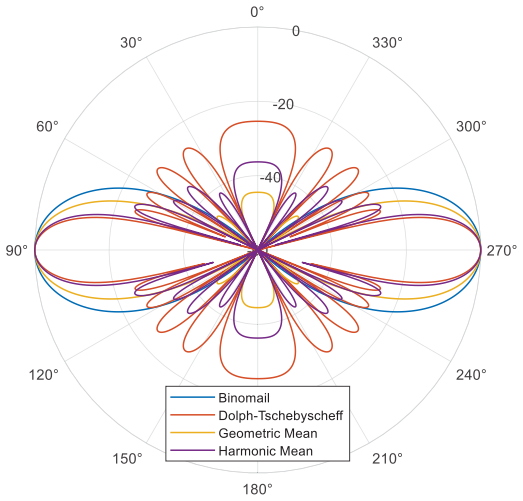
ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์ตัวประกอบแถวลำดับ N = 11

	Binomial	Dolph-Tschebyscheff	$\bar{a}_g$	$\bar{a}_h$
a_1	126	1.326	12.926	2.624
a_2	210	2.604	23.384	5.144
a_3	120	2.269	16.500	4.453
a_4	45	1.786	8.964	3.435
a_5	10	1.244	3.527	2.212
a_6	1	1	1	1

แบบรูปการแผ่พลังงานของ AF_n สำหรับแถวลำดับที่มีระยะห่าง $d = \lambda/2$ ได้แสดงได้ดังรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 ซึ่งหาได้จาก $20\log(AF_n)$ โดย AF_n คือค่าปกติของ AF_n ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังงาน (Half Power Beamwidth : HPBW) และ ระดับพูข้าง (Sidelobe Level : SLL) แสดงไว้ในตารางที่ 3 รูปที่ 5 แสดงผลบีมวิธที่ได้จากแบบรูป



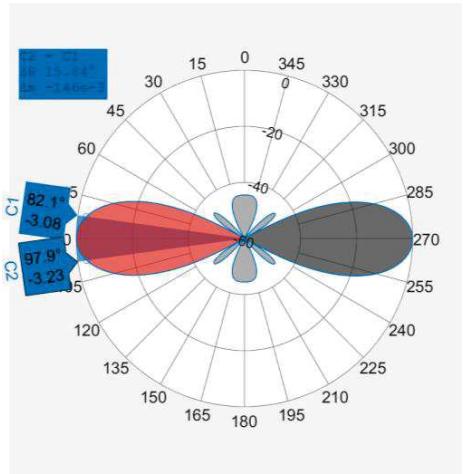
รูปที่ 3 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวประกอบแถวลำดับกรณี 10 องค์ประกอบ



รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวประกอบแถวลำดับ กรณี 11 องค์ประกอบ

ตารางที่ 3 HPBW และ SLL ของแถวลำดับ 10 และ 11 องค์ประกอบ

สัมประสิทธิ์แถวลำดับ	10 องค์ประกอบ		11 องค์ประกอบ	
	HPBW	SLL(dB)	HPBW	SLL(dB)
Binomial	20.5^{o}	- ∞	19.4^{o}	- ∞
Dolph-Tschebyscheff	12.6^{o}	-26.0	11.5^{o}	-26.0
Geometric Mean	16.9^{o}	-47.6	15.8^{o}	-44.5
Harmonic Mean	13.7^{o}	-26.8	12.2^{o}	-24.9



รูปที่ 5 แบบรูปการแผ่พลังงานของตัวประกอบแถวลำดับ 11 องค์ประกอบ สัมประสิทธิ์ตัวประกอบแถวลำดับแบบค่าเฉลี่ยเรขาคณิต

จากผลการทดลองจะเห็นว่าวิธีการค่าเฉลี่ยเรขาคณิตทำให้ SLL ลดลง 21.6 dB และ 18.5 dB สำหรับ 10 และ 11 องค์ประกอบตามลำดับ ส่วนของบีมวิธนั้นกว้างขึ้น 4.3^{o} ทั้ง 10 และ 11 องค์ประกอบ ในขณะที่วิธีค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิคส่งผลกระทบต่อ SLL และ บีมวิธน้อยมาก

4. สรุป

วิธีการค่าเฉลี่ยเรขาคณิตและค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิคได้ถูกประยุกต์มาใช้สำหรับหาค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับระหว่างแถวลำดับแบบไบโนเมียลและแถวลำดับแบบดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ ผลการทดลองได้หาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวประกอบแถวลำดับ แบบรูปการแผ่พลังงาน บีมวิธ และค่าระดับพูรอง จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธีการค่าเฉลี่ยเรขาคณิตสามารถนำไปประยุกต์กับการออกแบบแถวลำดับดอล์ฟ-เชฟบีเชฟ โดยทำให้ SLL ต่ำลง และลดความซับซ้อนของการออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] C. L. Dolph, “A Current Distribution for Broadside Arrays Which Optimizes the Relationship Between Beamwidth and Side-Lobe Level,” *Proc. IRE and Waves and Electrons*, June 1946.

[2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.

[3] H. M. M. Makkawi, "Comparative study of the radiation characteristics between uniform, Tschebyscheff and Binomial amplitude distributions of linear patch antenna array for x-band radar warning receivers," 2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE), Khartoum, Sudan, 2017, pp. 1-8

[4] A. M. Zobu, B. Dagdeviren, G. Demirbaü, B. C. Kocaoglu and E. Gürhan, "Low Sidelobe Level Antenna Array with Amplitude Tapering," 2022 Microwave Mediterranean Symposium (MMS), Pizzo Calabro, Italy, 2022, pp. 1-4

[5] Maulana, N. F. A. Hakim, A. H. S. Budi, A. M. Ridwan and I. Kustiawan, "Sidelobe Reduction Using Proximity Coupled Dolph Tschebyscheff Array Antenna for Wi-Fi 6E," 2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA), Lombok, Indonesia, 2023, pp. 1-5.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่ สำหรับประยุกต์ใช้งานย่าน WLAN/SUB 6 GHz

Coplanar Rectangular Monopole Antenna With Double U-shape Ground Plane for WLAN/SUB-6 GHz Applications

พิษณุ ดีแสน[1] และ อำนวย เรืองวารี[1*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: amnoiy.r@en.rmutt.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่ สำหรับประยุกต์ใช้งานในระบบ WLAN และ Sub – 6 GHz ด้วยเทคนิคการปรับเพิ่มขนาดของตัวแผ่พลังงานและการเซาะร่องทั้งสองข้างของระนาบสร้างเงา โครงสร้างสายอากาศถูกการจำลองแบบและสร้างบนวัสดุฐานรองเป็นแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ที่มีค่าไดอิเล็กตริก (ε_r) = 3.2 และมีความหนา h = 0.3 มม. ขนาดของสายอากาศต้นแบบมีขนาดเท่ากับ 46.8 x 46.8 มม.^{2} จากผลการวัดสายอากาศพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ในช่วงตอบสนองความถี่ใช้งาน ซึ่งครอบคลุมความถี่ 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ต่ำ 1.80 – 3.86 GHz และช่วงความถี่สูง 4.72 – 7.08 GHz มีค่าอัตราขยายเฉลี่ยที่ช่วงความถี่ต่ำเท่ากับ 2.20 dBi และความถี่สูงเท่ากับ 4.50 dBi ตามลำดับ สายอากาศมีลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวทั้ง 2 ช่วงความถี่

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า, ระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่, ความถี่คู่

Abstract

This article presents the design and fabrication of the co-planar rectangular monopole antenna with dual U-shaped ground planes for applications in WLAN and Sub-6 GHz systems. The tuning technique involves increasing the size of the radiating element and etching on both sides of the ground plane. The antenna structure was simulated and fabricated using polyester film as the substrate material, which has a dielectric constant (ε_r) of 3.2 and a thickness (h) of 0.3 mm. The prototype antenna dimension is 46.8 x 46.8 mm^2. The antenna measurement results show that the reflection coefficient is below -10 dB throughout the operational frequency response, covering two frequency ranges: 1.80–3.86 GHz and 4.72–7.08 GHz. The average gain in the low-frequency region is 2.20 dBi, whereas in the high-frequency range, it is 4.50 dBi. The antenna has an omnidirectional radiation pattern in a singular plane across both frequency bands.

Keywords: monopole antenna, rectangular, Double U-shape Ground Plane, dual-band

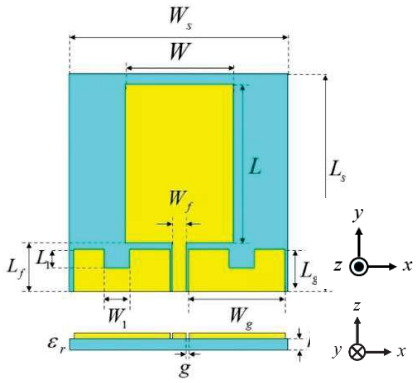
1. บทนำ

การพัฒนาสายอากาศให้ครอบคลุมเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในตามมาตรฐาน WLAN และ Sub-6 GHz [1-2] จากปัจจุบันไปสู่อนาคตนั้น การออกแบบสายอากาศเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานต้องสามารถใช้งานรองรับย่านความถี่ที่หลากหลายและมีโครงสร้างสายอากาศที่มีความยืดยุ่น โค้งงอ เพื่อยึดติดบนอุปกรณ์หรือสิ่งของที่นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ เช่น กระเป๋า สายนาฬิกา มือถือพับจอได้ พื้นผิวของท่อทรงกระบอก กระจกหน้ารถยนต์และเสื้อผ้า เป็นต้น [3] สำหรับการออกแบบสายอากาศที่รองรับย่าน WLAN และ Sub-6 GHz นั้น มีงานวิจัยหลายงานที่ได้เสนอการออกแบบสายอากาศที่แตกต่างกันออกไป พบว่ามีบางงานวิจัยสายอากาศมีความซับซ้อนในการสร้าง มีรูปร่างที่ความหนาและมีน้ำหนักที่มาก รวมถึงเรื่องราคาสูงและมีความยืดยุ่น โค้งงอได้น้อยหรือไม่มีเลย จากที่กล่าวมาคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดทำการพัฒนาสายอากาศรูปแบบใหม่เพื่อลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยนำโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบร่วมรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าต้นแบบ [4-5] ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนและใช้เทคนิคการปรับขนาดของตัวแผ่พลังงานจากรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่าจนเป็นรูปสีเหลี่ยมผืนผ้า [6-7] ร่วมกับการเซาะระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน [8-9] จนเป็นรูปตัวยูคู่เพื่อเพิ่มช่วงความถี่ใช้งานของสายอากาศให้กว้างมากยิ่งขึ้นรองรับการใช้งานความถี่ตามที่กำหนด เนื้อหาของบทความวิจัยนี้เริ่มจากการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST ทำการจำลองแบบและวิเคราะห์ผล ปรากฏในหัวข้อที่ 2 การสร้างและผลการวัดได้ถูกนำเสนอในหัวข้อที่ 3 สำหรับส่วนสุดท้ายเป็นบทสรุปถูกแสดงในหัวข้อที่ 4

2. การออกแบบและผลการจำลองแบบ

2.1 การออกแบบโครงสร้างสายอากาศ

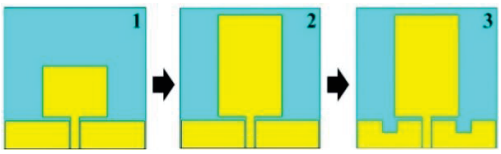
การออกแบบสายอากาศพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าอาศัยการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST ตัวแผ่พลังงานของสายอากาศเลือกใช้แผ่นวัสดุทำจากโลหะทองแดงที่มีค่าความนำ (σ) = 5.8x10^7 S/m. มีค่าความหนาของแผ่นทองแดง t = 0.05 มม. และถูกติดตั้งบนบนแผ่นฟิล์มไมล่าร์โพลีเอสเตอร์ ที่มีค่าไดอิเล็กตริก ε_r = 3.2 มีค่าความหนาของวัสดุฐานรอง h = 0.3 มม. เริ่มการออบแบบสายอากาศโดยกำหนดความถี่ตั้งต้นเท่ากับ 2.45 GHz จากนั้นทำการปรับขนาดโครงสร้างสายอากาศผ่านโปรแกรม CST จนได้สายอากาศต้นแบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและรองรับการใช้งานตามที่ต้องการ ขนาดและลักษณะรูปร่างสุดท้ายของสายอากาศในบทความนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยมีขนาดต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ W_s = 46.8 มม. W = 21.2 มม. W_f = 2.8 มม. W_g = 21.2 มม. L_s = 46.8 มม. L = 16.8 มม. L_f = 10.6 มม. L_g = 9.2 มม. g = 0.25 มม.



รูปที่ 1 สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่

2.2 ผลการจำลองแบบ

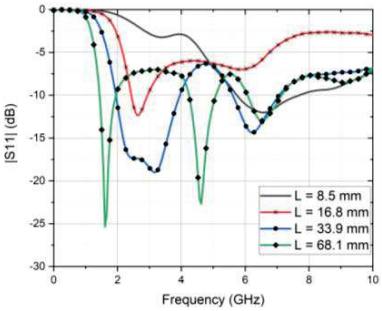
ภาพรวมของขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่เริ่มจากการออกแบบและจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่ารูปแบบที่ 1 แสดงได้ตามรูปที่ 2 (ก) ตามแนวคิดจากงานวิจัย [4-5] จากนั้นทำการปรับโครงสร้างด้วยเทคนิคการปรับเพิ่มขนาดของตัวแผ่พลังงานจากรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่าจนกลายเป็นรูปสีเหลี่ยมผืนผ้าแนวตั้งเรียกว่าสายอากาศแบบที่ 2 [6-7] แสดงดังรูปที่ 2 (ข) และขั้นตอนสุดท้ายทำการปรับในส่วนระนาบสร้างเงาด้วยใช้เทคนิคการเซาะร่องบริเวณดังกล่าวเป็นสายอากาศรูปแบบที่ 3 [8-9] แสดงดังรูปที่ 2 (ค) ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดทำให้สายอากาศที่ออกแบบมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ รองรับการประยุกต์ใช้งานตามที่ต้องการ



(ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 (ค) แบบที่ 3

รูปที่ 2 ขั้นตอนการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

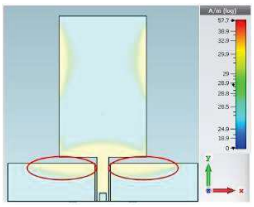
การออกแบบและการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศที่ย่านความถี่ 2.45 GHz ตามแบบที่ 1 ดังรูปที่ 2 (ก) จากผลการจำลองแบบพบว่าเมื่อสังเกตค่า S_{11} สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานช่วงความถี่ต่ำได้คือ 2.35 – 2.85 GHz แต่ที่ช่วงความถี่สูง สายอากาศยังไม่สามารถรองรับการใช้งานกับระบบที่ต้องการได้ แสดงดังรูปที่ 3 ดังนั้นจึงทำการปรับโครงสรางสายอากาศให้ครอบคลุมการใช้งานย่านความถี่ 5.2 GHz และ 5.8 GHz ด้วยเทคนิคการปรับเพิ่มขยายขนาดตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมทางด้านบนจนโครงสร้างสายอากาศเป็นแบบที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2 (ข) จากนั้นทำการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศโดยกำหนดค่าความกว้างของตัวแผ่พลังงาน W มีค่าคงที่เท่ากับ 21.2 มม. และปรับค่าขนาดความยาวตัวแผ่พลังงาน L ตั้งแต่ 8, 17, 34 และ 68 มม. จากการปรับขนาด L พบว่าค่าความยาว L ที่ส่งผลต่อผลตอบสนองความถี่ดีที่สุดคือขนาด L เท่ากับ 34 มม. ผลการจำลองแบบพบว่าสายอากาศแบบที่ 2 มีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมการใช้งาน ช่วงความถี่ต่ำ 67.75% (1.956 – 3.96 GHz) และช่วงความถี่สูง 22.22% BW (5.6 - 7.0 GHz) แต่พบว่ายังไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ 5.2 GHz ตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3



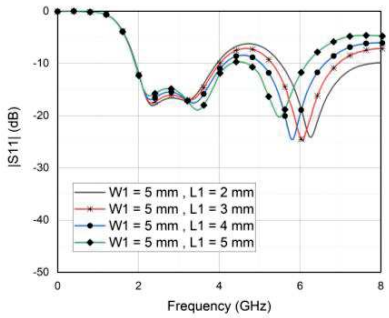
รูปที่ 3 ผลการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) เกิดจากการปรับขนาดสายอากาศตามแบบที่ 2

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ทำการการปรับโครงสร้างสายอากาศด้วยเทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบสร้างเงาจนเป็นรูปตัวยูทั้งสองข้าง ตามแบบที่ 3 แสดงดังรูปที่ 2 (ค) การเลือกปรับโครงสร้างบริเวณนี้เนื่องจากเมื่อทำการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศเพื่อสังเกตและวิเคราะห์ผลความหนาแน่นของกระแสบนพื้นผิวสายอากาศพบว่าความหนาแน่นของกระแสที่ความถี่ 5.2 GHz บริเวณระนาบด้านล่างของสายอากาศ คือส่วนระนาบสร้างเงาและด้านล่างของแผ่นพลังงานของสายอากาศมีค่าความหนาแน่นของกระแสเปลี่ยนแปลงมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 4 จากนั้นทำการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศโดยมีรายละเอียดการปรับพารามิเตอร์คือทำการกำหนดค่าความกว้าง W_1 มีคงที่ 5 มม. และ

ทำปรับค่าความยาว L_1 ตั้งแต่ 2, 3, 4 และ 5 มม. ผลการจำลองแบบพบว่ามีค่ามีผลตอบสนองความถี่การใช้งานครอบคลุม ช่วงความถี่ต่ำ 73.75% (1.90 - 4.12 GHz) และ ช่วงความถี่สูง 27.59% (5.00 – 6.60 GHz) แสดงดังรูปที่ 5 สรุปได้ว่าการปรับโครงสร้างสายอากาศตามแบบที่ 3 ครั้งนี้สายอากาศรองรับการใช้งานช่วงความถี่ตามมาตรฐาน ระบบ WLAN และ Sub – 6 GHz

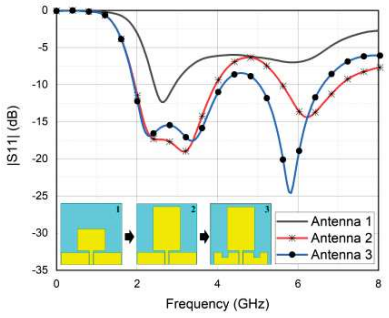


รูปที่ 4 ผลการจำลองแบบความหนาแน่นของกระแสที่ความถี่ 5.2 GHz



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) เกิดจากการปรับขนาดสายอากาศตามแบบที่ 3

ผลการเปรียบเทียบการปรับจูนโครงสร้างสายอากาศต้นแบบทั้ง 3 แบบ ที่ส่งผลให้สายอากาศรองรับการใช้งานได้ความถี่ 2 ช่วงความถี่ กล่าวคือสามารถครอบคลุมความถี่ 2.45 GHz, 5.2 GHz และ 5.8 GHz แสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) เกิดจากการปรับขนาดสายอากาศทั้ง 3 แบบ

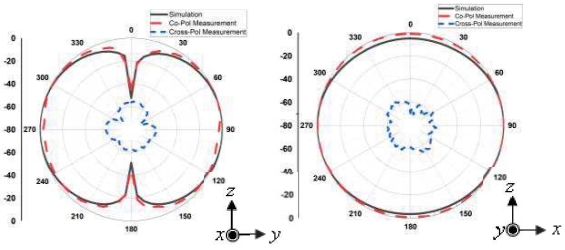
3. การสร้างและผลการวัด

จากการออกแบบและทำการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศที่มีการปรับโครงสร้างจนขนาดของพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด มีตอบสนองช่วงความถี่ที่ต้องการตามมาตรฐาน ระบบ WLAN และ Sub – 6 GHz สำหรับในขั้นตอนต่อจากนี้คือนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการจำลองแบบมาทำการสร้างตัวสายอากาศจริงด้วยแผ่นวัสดุตามที่กำหนดในเนื้อหาส่วนหน้านี้และนำสายอากาศที่สร้างวัดผลการสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C ดังรูปที่ 7 (ก) และตัวสายอากาศสร้างจริงต้นแบบ ดังรูปที่ 7 (ข)

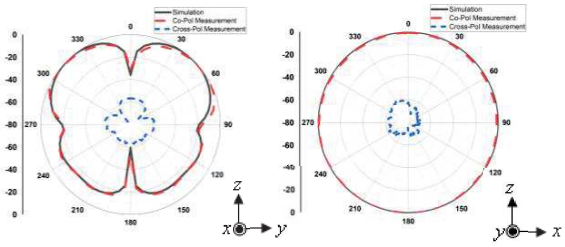


(ก) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (ข) สายอากาศต้นแบบ

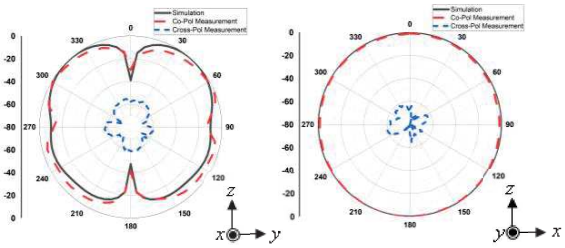
รูปที่ 7 เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและสายอากาศสร้างจริงต้นแบบ



(ก) แบบรูปการแผ่พลังงาน E-plane และ H- plane ที่ความถี่ 2.45 GHz



(ข) แบบรูปการแผ่พลังงาน E-plane และ H- plane ที่ความถี่ 5.2 GHz

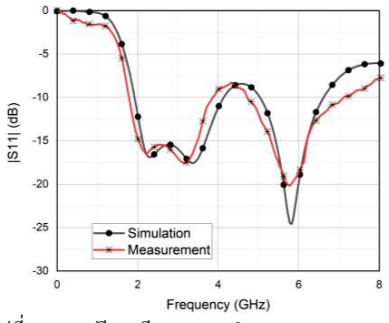


(ค)) แบบรูปการแผ่พลังงาน E-plane และ H- plane ที่ความถี่ 5.8 GHz

รูปที่ 8 แบบรูปการณ์แผ่พลังงานของสายอากาศแต่ละความถี่

จากนั้นทำการวัดผลค่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและนำผลการวัดจริงมาทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบที่ย่านความถี่ใช้งาน 2.45 GHz, 5.2 GHz และ 5.8 GHz แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าผลที่ได้ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ในส่วนสุดท้ายทำการเปรียบเทียบค่าอัตราขยาย 2.45

GHz, 5.2 GHz และ 5.8 GHz โดยค่าที่ได้จากการจำลองแบบมีค่าอัตราขยายเท่า 2.25 dBi, 5.35 dBi และ 4.68 dBi และค่าที่ได้จากผลการวัด มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 2.17 dBi 5.42 dBi และ 4.41 dBi ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าผลจากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและการวัดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

หลังจากทำการวัดสายอากาศจนได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จึงทำการเปรียบเทียบผลการจำลองและการวัดของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แสดงได้ดังรูปที่ 9 ผลการวัดเปรียบเทียบพบว่าสายอากาศ มีการตอบสนองความถี่ใช้งาน ช่วงความถี่ต่ำ 72.79% (1.80 – 3.86 GHz) และช่วงความถี่สูง 40.0% (4.72 – 7.08 GHz)

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบระนาบร่วมที่มีระนาบสร้างเงารูปตัวยูคู่ ที่ได้มาจากการปรับโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าระนาบร่วม ด้วยเทคนิคการเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ทั้ง 2 ข้างและเพิ่มขนาดตัวแผ่พลังงานพบว่าผลการวัดว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ของสายอากาศต้นแบบสามารถตอบสนองช่วงความถี่ต่ำ 72.79% (1.80 – 3.86 GHz) และช่วงความถี่สูง 40.0% (4.72 – 7.08 GHz) มีแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นลักษณะแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว มีอัตราขยายที่ย่านความถี่ 2.45 GHz, 5.2 GHz และ 5.8 GHz เท่ากับ 2.17 dBi 5.42 dBi และ 4.41 dBi ตามลำดับ สายอากาศต้นแบบสามารถรองรับการใช้งานในระบบ WLAN และ Sub–6 GHz

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานด้านโปรแกรม CST และอุปกรณ์ทดลองและวัดผล

เอกสารอ้างอิง

[1] Awan, W., et al. “Stub loaded compact size tri-band antenna for ISM,5G sub-6-GHz, IoT Applications” Asia-Pacific Microw. Conf. , 2022, (pp.539-541). DOI:10.23919/APMC55665.2022. 9999876.

[2] Fakhriddinovich, A. U., et al.“A compact antenna with multiple stubs for ISM, 5G Sub-6-GHz, and WLAN” IEEE Access, 11, 2023,130418-130425.DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3333881

[3] Jarchavi, S., et al. “Compact multi-band flexible antenna for ISM, WLAN, Wi-Fi, and 5G sub-6-GHz applications” URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Sci. Meeting, 2022, (pp. 1-3). DOI: 10.23919/AT-AP-RASC54737.2022.9814285

[4] Markina, A., et al. “Designing a dual-band printed monopole symmetric tooth-shaped antenna” Lobachevskii J. of Math., 2020, Vol. 41, No. 7, pp.1354–1362. DOI: 10.1134/S1995080220070264

[5] Turkmen, M., et al. “Dual-band patch antenna with simple rectangular shaped slots for local area networks” Wireless Pers. Commun., 2022, Vol. 41, No. 7, pp. 1-12. DOI: 10.1134/S1995080220070264

[6] Rajput, J., et al. “Dual-Band Slotted Rectangular Monopole Antenna for Breast Hyperthermia” Int. J. of Microw. Optical Technol., 2021, VOL.16, NO.6

[7] Wang, W., et al. “Isolation enhancement in dual-band monopole antenna for 5G applications” IEEE Trans on Circuits Systems II, 2020, Vol. 68, pp. 1867-1871. DOI: 10.1109/TCSII.2020.3040164

[8] Rathore, P., et al. “A dual-band notched UWB antenna with a slot and a parasitic resonator” IEEE Microw. Antennas Propag. Conf., 2023, (pp. 1-5). DOI:10.1109/MAPCON58678.2023.10463940

[9] Iman, Z., et al. “Symmetrically Slotted Ground Defected UWB Antenna Configurations for Microwave Imaging Techniques” IEEE Asia-Pacific Microw. Conf., 2020, (pp. 825-827). DOI: 10.1109/APMC47863.2020.9331615



พิษณุ ดีแสน กำลังศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Antenna Design



อำนวย เรืองวารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยคาสเซิล ประเทศสาธารณรัฐเยอรมัน ปีพ.ศ. 2551 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ Ultra Wideband Radar System, Ultra

Metamaterial-inspired microwave sensor for measurement of sugar concentration in sugar solution

Rujipas Sumranbumrung[1*]

[1*]Department of Electrical Communication and Intelligent System Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
E-mail: rujipas.s@rmutp.ac.th*

Abstract

This study introduces a metamaterial-based microwave sensor for accurately measuring sugar concentration in sugar solutions. The proposed sensor is designed using a microstrip line coupled with a ground-etched complementary split-ring resonator (CSRR) to enhance sensitivity. Additionally, a novel structure of a meander line integrated with L-shaped elements (MLL) is employed as the metamaterial within the sensing region to optimize performance. Simulated results indicate that the transmission coefficient (S_{21}) at 1.73 GHz increases from -22.7566 dB to -22.1572 dB as the sugar concentration varies from 0 to 30 °Brix. Furthermore, the regression model developed from these measurements demonstrates a high level of accuracy, as evidenced by an R^2 value of 0.9977 and a root mean square error (RMSE) of 0.01382, thereby confirming the reliability of the proposed sensing method.

Keywords: microwave sensor, CSRR, metamaterial, sugar concentration.

1. Introduction

The accurate determination of sugar concentration in sugar solutions is essential in various industries, including food processing [1], beverage production, and agriculture [2]. Conventional measurement techniques, such as refractometry and polarimetry, are time-consuming, and may involve complex calibration procedures [3]. As an alternative, microwave sensors have emerged as a promising non-invasive, rapid, and highly sensitive approach for dielectric characterization of liquid solutions, including sugar concentration measurement.

The advancement of compact and efficient sensing technologies has driven extensive research in microwave-based sensor designs. Among various approaches, planar sensors have gained significant attention due to their ease of fabrication, cost-effectiveness, and compatibility with modern printed circuit board (PCB) technologies. These sensors are widely utilized in applications such as material characterization, biomedical diagnostics, and industrial monitoring. To achieve optimal performance, the structural configuration and material properties of the sensor must be carefully designed.

Metamaterial-inspired microwave sensors, particularly those based on complementary split-ring resonators (CSRRs), have gained significant attention due to their compact size, high sensitivity, and ease of fabrication [4]. CSRR structures, when integrated with microstrip transmission lines, exhibit strong resonance characteristics that are influenced by the dielectric properties of the surrounding medium. By analyzing shifts in the resonant frequency and variations in the transmission coefficient (S_{21}), the sugar concentration in aqueous solutions can be effectively quantified. While the majority of microwave sensor research has concentrated on glucose detection in blood, studies investigating the application of microwave sensors for measuring sugar content in food, beverages, and agricultural products have rarely reported.

In this study, a CSRR-based microwave sensor incorporating a meander line structure with L-shaped elements (MLL) is proposed for measuring the sugar concentration of sugar solutions. The sensor with unloaded sample is designed to operate at 1.91 GHz on an FR-4 substrate. The variation in sugar concentration directly affects the dielectric properties of the solution, leading to measurable changes in the transmission coefficient. The sugar concentrations are varied from 0 to 30 °Brix, where 1 °Brix corresponds to 1 gram of sugar dissolved in 100 grams of solution**.** Simulated results demonstrate a proportional relationship between sugar concentration and S_{21} with a strong correlation observed through regression analysis.

2. Sensor design and simulation

This simulation is established to estimate sugar concentration of sugar solution, ranging from 0 to 30 °Brix, with measuring transmission coefficient of the proposed sensor at 1**.**73 GHz**.** The design and simulation processes are operated by CST microwave studio and then the result and model analysis are performed in MATLAB**.**

2.1 CSRR sensor with MLL structure design

The proposed sensor, depicted in Fig. 1, is designed on a FR-4 substrate with a thickness of 1.6 mm and a relative permittivity (ε_r) of 4.3. The substrate is coated on both sides with a 35 μm thick copper layer. The

sensor configuration consists of two main components: the MLL element and the feed line, as illustrated in Fig. 1a and 1b, respectively. The MLL structure incorporates a meander line design enclosed by L-shaped elements at each corner to enhance the resonant frequency. This structure is etched onto the ground plane of the substrate. The dimension of feed line is designed and optimized to operate with a 50-Ω connector port for signal excitation.

The design parameters of the proposed sensor are detailed in Table 1. The transmission coefficient (S_{21}) of the proposed sensor is presented in Fig. 2. The results indicate that, in the absence of a sample, the resonant frequency is observed at 1.91 GHz with an S_{21} value of -23.665 dB.

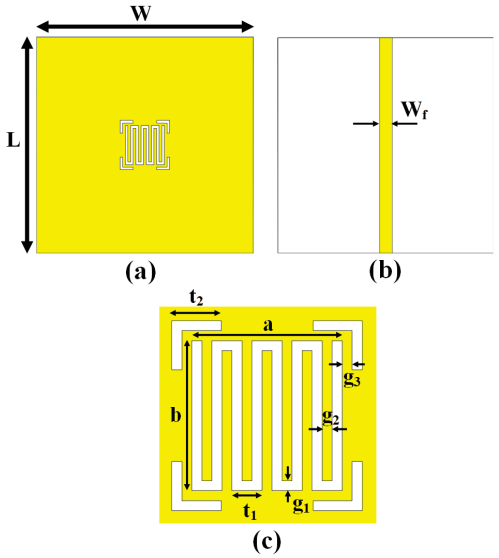


Fig.1 the configuration of the proposed CSRR sensor, comprising (a) the top patch, (b) the bottom patch, and (c) a magnified view of the MLL structure.

Table 1 Design parameters of the proposed design

Parameters	Dimension (mm)	Parameters	Dimension (mm)
W	50	g_2	0.6
L	50	g_3	0.6
a	9	W_f	2.9
b	9	H_c	10
t_1	1.8	r_1	6
t_2	2.95	r_2	5
g_1	0.6	-	-

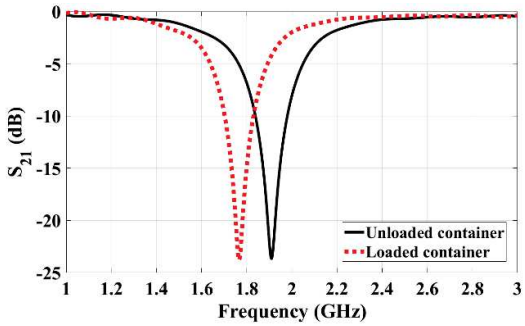


Fig. 2 The simulated transmission result of the proposed sensor with loaded- and unloaded cylindrical container.

2.2 Variation of resonant frequency with loaded- and unloaded container for liquid under test (LUT).

The empty cylindrical container is positioned on the proposed sensor, as illustrated in Fig. 3, with its dimensional specifications provided in Table 1. The container is fabricated from Teflon (PTFE), which has a relative permittivity (ε_r) of 2.1. The results indicate a downward shift in the resonant frequency to 1.766 GHz. However, the S_{21} value exhibits only a slight change, decreasing from -23.665 dB to -23.788 dB when the container is placed on the sensor.

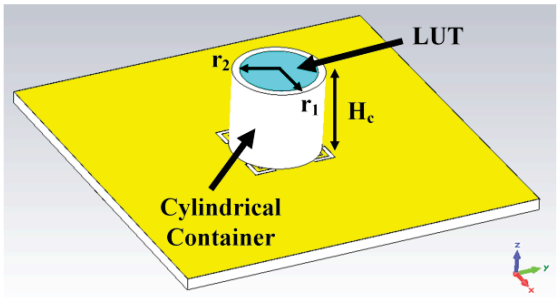


Fig.3 The cylindrical container filled liquid under test (LUT) on the sensing area of proposed sensor.

3. Results and discussions

3.1 Variation of S_{21} on sugar concentration

To analyze the variation of S_{21} in response to different sugar concentrations, a simulated sample is introduced into the container, as illustrated in Fig. 3. The sample represents sugar concentrations ranging from 0 to 30 °Brix. Due to the significant difference in permittivity between the container and the liquid under test (LUT), the resonant frequency experiences a slight shift, decreasing to approximately 1.73 GHz, as depicted in Fig.4a. In addition, the dielectric properties corresponding to each sugar concentration level at 1.73 GHz are determined using the model presented in [5].

As observed in Fig. 4b, the S_{21} values at 1.73 GHz increase with rising sugar concentration, ranging from -22.7566 dB to -22.1572 dB for the concentration from 0

to 30 °Brix, respectively. The results indicate that variations in sugar concentration distinctly influence the interval values of S_{21}. Hence, this trend indicates a proportional relationship between transmission coefficient and sugar concentration.

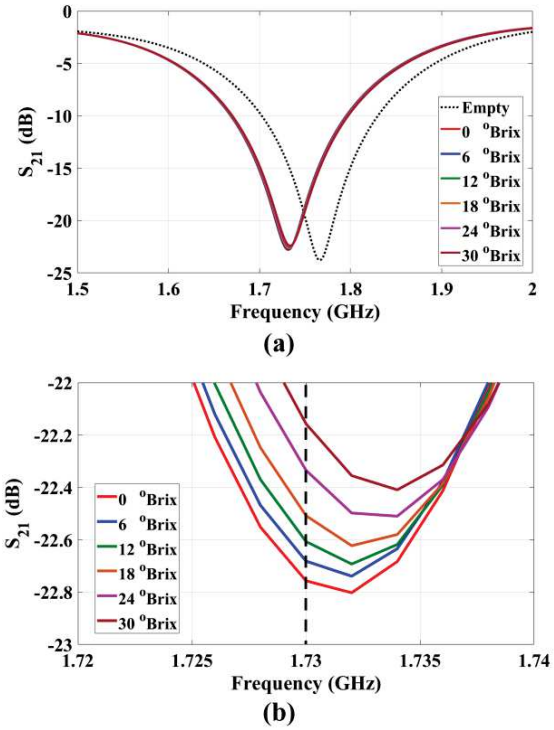


Fig.4 the simulated results of variation of S_{21} with different sugar concentrations; (a) the shift in resonant frequency when the liquid under test (LUT) and (b) a magnified view of the sensing region.

3.2 Predictive modeling

The relationship between S_{21} value and sugar concentration at 1.73 GHz is illustrated in Fig. 5. It is observed that the variation in S_{21} value exhibits a non-linear correlation with sugar concentration. To characterize this relationship, polynomial regression is employed to develop an analytical model. The mathematical expression describing the dependence of S_{21} value on sugar concentration is provided in the following equation

$$P_T(\text{dB}) = 0.0004S^2(^\circ\text{Brix}) + 0.0062S(^\circ\text{Brix}) - 22.749 \quad (1)$$

Where P_T(dB) represents the transmission coefficient in decibels, and S(°Brix) denotes the sugar concentration in degrees Brix. The R^2-value of equation 1 is 0.9977 with 0.01382 of the root mean square error (RMSE). In addition, sensitivity of sensor is defined as the ratio of the change in the magnitude of the S_{21} parameter (ΔS_{21}) to the corresponding variation in sugar concentration (ΔS_c) as expressed in the following equation.

$$S_{S_{21}} = \frac{\Delta S_{21}}{\Delta S_c} \quad (2)$$

The calculated sensitivity of the proposed sensor based on S_{21} value is 0.020 dB/°Brix. To facilitate the prediction of sugar concentration based on the S_{21} value, equation 1 is reformulated as presented in the following equation.

$$S(^\circ\text{Brix}) = -56.629P_T^2(\text{dB}) - 2,494.6P_T(\text{dB}) - 27,442 \quad (3)$$

From the results, the proposed model is applied to estimate sugar concentration of sugar solution using the variation of transmission coefficient at 1.73 GHz. Since this article presents only the simulation results of the proposed sensor, the resonant frequency and S_{21} magnitude observed in experimental measurements may deviate from the simulated values due to fabrication inaccuracies and substrate loss mechanisms.

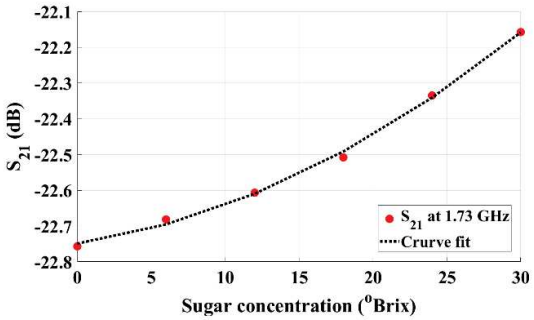


Fig.5 The correlation between S_{21} and sugar concentration at 1.73 GHz

4. Conclusion

The proposed CSRR-based sensor, incorporating an MLL structure, is designed for the precise measurement of sugar concentration in solutions, with concentration levels ranging from 0 to 30 °Brix at a frequency of 1.73 GHz. Simulated results reveal a proportional relationship between sugar concentration and the transmission coefficient (S_{21}), indicating the sensor's sensitivity to variations in sugar content. The regression model developed from this correlation demonstrates a high degree of accuracy, achieving a root mean square error (RMSE) of 0.9977 at 1.73 GHz. These findings confirm the effectiveness of the proposed sensor as a reliable tool for sugar concentration measurement in liquid solutions. In the next phase, the proposed sensor will be fabricated and evaluated using real liquid samples to validate its accuracy.

References

[1] M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, “An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials,” *Biosystems Eng.*, vol. 88, no. 1, pp. 1–18, May 2004.

[2] A. Phuphaphud, K. Saengprachatanarug, J. Posom, K. Maraphum, and E. Taira, "Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy," *Biosyst. Eng.*, vol. 197, pp. 76–90, Sep. 2020.
[3] N. M. Nawi, G. Chen, T. Jensen, and C. Baillie, "Potential technologies to measure sugarcane quality in the field," in *Proc. Int. Conf. Agricult. Eng. (CIGR-AgEng)*, Valencia, Spain, Jul. 2012, pp. 8–12.
[4] C. Wang et al., "High-accuracy complex permittivity characterization of solid materials using parallel interdigital capacitor-based planar microwave sensor," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 5, pp. 6083–6093, Mar. 2021.
[5] R. Sumranbumrung, P. Khunkitti, A. Siritaratiwat, and A. Kruesubthaworn, "Characterization model of dielectric properties of cane sugar solution over 0.5–14 GHz," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, 2021, Art. no. 8003908.



Rujipas Sumranbumrung received the B.Eng. and Ph.D. degree in Electrical Engineering from Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand, in 2015 and 2023, respectively. In 2025, he is currently with the department of Electrical Communication and Intelligent System Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand. His current research interests include electromagnetic waves, antennas design, metamaterial, and microwave imaging.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

วงจรซีมอสชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์แรงดันต่ำมากสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน

An Ultra Low Voltage CMOS Schmitt Trigger Inverter For Energy Harvesting

สุนทร รุ่งเรืองใบหยก รุ่งลาวัลย์ ชูสวัสดิ์ ดรุณี ชายทอง และ อภิรักษ์ เสือเดช*
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: apirak.su@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรซีมอสชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์แรงดันต่ำมากสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน วงจรที่นำเสนออาศัยวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์และชมิททริกเกอร์แบบไดนามิกเทรซโฮลด์มอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม วงจรได้รับการออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีซีมอสขนาด 180 นาโนเมตร ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรสามารถทำงานที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 100 มิลลิโวลต์ และให้ช่วงสัญญาณเอาต์พุตได้กว้างโดยมีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.024 มิลลิโวลต์ ถึง 99.50 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ สำหรับผลการจำลองการทำงานของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนสามารถอ่านค่าความถี่ได้เท่ากับ 3.9 เมกะเฮิรตซ์

คำสำคัญ: ซีมอส, ชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์, การเก็บเกี่ยวพลังงาน, แรงดันต่ำ

Abstract

This paper presents an ultra-low-voltage CMOS Schmitt trigger inverter for energy harvesting. The proposed circuit is based on CMOS inverters and a DTMOS Schmitt trigger operating in the subthreshold region. The circuit is designed using 180nm CMOS technology. The simulation results demonstrate that the circuit can operate at a minimum supply voltage of 100 mV and can provide a wide range of minimum and maximum output swings from 0.024 mV to 99.50 mV, respectively. The simulation results of the ring oscillator read a frequency of 3.9 MHz.

Keywords: CMOS, schmitt trigger inverter, energy harvesting, low voltage

1. บทนำ

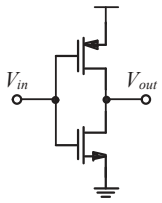
ทุกวันนี้ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ อาทิเช่น โครงข่ายอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย (Wireless Sensor Network, WSN) ระบบเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์แบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) อุปกรณ์ทางด้านชีวการแพทย์ (Biomedical Devices) และอุปกรณ์สวมใส่บนร่างกายมนุษย์ (Wearable Devices) เป็นต้น [1] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนใช้พลังงานจากแบตเตอรี่และจำเป็นต้องบริโภคกำลังงานไฟฟ้าที่ต่ำเพื่อการใช้งานแบตเตอรี่ให้ยาวนานยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังต้องอาศัยวงจรชาร์จประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่อีกด้วย จึงมีงานวิจัยที่ใช้หลักการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมนำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด ไม่สิ้นเปลืองและไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ได้แก่ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy) พลังงานแสง (Light Energy) พลังงานความร้อน (Thermal Energy) และพลังงานคลื่นความถี่ (RF Energy) เป็นต้น [1,2] อย่างไรก็ตาม แหล่งกำเนิดพลังงานดังกล่าวมีข้อจำกัดเนื่องจากมีความสามารถในการจ่ายกำลังงานและแรงดันไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมาก [3] จึงจำเป็นต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อมาจัดการกำลังงานจากการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยต้องทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำมากได้

ในระบบของวงจรรวมจัดการกำลังงานสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน วงจรกำเนิดสัญญาณเป็นส่วนหนึ่งที่ถูกนำมาใช้งานและวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนโดยใช้ซีมอสอินเวอร์เตอร์จึงเป็นที่นิยมใช้เช่นเดียวกัน [4] เนื่องจากวงจรไม่ซับซ้อน มีขนาดเล็ก และสามารถทำงานได้ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำได้ดี ในบทความวิจัย [5] ได้นำเสนอวงจรชมิททริกเกอร์โดยใช้ไดนามิกเทรซโฮลด์มอสทรานซิสเตอร์เพื่อทำให้แรงดันขีดเริ่มลดลง แต่วงจรดังกล่าวทำงานในย่านสตรองอินเวอร์ชันจึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่แรงดันต่ำมากได้ และบทความวิจัย [6] ได้นำเสนอวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์แบบซ้อนกันสามชั้นทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม ซึ่งทำให้เอาต์พุตสามารถสวิงได้กว้างในขณะทำงานที่แรงดันต่ำได้ ดังนั้นผู้วิจัยได้นำเสนอวงจรซีมอสชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์เพื่อใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนที่เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานภายในไอซีสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงานต่อไป

2. หลักการทำงานและการออกแบบวงจร

2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม

มอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Sub-threshold Region) เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานกับวงจรที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำ โดยสมการกระแสของมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่ม [7] แสดงดังในสมการที่ (1) – (4)



รูปที่ 1 วงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์

$$I_{DN} = I_N e^{\left(\frac{V_{GS}-V_{THN}}{nV_T}\right)}\left[1-e^{-\frac{V_{DS}}{V_T}}\right] \quad (1)$$

โดยที่ I_N หาได้จาก

$$I_N = \mu_N C_{ox}\left(\frac{W}{L}\right)(n-1)V_T^2 \quad (2)$$

โดยที่ μ_N คือ ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน C_{ox} คือ ความจุของเกตออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่ W คือ ความกว้างของแชนเนล L คือ ความยาวแชนเนล V_{THN} คือ แรงดันขีดเริ่มและ V_T คือ แรงดันอุณหภูมิ ซึ่งหาได้จาก

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

โดยที่ K และ q คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ และประจุของอิเล็กตรอน ตามลำดับ ส่วน n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแกว่งในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มซึ่งกำหนดโดย

$$n = 1 + \frac{C_d}{C_{ox}} \quad (4)$$

โดยที่ C_d คือ ความจุของชั้นดีพลีชันต่อหน่วยพื้นที่

เมื่อนำมอสทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มมาออกแบบวงจรซีมอสอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 เราสามารถวิเคราะห์หาแรงดันเอาต์พุตระดับสูง (V_{OH}) และแรงดันเอาต์พุตระดับต่ำ (V_{OL}) [7] ได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

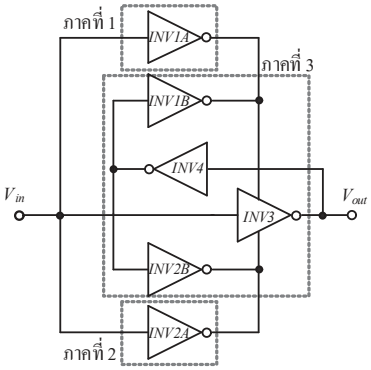
$$V_{OH} = V_{DD} + V_T \ln\left[1-\frac{I_N}{I_P}e^{\left(\frac{-V_{DD}-V_{THN}+|V_{THP}|}{nV_T}\right)}\right] \quad (5)$$

$$V_{OL} = V_T \ln\left[\frac{1}{1-\frac{I_P}{I_N}e^{-\left(\frac{V_{DD}-V_{THN}+|V_{THP}|}{nV_T}\right)}}\right] \quad (6)$$

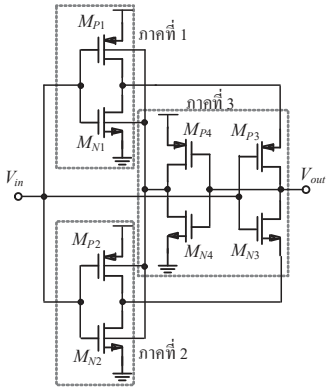
2.2 วงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

โครงสร้างวงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอประกอบด้วย 3 ภาค คือ ภาคที่ 1 (*INV1A*) และภาคที่ 2 (*INV2A*) ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณภาคแรก และภาคที่ 3 (*INV3*, *INV4*, *INV1B*, *INV2B*) ทำหน้าที่เป็นวงจรกลับสัญญาณเอาต์พุตชนิดป้อนกลับแบบบวก ซึ่งหลักการทำงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ วงจรอินเวอร์เตอร์ *INV1A* และ *INV2A* จะขยายสัญญาณและส่งไปจ่ายสัญญาณให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ *INV3* และขณะเดียวกันสัญญาณเอาต์พุตจากวงจร *INV3* จะถูกส่งไปผ่านวงจร *INV4* และจากนั้นสัญญาณถูกส่งไปให้วงจร *INV1B* และ *INV2B* เพื่อกลับสัญญาณแบบบวกจ่ายให้กับวงจรอินเวอร์เตอร์เอาต์พุต (*INV3*) ส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) ถูกดึงเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD}) และเข้าใกล้กราวด์ (0V) มากขึ้น

วงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ ประกอบด้วยวงจร *INV1A* และ *INV2A* ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M_{P1}, M_{N1} และ M_{P2}, M_{N2} ตามลำดับ วงจร *INV3* และ *INV4* ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M_{P3}, M_{N3} และ M_{P4}, M_{N4} ตามลำดับ และวงจร *INV1B* และ *INV2B* จะอาศัยขาบอดี้เป็นอินพุตทำงานร่วมกับวงจรภาคแรกได้แก่ ทรานซิสเตอร์ M_{P1}, M_{N1} และ M_{P2}, M_{N2} ตามลำดับเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 หลักการทำงานของชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

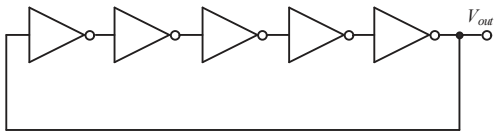


รูปที่ 3 วงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ

การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อสัญญาณอินพุตมีระดับต่ำ (LOW) หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์โวลต์ (G_{ND}) ทรานซิสเตอร์ M_{P1}, M_{P2}, M_{P3} และ M_{N4} จะทำงาน โดยที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรภาคที่ 1 และภาคที่ 2 มีค่าเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD}) และสัญญาณถูกนำไปขยายโดยวงจรภาคที่ 3 ทำให้สัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) มีค่าเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD}) โดยที่เอาต์พุตนี้วงจรจะถูกต่อในลักษณะป้อนกลับสัญญาณแบบบวกทำงานเป็นวงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ อาศัยผ่านทางอินพุตขาบอดี้ของอินเวอร์เตอร์ภาคที่ 1 (M_{P1} และ M_{N1}) และภาคที่ 2 (M_{P2} และ M_{N2}) ซึ่งสัญญาณอินพุตที่ขาเกตและขาบอดี้ของมอสทรานซิสเตอร์จะทำงานในลักษณะที่เสริมกันช่วยทำให้วงจรสามารถขยายสัญญาณเอาต์พุตได้กว้างมากขึ้น ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) มีค่าเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD}) มากขึ้น

ในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณอินพุตมีระดับสูง (HIGH) หรือมีค่าเข้าใกล้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD}) ทำให้ทรานซิสเตอร์ M_{P4}, M_{N1}, M_{N2} และ M_{N3} จะทำงาน โดยที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรภาคที่ 1 และภาคที่ 2 มีค่าเข้าใกล้ศูนย์โวลต์ (G_{ND}) และสัญญาณถูกนำไปขยายโดยวงจรภาคที่ 3 ทำให้สัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์โวลต์ (G_{ND}) โดยที่เอาต์พุตนี้วงจรจะถูกต่อในลักษณะป้อนกลับสัญญาณแบบบวกทำงานเป็นวงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ อาศัยผ่านทางอินพุตขาบอดี้ของอินเวอร์เตอร์ภาคที่ 1 (M_{P1} และ M_{N1}) และภาคที่ 2 (M_{P2} และ M_{N2}) ซึ่งสัญญาณอินพุตที่ขาเกตและขาบอดี้ของมอสทรานซิสเตอร์จะทำงานในลักษณะที่เสริมกันช่วยทำให้วงจรสามารถขยายสัญญาณเอาต์พุตได้กว้างมากขึ้น ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุต (V_{out}) จึงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์โวลต์ (G_{ND}) มากขึ้นเช่นเดียวกัน

การประยุกต์ใช้งานวงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนซึ่งทำได้โดยการนำอินเวอร์เตอร์มาต่อเรียงกันจำนวน 5 ชุด เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีความถี่สูงสุดและเป็นจำนวนชุดขั้นต่ำที่ทำให้รูปคลื่นสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม แสดงดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนโดยใช้อินเวอร์เตอร์ 5 ชุด

เราสามารถวิเคราะห์หาความถี่ที่กำเนิด (f_{OSC}) ได้ดังสมการที่ (7)

$$f_{OSC} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot n \cdot t_P} \tag{7}$$

โดยที่ f_{OSC} คือ ความถี่ที่กำเนิด (หน่วย เฮิรตซ์)

n คือ จำนวนชุดของอินเวอร์เตอร์

t_P คือ ค่าหน่วงเวลาของอินเวอร์เตอร์แต่ละชุด (หน่วย วินาที)

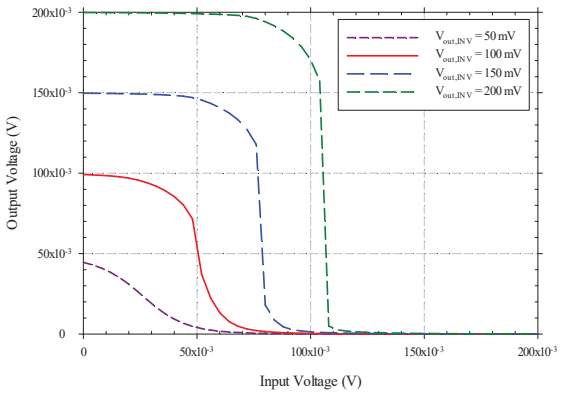
2.3 การจำลองการทำงาน

วงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอ ออกแบบและจำลองการทำงานโดยใช้เทคโนโลยีซีมอสขนาด 180 นาโนเมตร และทำงานด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 100 มิลลิโวลต์ สำหรับขนาดของมอสทรานซิสเตอร์ทุกตัว แสดงดังตารางที่ 1

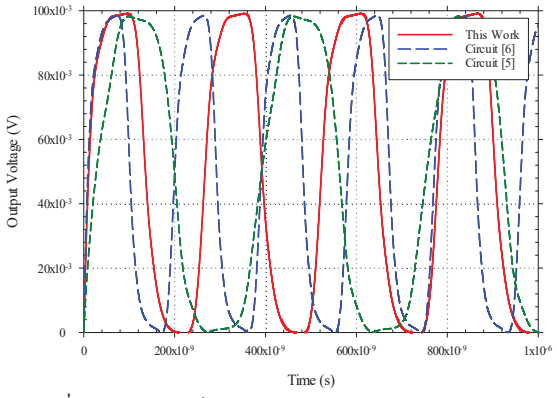
จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าวงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ดีที่แรงดันไฟฟ้าอินพุตต่ำสุด 100 มิลลิโวลต์ โดยมีค่าแรงดันสวิตชิ่ง (Switching Voltage, V_{SW}) เท่ากับ 50.26 มิลลิโวลต์ ขณะที่ได้รับช่วงสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้างโดยมีแรงดันเอาต์พุตต่ำสุด (V_{OL}) และแรงดันเอาต์พุตสูงสุด (V_{OH}) เท่ากับ 0.024 มิลลิโวลต์ และ 99.50 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลตอบสนองสัญญาณทรานสเซียนต์ปรากฏว่าวงจรที่นำเสนอให้ช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time, t_R) และช่วงเวลาขาลง (Fall Time, t_F) เท่ากับ 33.58 นาโนวินาที และ 34.19 นาโนวินาที ตามลำดับ โดยมีค่าเวลาหน่วงที่ช่วงเวลาเปลี่ยนผ่าน (Propagation Delay Time, t_p) เท่ากับ 20.80 นาโนวินาที และมีกำลังงานสูญเสียขณะช่วงเวลาเปลี่ยนผ่าน (Dynamic Power Dissipation, P_D) เท่ากับ 16 นาโนวัตต์ และการประยุกต์ใช้วงจรชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนผลจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าวงจรที่นำเสนอสามารถกำเนิดความถี่ได้เท่ากับ 3.9 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำงานของวงจรที่นำเสนอกับงานวิจัยอื่น ซึ่งวงจรที่นำเสนอสามารถให้ช่วงสวิงของสัญญาณเอาต์พุตกว้างที่สุด

ตารางที่ 1 ขนาดของมอสทรานซิสเตอร์

มอสทรานซิสเตอร์	ขนาด	
	W (µm)	L (µm)
M_{P1}	3.50	0.24
M_{N1},M_{N2},M_{N3},M_{P4}	0.24	0.24
M_{P2}, M_{P3}, M_{N4}	2.50	0.24



รูปที่ 5 คุณลักษณะสมบัติการถ่ายโอนแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 6 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการทำงานของวงจรที่นำเสนอกับงานวิจัยอื่น

พารามิเตอร์	วงจร [5]	วงจร [6]	วงจรที่เสนอ
แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (V_{DD})	100 mV	100 mV	100 mV
แรงดันสวิตชิ่ง (V_{SW})	50.34 mV	50.12 mV	50.26 mV
กำลังงานสูญเสีย (P_D)	15 nW	12.2 nW	16 nW
ค่าเวลาหน่วง (t_p)	17.24 ns	16.81 ns	20.80 ns
ช่วงเวลาขาขึ้น (t_R)	25.60 ns	29.65 ns	33.58 ns
ช่วงเวลาขาลง (t_F)	24.07 ns	30.45 ns	34.19 ns
แรงดันเอาต์พุตต่ำสุด (V_{OL})	0.195 mV	0.043 mV	0.024 mV
แรงดันเอาต์พุตสูงสุด (V_{OH})	97.30 mV	98.50 mV	99.50 mV
ความถี่วงจรกำเนิดสัญญาณ (f_{OSC})	2.75 MHz	5.24 MHz	3.90 MHz

3. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอวงจรซีมอสชมิททริกเกอร์อินเวอร์เตอร์แรงดันต่ำมากสำหรับการเก็บเกี่ยวพลังงาน วงจรได้รับการออกแบบด้วยมอสทรานซิสเตอร์ซึ่งทำงานในย่านต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มและใช้เทคโนโลยีซีมอสขนาด 180 นาโนเมตร วงจรทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ 100 มิลลิโวลต์ ผลการจำลองการทำงานพบว่าวงจรสามารถให้ช่วงสวิงของแรงดันเอาต์พุตได้กว้างประมาณเท่ากับช่วงแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจนถึงศูนย์โวลต์ และสำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบวงแหวนสามารถกำเนิดความถี่ได้เท่ากับ 3.90 เมกกะเฮิรตซ์

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่ การสืบค้นข้อมูล การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจน นายมรุพงศ์ แสงวิมาน นายปิยนัฐ โสมแหละ และ นางสาวรูไวดา หะมะ ที่ช่วยดำเนินการวิจัยให้สำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

[1] B. Y. León Ávila, C. A. García Vázquez, O. Pérez Baluja, D. T. Cotfas, and P. A. Cotfas, “Energy harvesting techniques for wireless sensor networks: A systematic literature review,” in Energy Strategy Reviews, vol. 57, 25 Dec. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101617.

[2] M. U. Mushtaq, H. Venter, A. Singh, and M. Owais, “Advances in Energy Harvesting for Sustainable Wireless Sensor Networks Challenges and Opportunities,” Hardware, 3(1), 20 Feb. 2025, doi: 10.3390/hardware3010001.

[3] M. Grossi, “Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: A review,” in Electronics, vol. 10, pp. 1–53, 2021, doi: 10.3390/electronics10060661.

[4] D. Mohammadjavad, “A 60 mV Input Voltage, Process Tolerant Start-Up System for Thermoelectric Energy Harvesting,” IEEE Transactions on Circuits and Systems. 65(10), pp. 3568–3577, Oct. 2018, doi: 10.1109/TCSI.2018.2834312.

[5] C. Zhang, A. Srivastava and P.K. Ajmera, “Low voltage CMOS Schmitt trigger circuits,” Electronics Letters. 39(24), pp. 1696–1698, Dec. 2003, doi: 10.1049/el:20031131.

[6] Bose Soumya and L. Matthew, “A stacked-Inverter Ring Oscillator for 50mV Integrated Cold-Start of Energy Harvesting,” 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2018, doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351445.

[7] S. M. Sharroush, “Analysis of the subthreshold CMOS logic inverter,” Ain Shams Engineering Journal, 9(4), pp. 1001–1017, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.05.005.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID สำหรับการติดตามการเบิกจ่ายกุญแจ

Application of RFID Technology for Key Management and Tracking System

สุวรรณี ปัญยศ[1*] นิวัติ นวลกัน[1] สุจิตรา จีนะวงษ์[1]และศรัญญู กันทะวงค์[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
E-mail: suwannee_pa@rmutl.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนา และทดสอบระบบควบคุมการเข้าถึงตู้เก็บกุญแจภายในห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการกุญแจ ลดภาระของบุคลากร และเพิ่มความปลอดภัยของทรัพย์สิน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยโมดูล ESP32, เครื่องอ่าน RFID-RC522, จอแสดงผลแบบ TFT และการเชื่อมต่อกับ Google Sheets สำหรับบันทึกข้อมูลการเข้าใช้งาน

การทดสอบการอ่านบัตรใน 1–5 ซม. และมุมการอ่าน 0°–180° การเปิดตู้ด้วยบัตรที่ได้รับอนุญาต การปฏิเสธบัตรที่ไม่ได้รับอนุญาต และการบันทึกข้อมูลการใช้งาน ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถอ่านแท็ก RFID ได้อย่างแม่นยำในระยะ 1–3 เซนติเมตร โดยมีอัตราความสำเร็จเฉลี่ย 67% และสามารถเปิดตู้ได้อย่างถูกต้องถึง 83% เมื่อใช้บัตรที่ได้รับอนุญาต และสามารถปฏิเสธบัตรที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ในอัตรา 96% และสามารถบันทึกข้อมูลผู้ใช้งานลงใน Google Sheets ได้

คำสำคัญ: RFID, ตู้เก็บกุญแจ, ระบบควบคุมการเข้าใช้งาน

Abstract

This project aims to design, develop, and test an access control system for a key storage cabinet in an electronics laboratory, utilizing RFID technology to improve key management efficiency, reduce staff workload, and enhance asset security. The developed system consists of an ESP32 module, an RFID-RC522 reader, a TFT display, and integration with Google Sheets for logging access data.

Testing included evaluating tag readability at distances of 1–5 cm and reading angles of 0°–180°, cabinet unlocking with authorized cards, denial of unauthorized cards, and access log recording. The results demonstrated that the system accurately reads RFID tags within a 1–3 cm range, achieving an average success rate of 67%. The system correctly unlocked the cabinet 83% of the time when authorized cards were used and rejected unauthorized cards with a 96% success rate. Additionally, user access data was successfully recorded in Google Sheets..

Keywords: RFID, key cabinet, access control system

1. บทนำ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบเปิด-ปิดประตูด้วยการสื่อสารแบบ RFID (Radio Frequency Identification) ในระบบรักษาความปลอดภัย นับเป็นนวัตกรรมที่มีนัยสำคัญในการเสริมสร้างประสิทธิภาพด้านการควบคุมการเข้า-ออกพื้นที่ต่างๆ ซึ่งมีความสอดคล้องกับบริบททางสังคมในปัจจุบันที่มีอัตราการเกิดอาชญากรรมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ากับระบบรักษาความปลอดภัยจึงเป็นพาราไดม์ใหม่ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการด้านความมั่นคงปลอดภัยได้อย่างมีประสิทธิผล

จากการสำรวจสภาพปัญหาเชิงประจักษ์ พบว่าสถานศึกษา โรงแรม และสถานประกอบการต่างๆ ยังประสบปัญหาในการบริหารจัดการระบบกุญแจแบบดั้งเดิม (Traditional Key Management) ซึ่งจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรบุคคลในการดูแลและกระจายกุญแจ ก่อให้เกิดภาระงานที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีความเสี่ยงสูงต่อการสูญหายของกุญแจหรือทรัพย์สินมีค่า ดังนั้น การพัฒนา "ระบบตู้เก็บและเบิกจ่ายกุญแจอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี RFID" จึงเป็นวิธีการเชิงระบบ (Systematic Approach) ที่มีศักยภาพในการยกระดับกระบวนการบริหารจัดการกุญแจให้มีความเป็นระเบียบแบบแผนและเพิ่มระดับความปลอดภัยอย่างมีนัยสำคัญ

ระบบดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านการจัดเก็บข้อมูลและการแสดงตัวตนของผู้ใช้งาน (User Authentication) ผ่านบัตรประจำตัวอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเอื้อต่อการตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) ได้อย่างแม่นยำ ลดความจำเป็นในการใช้ทรัพยากรบุคคล (Human Resources) ในการแจกจ่ายกุญแจ และลดความเสี่ยงจากการโจรกรรมหรือการใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาต (Unauthorized Access) อีกทั้งยังมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการของแผนกอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ซึ่งมีทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูง (High-Value Assets)

ในมิติของความยั่งยืน (Sustainability) ระบบนี้ยังถือเป็นมาตรการเชิงป้องกัน (Preventive Measures) ที่มีประสิทธิภาพ สามารถ

ลดการสูญเสียทรัพยากรและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังสอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาระบบความปลอดภัยแบบบูรณาการ (Integrated Security System) ซึ่งเป็นแนวทางที่มีการยอมรับในระดับสากลว่ามีผลสัมฤทธิ์สูงในการป้องกันทรัพย์สินและทรัพยากรที่มีค่า

จากประเด็นปัญหาและความจำเป็นดังกล่าว การวิจัยและพัฒนาระบบตู้เก็บและเบิกจ่ายกุญแจอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี RFID จึงเป็นการดำเนินการที่มีความสอดคล้องกับความต้องการในเชิงประจักษ์และมีความเป็นไปได้สูงในการนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการระบบความปลอดภัยในสถาบันการศึกษาและองค์กรต่างๆ อย่างมีประสิทธิผล

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยี RFID (Radio Frequency Identification) คือ เทคโนโลยีที่ใช้คลื่นความถี่วิทยุในการระบุและติดตามวัตถุ โดยไม่จำเป็นต้องมีการสัมผัสโดยตรง ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ แท็ก (Tag), ตัวอ่าน (Reader) และระบบประมวลผล ในระบบจัดการกุญแจ RFID ช่วยในการระบุและบันทึกข้อมูลการหยิบ-คืนกุญแจโดยอัตโนมัติ เพิ่มความปลอดภัยและความแม่นยำในการจัดการทรัพย์สิน

บอร์ดควบคุม ESP32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถสูง รองรับ Wi-Fi และ Bluetooth เหมาะสำหรับ IoT และระบบฝังตัว (Embedded Systems) มีหน่วยประมวลผลสองแกน (dual-core) และหน่วยความจำเพียงพอสำหรับงานที่ต้องประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วง เช่น เครื่องอ่าน RFID และจอแสดงผล

เครื่องอ่าน RFID-RC522 เป็นโมดูลอ่าน/เขียน RFID ที่ทำงานในย่านความถี่ 13.56 MHz ใช้สื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเตอร์เฟส SPI มีขนาดเล็ก ราคาย่อมเยา และนิยมใช้ในงานระบบควบคุมการเข้าถึงหรือระบบยืนยันตัวตน เช่น การจัดการกุญแจอัจฉริยะ

จอแสดงผลแบบ TFT (Thin Film Transistor) เป็นจอแสดงผลที่ให้ภาพสีและรายละเอียดสูง มักใช้ในงานที่ต้องการอินเตอร์เฟสผู้ใช้ (User Interface) ที่เข้าใจง่าย โดยในระบบนี้ใช้แสดงสถานะการใช้งานกุญแจ เช่น รหัสผู้ใช้ เวลาหยิบ/คืน และคำแจ้งเตือน

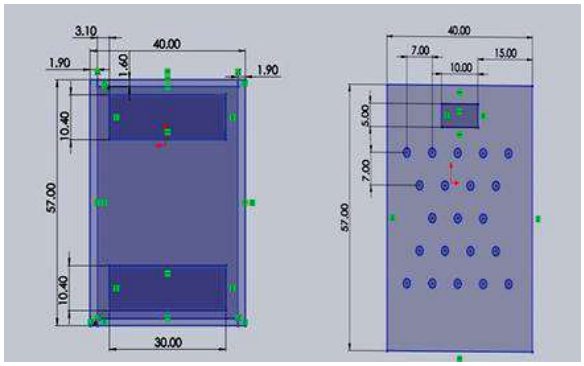
Google Sheets และการเชื่อมต่อ IoT การเชื่อมต่อข้อมูลจาก ESP32 เข้าสู่ Google Sheets เป็นรูปแบบหนึ่งของการบันทึกข้อมูลบน Cloud ทำให้สามารถตรวจสอบย้อนหลังได้จากทุกที่ผ่านอินเทอร์เน็ต เพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือในการจัดการกุญแจ พร้อมทั้งลดภาระของบุคลากรที่ต้องบันทึกข้อมูลด้วยตนเอง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบตะกร้าสินค้าอัจฉริยะ โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID ในการระบุสินค้าแบบอัตโนมัติภายในร้านค้า เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ประกอบการและลูกค้าในการตรวจสอบราคาสินค้า ยอดรวม และรายการสินค้าที่เลือกซื้อผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ลดความยุ่งยากจากการจดด้วยมือหรือใช้เครื่องคิดเลข อีกทั้งช่วยให้ลูกค้าประเมินรายจ่ายก่อนชำระเงิน ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 1) แอปพลิเคชันสำหรับร้านค้า เพื่อใช้ในการเพิ่มรายการสินค้า ซึ่งจำกัดสิทธิ์ให้เฉพาะเจ้าของหรือพนักงานที่ได้รับมอบหมาย และ 2) เว็บแอปพลิเคชันสำหรับลูกค้า เพื่อแสดงรายการสินค้าในตะกร้าและคำนวณยอดรวม โดยเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลส่วนกลาง

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RFID เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานของบริษัท ไปรษณีย์ไทย จำกัด โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากศูนย์บริการ 152 แห่ง ด้วยโมเดลสมการโครงสร้าง (SEM) พบว่า RFID ส่งผลเชิงบวกต่อความสำเร็จในการดำเนินงาน โดยเฉพาะด้านประสิทธิภาพการทำงาน การวางแผนกลยุทธ์ และมุมมองทางธุรกิจ ช่วยเสริมผลลัพธ์ดังกล่าว อีกทั้งยังมีการพัฒนาต้นแบบตะกร้าสินค้าอัจฉริยะที่ใช้ RFID อ่านแท็กสินค้าได้แม่นยำ 100% ในระยะ 1–4 เซนติเมตร และส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ได้ในระยะ 0–25 เมตร ระบบสามารถคำนวณยอดรวมสินค้าได้อย่างถูกต้องและทันที

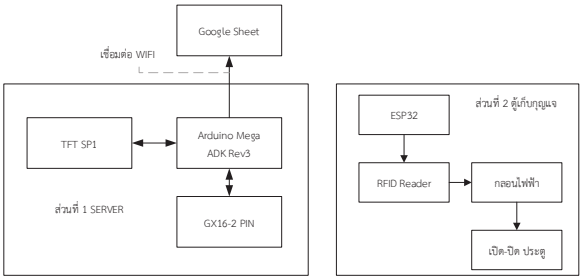
2.3 การออกแบบและสร้างวงจร



รูปที่ 1 การออกแบบชิ้นงาน เป็นการออกแบบ ฝาปิดตู้เก็บและเบิกจ่ายกุญแจ ห้องปฏิบัติการหลักสูตรอิเล็กทรอนิกส์

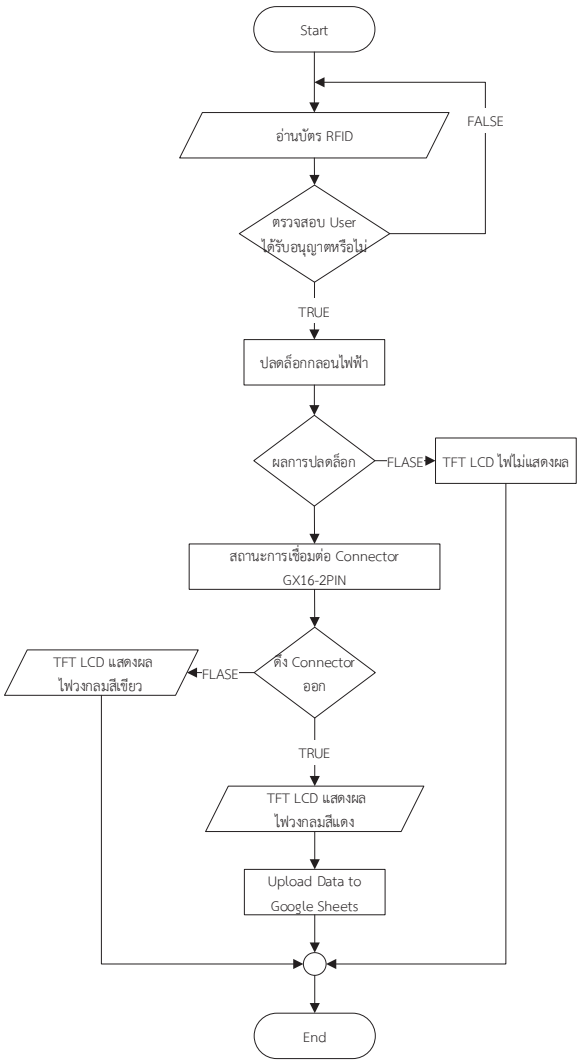
2.4 หลักการทำงานของวงจร

การต่ออุปกรณ์ ESP32 โมดูลอ่านบัตร RFID ขนาดเล็ก RFID RC522 Module Card Reader และส่งข้อมูลไปยัง google sheet การติดตั้งสถานะบน จอ TFT SPI และต่ออุปกรณ์ จาก คอนเนคเตอร์ GX16-2PIN เข้า Arduino Mega และส่งข้อมูลไปยัง google sheet

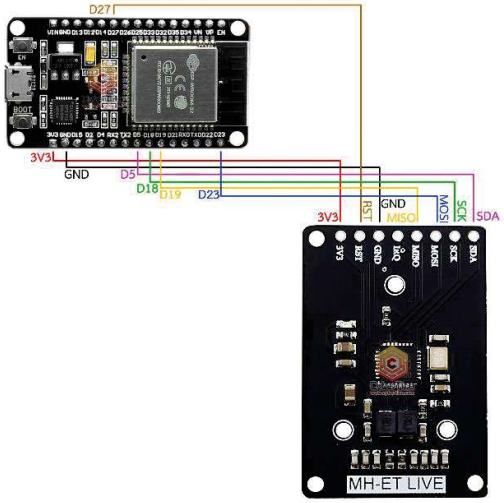


รูปที่ 2 หลักการทำงานของวงจร ตู้เก็บและเบิกจ่ายกุญแจห้องปฏิบัติการ

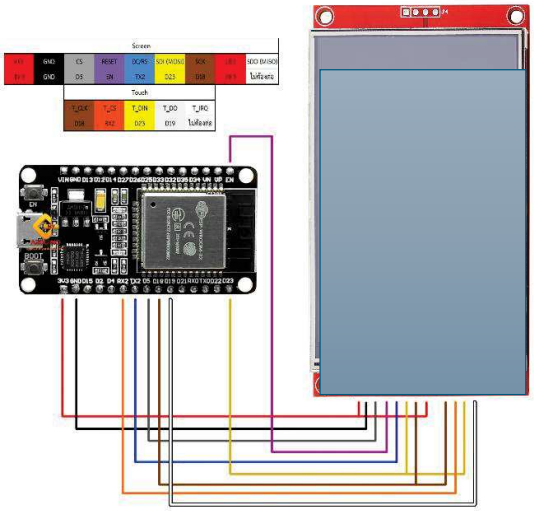
2.5 ลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบ



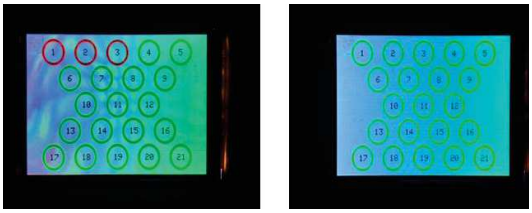
รูปที่ 3 Flow chart การทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4 การต่ออุปกรณ์ ESP32 โมดูลอ่านบัตร RFID ขนาดเล็ก RFID RC522 Module Card Reader



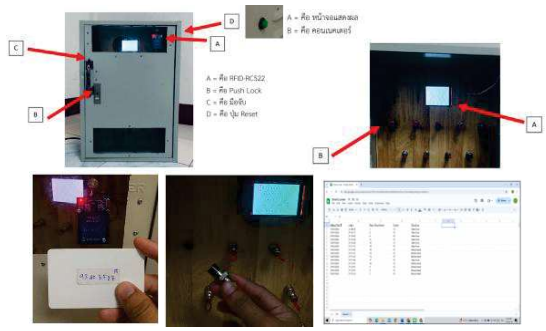
รูปที่ 5 การต่ออุปกรณ์ ESP32 จอแสดงผล TFT LCD ขนาด 3.5" Color module



รูปที่ 6 แสดงสถานะการนำกุญแจ เข้า – ออก

แสดงการนำกุญแจ เข้า - ออก โดยแจ้งข้อมูลไปยัง Goolesheet และแสดงสถานะการนำกุญแจ เข้า – ออก โดยมี 2 สถานะ

1. แสดงสถานะสีแดง = การนำออกไป 2. แสดงสถานะสีเขียว = ยังมีอยู่ สถานะสีเขียว = ยังมีอยู่



รูปที่ 7 ผลการทำงาน

3. สรุป

3.1 การทดลองการอ่านบัตร

แสดงผลเงื่อนไขการทดสอบ วางแท็กที่ระยะ 1, 2, 3, 4, และ 5 ซม. , มุมการอ่าน (องศา), จำนวนระยะละ 30 ครั้ง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการใช้งาน

ระยะห่าง (ซม.)	จำนวนครั้งที่ทดสอบ (ครั้ง)	จำนวนครั้งที่สำเร็จ (ครั้ง)	จำนวนครั้งที่ไม่สำเร็จ (ครั้ง)	% สำเร็จ
1	30	20	10	67
2	30	20	10	67
3	30	20	10	67
4	30	0	30	0
5	30	0	30	0

3.2 ผลการทดลองการใช้งาน

ผลการทดลองระยะการอ่านบัตร, การเปิดตู้ด้วยบัตรที่ได้รับอนุญาต, การปฏิเสธการเข้าถึง, มุมการอ่าน และบันทึกข้อมูล Sheet

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลอง

หัวข้อการทดลอง	จำนวนการทดสอบ (ครั้ง)	จำนวนครั้งที่สำเร็จ	ความสำเร็จ (%)
ระยะการอ่านบัตร	150	100	67%
การเปิดตู้ด้วยบัตรที่ได้รับอนุญาต	30	25	83%
การปฏิเสธการเข้าถึง	30	29	96%
มุมการอ่านบัตร	150	75	50%
การบันทึกข้อมูลผู้ใช้งาน	30	25	83%

3.2 สรุปผลการทดลอง

ระบบควบคุมการเข้าถึงตู้เก็บกุญแจด้วยเทคโนโลยี RFID ที่พัฒนาขึ้นนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการจัดการกุญแจในห้องปฏิบัติการ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของระบบใน 3 ด้านหลัก ได้แก่ (1) ความแม่นยำในการปฏิเสธการเข้าถึง ระบบสามารถระงับการใช้งานจากบัตรที่ไม่ได้รับอนุญาตได้สูง 96% สะท้อนถึงความน่าเชื่อถือด้านความปลอดภัย (2) ประสิทธิภาพการทำงาน เมื่อใช้บัตรที่ลงทะเบียนไว้ ระบบสามารถเปิดตู้ได้สำเร็จ 83% ของการทดสอบ พร้อมบันทึกข้อมูลผู้ใช้งาน (ชื่อผู้ใช้ เวลาเข้าใช้งาน) ลงในระบบคลาวด์อย่างสมบูรณ์ (3) ข้อจำกัดด้านเทคนิค การอ่านข้อมูลจากบัตร RFID มีประสิทธิภาพลดลงเมื่อระยะห่างเกิน 3 เซนติเมตร และเมื่อวางบัตรในมุมเอียงเกิน 60° โดยอัตราความสำเร็จในการอ่านลดลงเหลือ 50% ภายใต้สภาวะสถานที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

4. กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

[1] Chotsirimethanon, S., & Srisawat, J. (2022). การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID) ที่มีผลต่อผลการดำเนินงานของบริษัท ไปรษณีย์ไทย จำกัด [Utilization of Radio Frequency Identification (RFID) on Operational Performance of Thailand Post Company Limited]. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, 1(2), 1–12.

[2] ธีรถวัลย์ ปานกลาง ร. ส. ค. (2023). การพัฒนาระบบตะกร้าสินค้าอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี RFID. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, 8(1), 71–84. https://doi.org/10.14456/journalindus.2023.6

[3] Cybertice. (2568, 20 มกราคม). สอนใช้งาน ESP32 โมดูลอ่านบัตร RFID 13.56MHz ขนาดเล็ก RFID RC522 Module Card Reader. สืบค้นจาก https://www.cybertice.com/

[4] พิรุฬห์ แก้วฟุ้งรังษี. (2564). ตู้ล็อคเกอร์อัจฉริยะสำหรับบัณฑิตในพิธีพระราชทานปริญญาบัตร. วารสารสหศาสตร์ศรีปทุม ชลบุรี, 7(2), 154–165. สืบค้นจาก https://so04.tci-thaijo.org/

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ชุดรับส่งข้อมูลอัตราการเต้นของหัวใจสำหรับการดูแลสุขภาพทางไกลผ่านโครงข่ายลอร่า
Heart Rate Data Transmission System for Telehealth via LoRa Network

วิชัย ครองกิจศิริ[1*] พัชรี ครองกิจศิริ[2] มีชัย แจ่มใส[1] วลันดา อุ้ยวงค์[1] และ ภาณุพงศ์ ปัญญาสาร[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, [2]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร เลขที่ 199 หมู่ 3 ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160
E-mail: wichai.kr@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์วัดอัตราการเต้นของหัวใจในระบบตรวจติดตามสุขภาพทางไกลผ่านโครงข่ายลอร่า (LoRa) เพื่อพัฒนาระบบที่สามารถติดตามข้อมูลสุขภาพของผู้ป่วยหรือบุคคลทั่วไปได้ในระยะไกล หรือพื้นที่ที่มีการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตจำกัด ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดอัตราการเต้นของหัวใจจะถูกส่งผ่านตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังโมดูลรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ SX1276 ซึ่งเป็นชิพโมดูลลอร่า หลังจากนั้นจะถูกส่งไปยังคลาวด์ Thinkspeak ผ่านตัวลอร่าเกตเวย์ สำหรับการติดตามและการแสดงผลข้อมูลสุขภาพแบบเรียลไทม์ ข้อมูลที่เก็บได้จะถูกส่งต่อไปยัง Google Sheets เพื่อการเก็บรักษาข้อมูลในระยะยาว

จากผลการทดลองของระบบตรวจติดตามสุขภาพทางไกลพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางโดยใช้ค่า SF (Spreading Factor) SF12 และค่ากำลังส่งที่ 20 dBm. ในระยะทาง 200, 400, 600, 800 และ 1000 เมตร แสดงให้เห็นถึงความสามารถของอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบการส่งข้อมูลระยะทางต่างๆ โดยค่าความแรงของสัญญาณ RSSI จะแปรผกผันกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในเบื้องต้นที่กำลังส่ง และสายอากาศที่ใช้งานลักษณะนี้สามารถยอมรับผลการทดลองได้ และจะมีการปรับปรุงให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

คำสำคัญ: อัตราการเต้นหัวใจ, ลอร่า, อินเทอร์เน็ตสรรพสิ่ง, สุขภาพทางไกล

Abstract

This article discusses the application of a heart rate sensor in a remote health monitoring system using the LoRa network. The system is designed to monitor the health data of patients or individuals in remote areas or locations with limited internet access. Heart rate data from the sensor is transmitted via an ESP32 microcontroller to an SX1276 radio frequency transceiver module, which is a LoRa chip. The data is then sent to the Thinkspeak cloud via a LoRa gateway for real-time health data monitoring and visualization. The collected data is also stored in Google Sheets for long-term record.

From the experimental results of the remote health monitoring system in an environment with obstacles, using a Spreading Factor (SF) of SF12 and a transmission power of 20 dBm at distances of 200, 400, 600, 800, and 1000 meters, the system demonstrated its capability to transmit data over various distances. The received signal strength indicator (RSSI) varied with increasing distance. The initial results suggest that this configuration's selected transmission power and antenna setup are acceptable. Further improvements will be made to enhance the system's applicability.

Keywords: Heart rate, LoRa (Long Range), Internet of Things (IoT), Telehealth

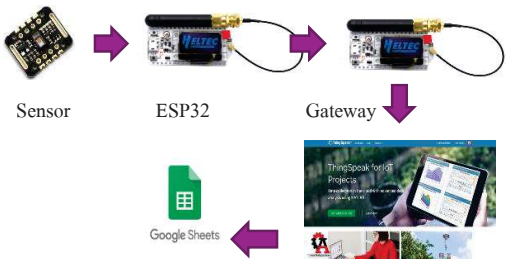
1. บทนำ

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสุขภาพ โดยเฉพาะในด้านการตรวจวัดและส่งข้อมูลสุขภาพจากระยะไกล [1] ปัจจุบันอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น ESP32 ได้รับความนิยมในงานวิจัยด้านสุขภาพเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมต่อไร้สายได้หลากหลาย ทั้ง Wi-Fi และ Bluetooth แต่ข้อจำกัดของเทคโนโลยีดังกล่าวคือระยะการส่งข้อมูลที่ค่อนข้างสั้น [2] เพื่อแก้ไขปัญหานี้ การประยุกต์ใช้โครงข่าย LoRa (Long Range) จึงเป็นอีกแนวทางที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลได้ในระยะทางไกลโดยใช้พลังงานต่ำ [3] LoRa เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ทำงานบนย่านความถี่วิทยุแบบไม่ต้องขออนุญาต (unlicensed frequency bands) และสามารถรับส่งข้อมูลได้แม้ในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางสูง [8] หลายงานวิจัยได้นำ LoRa ไปใช้ในระบบติดตามสุขภาพ เช่น การตรวจวัดอัตราการเต้นของหัวใจและออกซิเจนในเลือดสำหรับผู้ป่วยโรคเรื้อรัง [5,6,7] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ LoRa ร่วมกับ ESP32 เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลสุขภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่ขาดโครงสร้างพื้นฐานด้านโทรคมนาคม [8] แม้ว่าการส่งข้อมูลสุขภาพผ่านโครงข่าย LoRa จะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็ยังมีความท้าทายด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของข้อมูล [9] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและปรับปรุงระบบรับส่งข้อมูลสุขภาพผ่าน ESP32 และ LoRa เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเร็วในการส่งข้อมูล อัตราการสูญหายของข้อมูล และมาตรการความปลอดภัยที่สามารถนำมาใช้ในระบบดังกล่าว [10]

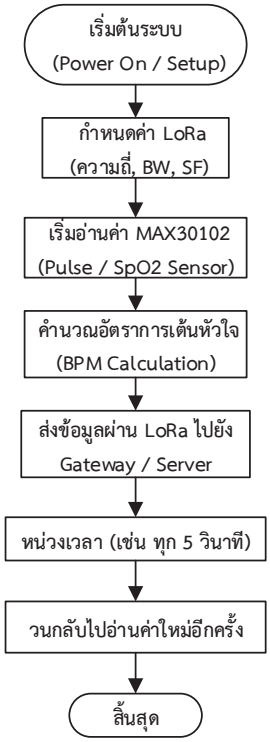
2. ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบชุดอุปกรณ์วัดอัตราการเต้นของหัวใจร่วมกับอุปกรณ์รับส่งข้อมูล ตามผังไดอะแกรมในรูปที่ 1



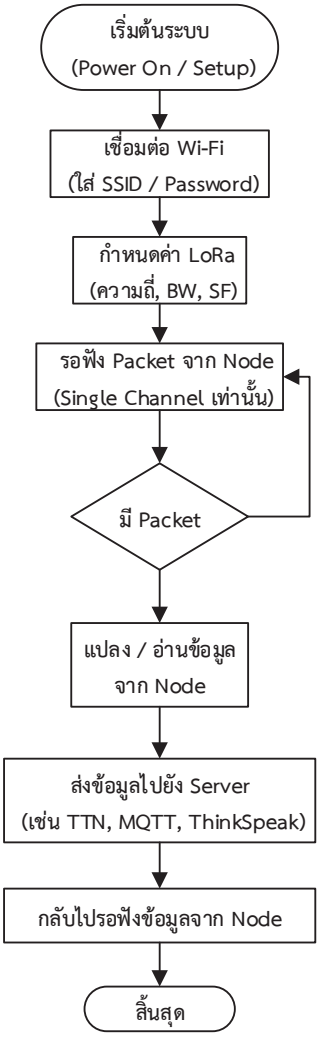
รูปที่ 1 ผังไดอะแกรมชุดอุปกรณ์วัดอัตราการเต้นของหัวใจ

ประกอบด้วย เซ็นเซอร์วัดอัตราการเต้นของหัวใจแบบออปติคัล MAX-30102 ประกอบด้วยหลอด LED ความเข้มสูงสีแดง และอินฟราเรด ซึ่งมีความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรและ 880 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ที่เหมาะและตรงกับความต้องการในการใช้งาน เช่น สามารถวัดค่าออกซิเจนเซนเซอร์ (SpO_2) อัตราการเต้นของหัวใจ (HR) อุณภูมิที่มีการเปลี่ยนตั้งแต่ -40°C ถึง +85°C ที่สำคัญอุปกรณ์ดังกล่าว จะใช้พลังงานในระหว่างการวัด ต่ำกว่า 600 µA นอกจากนี้ยังสามารถตั้งค่าให้ MAX 30102 อยู่ในโหมด สแตนด์บายซึ่งจะใช้พลังงานเพียง 0.7 µA สำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เลือกใช้บอร์ดสำเร็จของ Heltec Wi-Fi LoRa32 SX1276 เป็นบอร์ดสำหรับพัฒนาเริ่มต้นของระบบ IoT (Internet of Things) ที่ผสมผสานเทคโนโลยีสามารถเลือกใช้งานได้ทั้ง Wi-Fi และ LoRa (Long Range) อยู่บนบอร์ดเดียวกัน โดยใช้ชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 พร้อมโมดูล SX1276 ซึ่งเป็นบอร์ดลอร่าโมดูล ทำงานที่ย่านความถี่ 868 MHz ถึง 915 MHz ช่วยให้สามารถสื่อสารข้อมูลได้ไกลในขณะที่ใช้พลังงานต่ำเหมาะสำหรับโปรเจคที่ต้องการการเชื่อมต่อไร้สายทั้งในระยะใกล้และไกลในระบบ IoT ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จำนวน 2 บอร์ด โดยบอร์ดแรกจะทำการตั้งค่าการทำงานเป็นเครื่องมือวัดอัตราการเต้นของหัวใจตามโฟล์วชาร์ตการทำงานรูปที่ 2



รูปที่ 2 โฟล์วชาร์ตส่วนของเครื่องวัดอัตราการเต้นของหัวใจ

ส่วนอีกหนึ่งบอร์ดเราจะทำการตั้งค่าให้ทำหน้าที่เป็นเกตเวย์ 1 ช่อง (Single Channel Gateway) ของวงจร เพื่อเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต และสำหรับแดชบอร์ดที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลเลือกใช้ Thing Speak คือผู้ให้บริการคลาวด์ฟรีสามารถสมัครเพื่อขอรับรหัสผ่านและสร้างพื้นที่ในการเก็บบันทึกข้อมูลได้ สามารถเรียกใช้งานได้ผ่านเบราซ์เซอร์ ในที่นี้เราเรียกข้อมูลดิบมาใช้โดยบันทึกลงใน กูเกิ้ลชีต หลังจากนั้นจะทำการปรับแก้ไขโค้ดโปรแกรมผ่านโปรแกรม Aduino IDE และทำการกำหนดค่าติดตั้ง ลอร่าเกตเวย์ 1 ช่อง ตามที่เรากำหนดเงื่อนไขต่างๆไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โฟล์วชาร์ตส่วนของลอร่าเกตเวย์ 1 ช่อง

หลังจากนั้นทำการทดสอบเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบอินเทอร์เน็ต และทำการปรับปรุงแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น เช่นการเชื่อมต่อ ระหว่าง End user กับ Gateway หรือปัญหาจากการอ่านค่าอัตราการเต้นของหัวใจกับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วทำการประกอบและบรรจุลงกล่องตามรูปที่ 4 เพื่อนำไปทดสอบและเก็บบันทึกผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดอัตราการเต้นหัวใจ และเกตเวย์ลอร่า

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการรับส่งข้อมูลในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง

ระยะทาง (เมตร)	RSSI (dBm)	HR
200ครั้งที่1	-90	71
200ครั้งที่2	-92	68
200ครั้งที่3	-90	70
400ครั้งที่1	-112	71
400ครั้งที่2	-114	78
400ครั้งที่3	-111	72
600ครั้งที่1	-126	71
600ครั้งที่2	-124	73
600ครั้งที่3	-125	69
800ครั้งที่1	-135	59
800ครั้งที่2	-137	73
800ครั้งที่3	-137	70
1000ครั้งที่1	รับส่งไม่ได้	
1000ครั้งที่2		
1000ครั้งที่3		

3 การทดลองและเก็บบันทึกผล

ในการทดลอง จะทำการทดสอบในพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะสอดคล้องกับลักษณะของการใช้งานจริง เช่นจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่อยู่ภายในบ้านที่มีผนังเป็นคอนกรีต ไปยังเกตเวย์ที่ติดตั้งอยู่บนเสามีความสูง 3 เมตรจากพื้นดินที่อยู่ภายนอกอาคาร และเคลื่อนที่ตัวเกตเวย์ออกห่างจากอุปกรณ์ตรวจวัด ตามระยะทางต่างๆ โดยทำการปรับค่า SF ที่ 12 และค่า Tx Power ที่ 20 dBm มีระยะทางที่แตกต่างกัน (200 เมตร, 400 เมตร, 600 เมตร, 800 เมตร และ 1000 เมตร) และในแต่ละระยะทางจะทำการ

ทดลองจำนวน 3 ครั้ง เพื่อยืนยันถึงค่าความแรงของสัญญาณ ที่ตำแหน่งนั้นด้วย ตามตารางที่ 1

จากการทดลองพบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่า RSSI จะลดลงตามลำดับ โดยในการทดลองที่ระยะทาง 200 เมตร ค่า RSSI อยู่ในช่วง -90 dBm **ถึง** -92 dBm ซึ่งแสดงถึงสัญญาณที่ค่อนข้างแข็งแรง แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นถึง 400 เมตร, 600 เมตร และ 800 เมตร ค่า RSSI ลดลงเป็นลำดับ โดยอยู่ในช่วง -112 dBm **ถึง** -137 dBm ซึ่งสะท้อนถึงการสูญเสียสัญญาณที่เกิดขึ้นจากสิ่งกีดขวาง เช่น ผนัง อาคาร หรือสิ่งกีดขวางอื่น ๆ ที่ทำให้สัญญาณอ่อนลง และในระยะทาง 1000 เมตร ผลการทดลองพบว่าสัญญาณอ่อนจนไม่สามารถรับข้อมูลได้ ซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดในการรับส่งข้อมูลในระยะทางไกลในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง

ส่วนค่าอัตราการเต้นของหัวใจ การทดลองที่ระยะทาง 200 เมตร ค่า Heart Rate อยู่ที่ 68-71 bpm ซึ่งเป็นค่าปกติของการวัดอัตราการเต้นของหัวใจ แต่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ค่า Heart Rate ก็มีการเปลี่ยนแปลง โดยที่ระยะทาง 400 เมตร ค่า Heart Rate อยู่ในช่วง 71-78 bpm และที่ระยะทาง 600 เมตร ค่า Heart Rate อยู่ในช่วง 69-73 bpm ในขณะที่ในระยะทาง 800 เมตร ค่า Heart Rate อยู่ในช่วง 59-73 bpm ซึ่งพบว่ามีการลดลงในบางครั้ง เช่น ค่า 59 bpm ซึ่งยังถือว่าปกติ และที่ระยะทาง 1000 เมตร ซึ่งระดับค่าความแรงของสัญญาณ RSSI นั้นมีค่าต่ำมาก จึงไม่สามารถรับข้อมูลได้

4 สรุปและอภิปรายผล

จากการศึกษาระบบตรวจติดตามสุขภาพทางไกลผ่านโครงข่ายลอร่าพบว่าระบบตรวจติดตามสุขภาพทางไกลที่ใช้โครงข่ายลอร่าสามารถทำงานได้ดี โดยมีการสื่อสารข้อมูลจากเซ็นเซอร์ไปยังแอพพลิเคชั่นอย่างมีประสิทธิภาพด้วยเทคโนโลยีลอร่า ซึ่งช่วยให้สามารถใช้งานในระยะไกลและมีการใช้พลังงานต่ำ

จากการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดอัตราการเต้นของหัวใจ เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดสามารถทำงานและแสดงผลข้อมูลได้ในระดับนึง ในการศึกษาครั้งต่อไปควรที่จะศึกษาถึงแม่นยำและความเสถียรของข้อมูลในตลอดจนความเร็วระหว่างการรับส่งข้อมูล รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจวัดอื่นๆเข้ามาร่วมด้วย

5 กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยชิ้นนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณการวิจัยจากเงินรายได้ ปีงบประมาณ 2567 ของคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

เอกสารอ้างอิง

[1] Choi, J., Lee, S., & Kim, H. (2020). Secure Data Transmission in LoRa- based IoT Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications, 19*(3), 1545-1556.

[2] Farooq, M., Raza, S., & Khan, N. (2022). A Review on Long Range Communication for IoT Applications. *Journal of Internet Technology, 23*(5), 1021-1034.

[3] Islam, S. M. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2021). The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey. *IEEE Access, 9*, 116572-116601.

[4] Kumar, P., Mallick, B., & Pattnaik, P. (2020). ESP32 Based Real-time Health Monitoring System. *International Journal of Engineering Research & Technology, 9*(8), 45-50.

[5] Mohapatra, S., Roy, S., & Dey, N. (2021). IoT- based Smart Healthcare System: Applications and Challenges. *Future Generation Computer Systems, 123*, 85-97.

[6] Raza, S., Misra, P., & He, Z. (2021). Security Aspects of LoRaWAN: A Survey. *Sensors, 21*(12), 4003.

[7] Singh, R., Verma, K., & Kumar, A. (2023). LoRa- enabled Healthcare Monitoring in Rural Areas. *International Conference on Smart Technologies*, 287-293.

[8] Zhang, X., Liu, Y., & Zhou, Q. (2019). Performance Evaluation of LoRa Technology for IoT- based Smart Health Applications. *Journal of Wireless Communications and Networking, 2019*(1), 1-12.

[9] ธนวัฒน์ พิทักษ์ศรี. (2564). การประยุกต์ใช้ ESP32 และ LoRaWAN สำหรับระบบเฝ้าระวังสุขภาพ. *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม, 8*(2), 75-89.

[10] นพดล มณีรัตน์. (2565). ระบบตรวจวัดสัญญาณชีพผู้สูงอายุด้วย LoRa และ ESP32. *วารสารวิศวกรรมสารสนเทศ, 12*(3), 120-135.

Power electronics

(PE)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์โหมดการทำงานย่อยและออกแบบในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ-ฟลายแบ็กอัตราขยายแรงดันด้านออกสูงในสภาวะทำงานกึ่งเรโซแนนซ์

Analysis Common Sub Operation and design in DC-DC High Step-Up Integrated Boost-Flyback Quasi Resonant Converter

ณัฐกมล ประดุมสุข* จิรัชยา จำปา วรพงษ์ วงศ์พาสุข จุฑาทิพย์ แหมา และ อนุศักดิ์ บิสลาม
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: s6503041510167@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ขอเสนอการวิเคราะห์โหมดการทำงานย่อยและออกแบบในวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ-ฟลายแบ็กอัตราขยายแรงดันด้านออกสูง โดยรับแรงดันด้านเข้าขนาด 24 โวลต์ แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงขนาด 360 โวลต์ ในการออกแบบสถาปัตยกรรมของวงจรให้มีการทำงานร่วมของวงจรฟลายแบ็กและวงจรทบระดับแรงดันตลอดคาบเวลาภายใต้เงื่อนการทำงานแบบกึ่งเรโซแนนซ์ กำหนดให้ช่วงเวลาเปลี่ยนถ่ายสถานะการทำงานของภาคกำลังที่ใช้สวิตช์เดี่ยว ทำงานแบบเปลี่ยนผ่านกระแส (Zero-Current Transition: ZCT) ที่ความสวิตช์คงที่ 96 กิโลเฮิรตซ์ จากผลการจำลองพบว่า ในขณะที่ภาคกำลังทำงานเต็มพิกัดโหลดกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและออกมีค่าเท่ากับ 135 วัตต์ และ 122 วัตต์ ตามลำดับ ในส่วนของแรงดันด้านออกมีการออกแบบแบบทวีแรงดันโดยใช้ตัวเก็บประจุอนุกรมเพื่อความถูกต้องของแบบจำลองได้แสดงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในส่วนที่สำคัญเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องตามทฤษฎี

คำสำคัญ: ทบระดับ ฟลายแบ็ก กึ่งเรโซแนนซ์ อัตราขยายแรงดันด้านออก

Abstract

This article analyzes the operational sub-modes and design of integrated boost-flyback DC high step-up conversion converter circuit, which transforms a 24-volt input DC power supply into a 360-volt high-voltage output side. The circuit state-of-the-art is designed to function in Integrated with the boost and flyback circuit during the quasi-resonance operating conditions. The power section's transition time, using a single switch, is established as the zero-current transition (ZCT) at a fixed switching frequency of 96 kHz. The results of the simulation show that under full load operation, the input and output powers are 135 watts and 122 watts, respectively. The output voltage is configured as a voltage multiplier with a series capacitor. The examination of significant relationships is offered to validate the accuracy of the model and indicate the theory's reliability.

Keywords: Boost, Flyback, Quasi-Resonant, High Step-Up

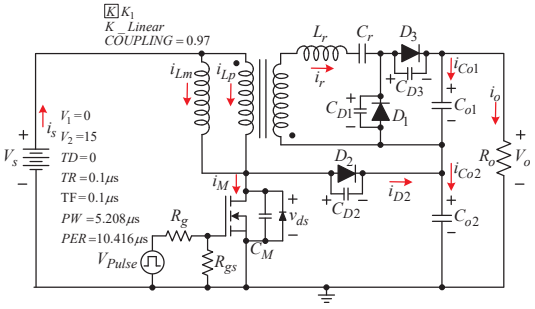
1. บทนำ

ปัจจุบันวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์พลังงาน เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์จะต้องสามารถยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อเป็นแหล่งจ่ายด้านเข้าให้กับอินเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง 320-400 โวลต์[1-2] ต่อไป เพราะฉะนั้นการพิจารณาและกำหนดแรงดันด้านเข้านั้นเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบของระบบนี้ โดยทั่วไปจะใช้วิธีการสตริงหรืออนุกรมแผงเพื่อให้แรงดันด้านออกสูงขึ้น ในขณะเดียวกันวิธีการนี้จะก่อให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน (Partial Discharge : PD) ที่ระดับแรงดันมากกว่า 100 โวลต์ [3]

อย่างไรก็ตามแม้จะเพิ่มความสามารถขยายแรงดันได้ แต่ยังคงมีขีดจำกัดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสวิตช์ไวงานจากการเปลี่ยนสถานะการนำและหยุดนำกระส รวมถึงผลกระทบขององค์ประกอบแฝงของอุปกรณ์ที่เกิดจากการเพิ่มความหนาแน่นที่สูงขึ้น [4-5] ความร้อนส่วนนี้จะแปรผกผันกับค่าประสิทธิภาพของวงจร นอกจากนั้นการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์ไวงานอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI) ที่เพิ่มสูงขึ้น [6] ดังนั้นเพื่อบรรเทาปัญหาดังกล่าวจึงมีการเสนอเทคนิคโหมดการทำงานภายใต้สภาวะกึ่งเรโซแนนซ์ (Quasi-Resonant Converter : QRCs) บนพื้นฐานการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์ในช่วงที่กระแสเป็นศูนย์ (Zero Current Transition : ZCT) [7-8]

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ขอเสนอแบบจำลองวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ-ฟลายแบ็กที่สภาวะการทำงานกึ่งเรโซแนนซ์อัตราขยายแรงดันด้านออกสูง ที่มีการทำงานอินทิเกรตโหมดการทำงานร่วมของของวงจรบูสต์กับวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ ภายใต้สภาวะ

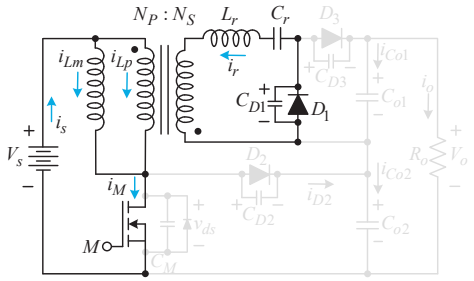
การทำงานกึ่งเรโซแนนซ์ ซึ่งมีการควบคุมแรงดันด้านเข้า 24 โวลต์ เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้านออก 360 โวลต์ กำลังไฟฟ้าด้านออก 122 วัตต์ ซึ่งมีจุดวัตถุประสงค์หลักนอกเหนือจากแบบจำลองและการคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญ นอกจากนั้นยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบที่สำคัญแบบรายอุปกรณ์



รูปที่ 1 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบทบระดับ-ฟลายแบ็กอัตราขยายแรงดันด้านออกสูงในสภาวะทำงานกึ่งเรโซแนนซ์

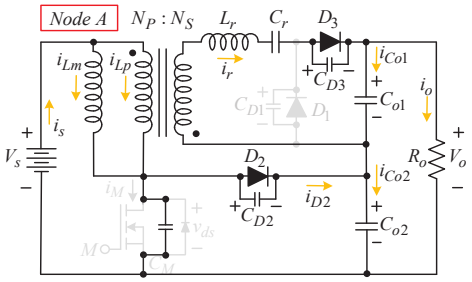
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์สภาวะการทำงาน

2.1 การวิเคราะห์การทำงานของวงจร



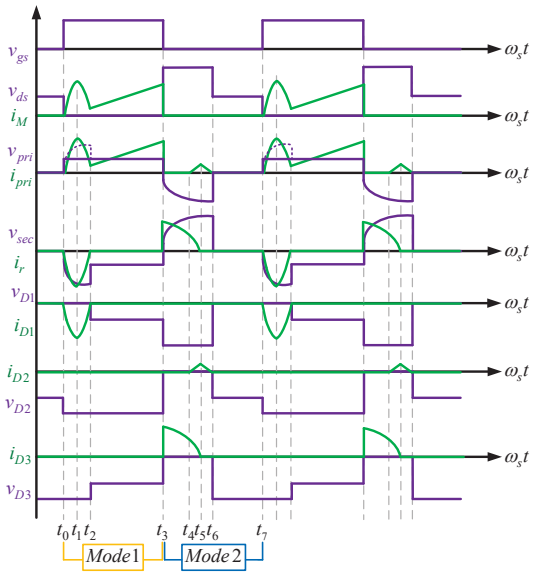
รูปที่ 2 สภาวะการทำงานของวงจรในโหมดการทำงานที่ 1

โหมดการทำงานที่ 1 : ในสภาวะเริ่มต้นตัวสวิตช์ใช้งาน M เริ่มทำงานช่วงเวลาที่ 1 $[t_0<t<t_1]$ สวิตช์ไวงานเริ่มนำกระแสในลักษณะการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZCT) เป็นช่วงเวลาที่ขดลวดเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิสะสมพลังงาน ในช่วงเวลานี้ตัวเหนี่ยวนำของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์จะเริ่มสะสมพลังงาน และเริ่มถ่ายเทพลังงานไปยังตัวเก็บประจุทำให้กระแสเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นส่วนโค้ง โดยช่วงเวลาในการเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับค่า L_r- C_r ของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์ ช่วงเวลาที่ 2 $[t_1<t<t_2]$ หลังจากพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำถูกถ่ายเข้าตัวเก็บประจุของชุดอนุกรมเรโซแนนซ์จนหมด ตัวเก็บประจุจะเริ่มคายประจุ ส่งผลให้รูปคลื่นของกระแส i_M ในช่วงเวลานี้มีลักษณะเป็นส่วนโค้งที่ค่อยๆลดลง ภายใต้การทำงานในสภาวะแบบกึ่งเรโซแนนซ์ (Quasi-Resonant) ในช่วงเวลาเดียวกันไดโอดสับเปลี่ยน D_1 ของวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่กรองสัญญาณทางด้านบวกของวงจรอนุกรมเรโซแนนซ์ L_r- C_r และสะท้อนกลับไปทางด้านปฐมภูมิ ซึ่งสภาวะการทำงานนี้เป็นการทำงานแบบซอฟต์สวิตช์ในช่วงเวลาหนึ่ง ช่วงเวลาที่ 3 $[t_2<t<t_3]$ ตัวเหนี่ยวนำของขดลวดด้านปฐมภูมิเกิดการสะสมพลังงานจนมีค่าสูงสุด โดยมีแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ขดลวดเหนี่ยวนำปฐมภูมิเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของวงจร



รูปที่ 3 สภาวะการทำงานของวงจรในโหมดการทำงานที่ 2

โหมดการทำงานที่ 2 : เป็นช่วงเวลาการแลกเปลี่ยนสภาวะการทำงาน ขณะที่สวิตช์ใช้งาน M หยุดการทำงาน ช่วงเวลาที่ 4 $[t_3<t<t_4]$ เมื่อสวิตช์ไวงานหยุดนำกระแสจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานจากขวดลวดเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิไปยังขดลวดเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ แต่เนื่องจากหม้อแปลงความถี่สูงมีการพันขดลวดเหนี่ยวนำในลักษณะกลับขั้วกันทางไฟฟ้า ส่งผลให้ไดโอด D_3 ของวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์เกิดการนำกระแส ช่วงเวลาที่ 5 $[t_4<t<t_5]$ ขณะที่ไดโอด D_3 นำกระแสอยู่แล้วนั้นเกิดการสิ้นสุดของการถ่ายโอนพลังงานของหม้อแปลงความถี่สูงให้กับวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ ส่งผลให้ไดโอดหยุดนำกระแสลงอย่างช้าๆ ในขณะเดียวกันตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงความถี่สูงทำหน้าที่กรองกระแสด้านเข้าให้กับวงจรทบระดับ ทำให้ไดโอด D_2 ของวงจรทบระดับเริ่มนำกระแส



รูปที่ 4 รูปช่วงสัญญาณในช่วงสภาวะการทำงานของวงจร

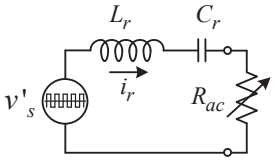
ช่วงเวลาที่ 6 [$t_5<t<t_6$] เมื่อกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_1 ของวงจรฟลาย-แบ็กคอนเวอร์เตอร์ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ จะเป็นช่วงเวลาเดียวกับกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 ของวงจรทบระดับมีค่าสูงสุด จากนั้นกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 ของวงจรทบระดับจะลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ในช่วงเวลาเดียวกันแรงดันของตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิได้ถ่ายโอนไปยังขดลวดเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิลดลงจนเป็นศูนย์ด้วยเช่นกัน ช่วงเวลาที่ 7 [$t_6<t<t_7$] เมื่อกระแสที่ไหลผ่านไดโอด D_2 ของวงจรทบระดับ และแรงดันของตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิได้ถ่ายโอนไปยังขดลวดเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์แล้ว แรงดันที่ไดโอด D_2 และ D_3 จะถูกสะสมพลังงานที่ตัวเก็บประจุ C_{o2} และ C_{o1} ตามลำดับ เนื่องจากตัวเก็บประจุทั้งสองตัวต่ออนุกรมกันในลักษณะทวีแรงดันในส่วนนี้ทำให้แรงดันทั้งสองส่วนสามารถรวมกันมีค่าเท่ากับแรงดันด้านออก V_o

2.2 วงจรเทียบเคียงเรโซแนนซ์

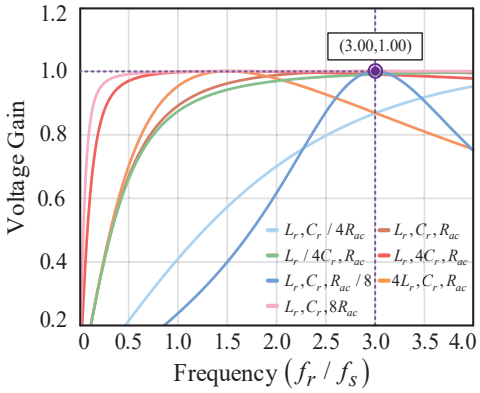
ในส่วนของโครงสร้างวงจรเรโซแนนซ์ที่ได้นำเสนอ ดังรูปที่ 5 ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์จากการใช้ประโยชน์ของตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง เพื่อเป็นตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ L_r ในกรณีจุดทำงานสภาวะเรโซแนนซ์ (f_r/f_{sw}) อิมพิแดนซ์ Z_o ของวงจรจะมีค่าต่ำสุดเป็นผลทำให้อัตราการขยายกระแสมีค่าสูงสุด จะได้สมการความสัมพันธ์

$$Z_o(s) = R_{ac} \tag{1}$$

$$R_{ac} = 2R_o / 2\pi^2 \tag{2}$$



รูปที่ 5 วงจรเทียบเคียงเรโซแนนซ์ที่นำเสนอ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายแรงดันต่ออัตราความถี่

2.3 หลักการออกแบบวงจร

กำหนดให้อัตราส่วนของหม้อแปลง 1:7.5 มีจำนวนรอบปฐมภูมิ 6 รอบ และจำนวนรอบทุติยภูมิ 45 รอบ มีค่าตัวเหนี่ยวรั่วไหลทางด้านทุติยภูมิ 21.596 ไมโครเฮนรี ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์อนุกรม C_r ขนาด 14.1 นาโนฟารัด ในวงจรที่นำเสนอนี้จะออกแบบที่ความถี่เรโซแนนซ์ f_r เท่ากับ 288.419 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันด้านเข้า V_s ขนาด 24 โวลต์ แรงดันด้านออก V_o ขนาด 360 โวลต์ และมีกำลังไฟฟ้าด้านออก 122 วัตต์ โดยวงจรภาคกำลังต่อตัวเก็บประจุทางด้านออกในลักษณะอนุกรม เมื่อพิจารณาวงจรภาคกำลังที่มีหม้อแปลงความถี่สูง มีจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิน้อยกว่าจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ ทำให้แรงดันตกคร่อมทางด้านทุติยภูมิสูงขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ $K_1 = L_{m,pri}/L_{pri}$, $K_2 = L_{m,sec}/L_{sec}$ จะได้สมการอัตราส่วนดำเนินการ

$$a = \sqrt{K_1 / K_2} \times \sqrt{L_{pri} / L_{sec}} \tag{3}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของหม้อแปลงพิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านออกต่อแบบอนุกรมจะได้สมการความสัมพันธ์

$$aV_{Co1} = V_{Co2} \tag{4}$$

$$V_{Co1} = \frac{V_o}{a+1}\ ,\ V_{Co2} = \frac{aV_o}{a+1} \tag{5}$$

สมการอัตราส่วนจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ $n = N_p/N_s$ เมื่อช่วงสวิตช์ไวงานนำกระแส มีค่าเท่ากับ DT สมการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ โดยกำหนดให้ละเลยตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลทางด้านปฐมภูมิของตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็ก $V_r = V_o/2$

$$\Delta i_{Lon} = (V_s + nV_r)\frac{DT}{L_m} \tag{6}$$

เมื่อช่วงสวิตช์ไวงานไม่นำกระแส มีค่าเท่ากับ $(1\text{-}D)T$ สมการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิ

$$\Delta i_{Loff} = \left[\left(V_s - \frac{aV_o}{a+1}\right) - n\left(\frac{V_o}{a+1}\right)\right]\frac{(1-D)T}{L_m} \tag{7}$$

ดังนั้น สมการอัตราการขยายแรงดันด้านออกต่อแรงดันด้านเข้า

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{\left(\frac{(1-D)(a-n)}{a+1} - \frac{n}{2}\right)} \tag{8}$$

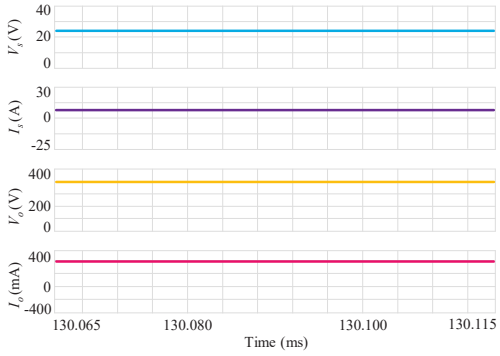
พิจารณากระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ไวงานสูงสุด

$$i_{M,max} = i_{L,max} = i_{r,peak}\sqrt{\frac{L_{sec}}{L_{pri}}} + \frac{V_s\left(\frac{\Delta T_r}{2}\right)}{L_{pri}} \tag{9}$$

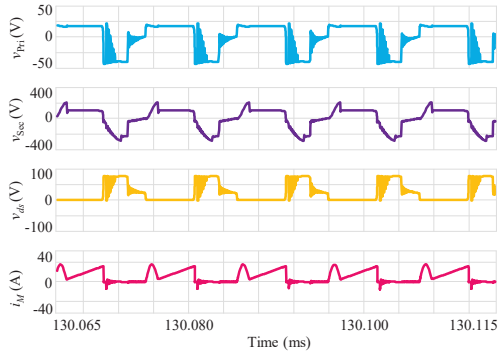
3. ผลการจำลอง

จากรูปที่ 7 เป็นผลการวัดแรงดันด้านเข้ามีค่าเท่ากับ 24 โวลต์ ซึ่งจากสมการที่ (8) สามารถหาอัตราการขยายได้เท่ากับ 15 เท่า ที่แรงดันด้าน

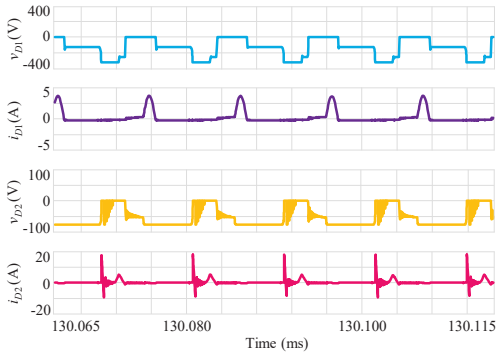
ออก 360 โวลต์ และในรูปที่ 8 เป็นการวัดแรงดันตกคร่อม v_{ds} และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ไวงาน i_M แสดงถึงการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์ขณะที่กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ (ZCT) เนื่องจากมีการถ่ายโอนพลังงานระหว่างขดลวดเหนี่ยวนำรั่วไหล L_r กับตัวเก็บประจุอนุกรมเรโซแนนซ์ C_r และการเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์ในแบบดังกล่าวทำให้เกิดกระแสเรโซแนนซ์ไหลผ่านไดโอด D_1 ของวงจรฟลายแบ็กคอนเวอร์เตอร์ ส่งผลให้กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์มีลักษณะเชิงอนุพันธ์ซึ่งเป็นการทำงานในสภาวะกึ่งเรโซแนนซ์ (QRCs)



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ด้านเข้าและด้านออก



รูปที่ 8 สัญญาณแรงดันด้านปฐมภูมิ ทุติยภูมิ แรงดัน และกระแสไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์



รูปที่ 9 สัญญาณแรงดันตกคร่อม กระแสไฟฟ้าของไดโอด D_1 และ D_2

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลจำลองการทำงานของวงจรทบระดับ-ฟลายแบ็กที่สภาวะการทำงานกึ่งเรโซแนนซ์ อัตราขยายแรงดันด้านออกสูงได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ มีลักษณะสลับการทำงานของสวิตช์ไวงานแบบกึ่งเรโซแนนซ์ (Quasi Resonant : QRCs) บนพื้นฐานการเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ (Zero Current Transition : ZCT) ที่มีความถี่ 96 กิโลเฮิรตซ์ สลับการทำงานครั้งละครึ่งคาบเวลาเพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงผ่านหม้อแปลงความถี่สูงที่ต่อร่วมกับชุดอนุกรมเรโซแนนซ์ และตัวเก็บประจุที่ต่อกันในลักษณะทวีแรงดันทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุด้านออกทั้งสองตัวรวมกันและจ่ายให้ภาระโหลด

ภาคผนวก : อัตราส่วนดำเนินการ $a = 0.171$, จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิต่อจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ $n = 0.133$, ตัวเหนี่ยวนำด้านปฐมภูมิ $L_{pri} = 7.019$ ไมโครเฮนรี, ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กด้านปฐมภูมิ $L_{m,pri} = 6.313$ ไมโครเฮนรี, ตัวเหนี่ยวนำด้านทุติยภูมิ $L_{sec} = 241.310$ ไมโครเฮนรี, ตัวเหนี่ยวนำทำแม่เหล็กด้านทุติยภูมิ $L_{m,sec} = 219.705$ ไมโครเฮนรี, ตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลด้านทุติยภูมิ $L_r = 21.569$ ไมโครเฮนรี, ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ $C_r = 14.1$ นาโนฟารัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Q. Li and P. Wolfs, "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1320-1333, May 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.920883.

[2] W. Li and X. He, "Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters in Photovoltaic Grid-Connected Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1239-1250, April 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2049715.

[3] Z. Guo and A. Q. Huang, "Characterizations of Partial Discharge in Modern Power Electronics," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 5705-5714, Dec. 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3417803.

[4] M. Israyelu and S. Sashidhar, "State-Space Modeling and Validation of Circuit Parasitics' Effect on the Performance of a High-Gain Nonisolated Switched Inductor Topology," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1654-1665, Oct. 2024, doi: 10.1109/JESTIE.2024.3390171.

[5] A. Chandwani and A. Mallik, "Parasitic Component Small-Signal Modeling and Control of a Practical CLLC Resonant Converter," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 1477-1495, April 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3211158.

[6] A. Bhalla, "Electromagnetic Interference Mitigation in Wide-Bandgap Power Conversion: Managing Fast Switching Transitions," in *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 32-35, June 2019, doi: 10.1109/MPEL.2019.2909840.

[7] F. Zhang, Y. Xie, Y. Hu, G. Chen and X. Wang, "A Hybrid Boost–Flyback/Flyback Microinverter for Photovoltaic Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 1, pp. 308-318, Jan. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2897543.

[8] T. R. Choudhury, B. Nayak and S. B. Santra, "A Novel Switch Current Stress Reduction Technique for Single Switch Boost-Flyback Integrated High Step Up DC–DC Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 6876-6886, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880665.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การปรับปรุงสมดุลของตัวเก็บประจุด้านออก แบบวงจรทวีแรงดันบนพื้นฐานคอนเวอเตอร์พุช-พูลเรโซแนนซ์ แหล่งจ่ายกระแสที่มีอัตราการขยายด้านออกสูง

Balancing of Output Capacitors in a Voltage Doubler Rectifier Based on a High Conversion Ratio Output Current Fed Push-Pull Converter

สุขคานา ลิ้ม* ภีรวัชร ภูมิสุวรรณ หัฏฐะ สาวะจันทร์ โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง สุริโยทัย สุปัญญาพงศ์ และ อนุศักดิ์ บิสลาม
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าประยุกต์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนน ประชาราษฎร์1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
E-mail: s6603046811091@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงสมดุลของตัวเก็บประจุด้านออก แบบวงจรทวีแรงดันบนพื้นฐานคอนเวอเตอร์พุช-พูลเรโซแนนซ์ แหล่งจ่ายกระแสที่มีอัตราการขยายด้านออกสูง การจำลองวงจรดำเนินการผ่านโปรแกรม PSPICE โดยกำหนดแรงดันอินพุตที่ 12 โวลต์ และแรงดันเอาต์พุตที่ 350 โวลต์ ความถี่สวิตช์ 343 กิโลเฮิรตซ์ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุมีความสมดุล ซึ่งช่วยให้วงจรมีเสถียรภาพและลดความเค้นบนตัวอุปกรณ์ โครงสร้างของวงจรและพฤติกรรมขององค์ประกอบสำคัญถูกวิเคราะห์ผ่านชุดวงจรทวีแรงดัน โดยนำเสนอการเพิ่มอินดักเตอร์ที่เอาต์พุตจะช่วยปรับปรุงการทำงานของวงจรทวีแรงดัน อินดักเตอร์ทำหน้าที่เก็บพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าและปล่อยพลังงานนั้นอย่างต่อเนื่อง ช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันและกระแส ทำให้แรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ C_{O1} และ C_{O2} มีความสมดุลมากขึ้น จากที่ได้ทำการจำลองวงจร จะเห็นได้ว่าความสมดุลของตัวเก็บประจุ ความสมดุล V_{C1} = 176 โวลต์ และ V_{C2} = 174 โวลต์ จากการประเมินจะช่วยให้ตัวเก็บประจุมีทั้งสองมาอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ลดโอกาสเสียหายจากแรงดันเกิน ลดความร้อนสะสมของตัวเก็บประจุ และทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น การวิจัยนี้มีศักยภาพในการนำไปสร้างวงจรต้นแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจ่ายไฟให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ละเอียดอ่อน วงจรดิจิตอลความเร็วสูง ซึ่งต้องการวงจรที่สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ความไวต่อสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: วงจรพุช-พูลเรโซแนนซ์คอนเวอเตอร์, แหล่งจ่ายกระแส, วงจรทวีแรงดัน, สมดุลของตัวเก็บประจุด้านออก

Abstract

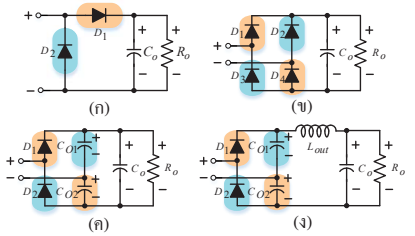
This paper presents the balancing of output capacitors in a voltage doubler rectifier based on a high conversion ratio, output current-fed push-pull converter. The circuit simulation is performed using the PSPICE program, with the input voltage set to 12 V_{DC}, the output voltage at 350 V_{DC}, and a switching frequency of 343 kHz. The voltage drop across the capacitors is balanced, which helps stabilize the circuit and reduce stress on the device. The circuit structure and the behavior of key components are analyzed through the voltage doubler circuit, and it is proposed that adding an inductor at the output will improve the circuit's performance. The inductor stores electromagnetic energy and releases it continuously, which reduces voltage and current ripple, resulting in a better balance of the voltage drops across capacitors C_{O1} and C_{O2}. From the circuit simulation, it can be observed that the voltage balance of the capacitors (V_{C1} = 176 V and V_{C2} = 174 V) can help extend the lifespan of both capacitors, reduce the risk of overvoltage damage, minimize heat accumulation, and improve circuit efficiency. This research has the potential to contribute to the development of a prototype circuit for power supply systems in delicate electronic applications, high speed digital circuits require power supply circuits that can effectively increase voltage while maintaining sensitivity to electromagnetic interference (EMI).

Keywords: Push-Pull Resonant Convertor, current source convertor, voltage doubler rectifier, balancing of output capacitors

1. บทนำ

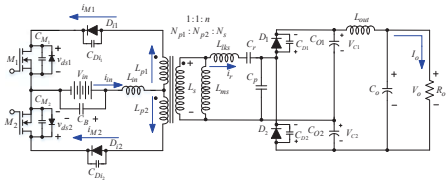
วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ประกอบด้วยสวิตช์ไวงานทรานซิสเตอร์หรือ มอสเฟสสองตัวที่ถูกขับเคลื่อนโดยอ้างอิงกับกราวด์ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบหลักของวงจรนี้ อย่างไรก็ตาม แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าสูง โดยเท่ากับ $2V_{in}$ ซึ่งเป็นสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ และวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์แบบเดิมใช้หม้อแปลงที่มีขนาดเล็กและมีการแตะจุดกึ่งกลางสองฝั่ง (Double-Center-Tapped

Transformer) โดยแกนหม้อแปลงถูกกระตุ้นในทั้งสองทิศทาง อย่างไรก็ตาม วงจรนี้มีปัญหาเกี่ยวกับความไม่สมดุลของฟลักซ์ในแกนหม้อแปลง (Flux Imbalance) เนื่องจากมีกระแสตรงไหลผ่านขดลวดปฐมภูมิ ซึ่งอาจทำให้แกนหม้อแปลงเกิดภาวะอิ่มตัว (Core Saturation) วงจรแปลงผันนี้เหมาะสำหรับการใช้งานในระดับกำลังไฟปานกลาง และจัดอยู่ในกลุ่มของวงจรแปลงผันที่มีต้นกำเนิดมาจากวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ วงจรพุช-พูลทั่วไปได้รับการออกแบบโดยใช้ประเภทแทปกลาง กริ่งบริดจ์ ฟูลบริดจ์ และแบบทวีแรงดัน โดยในประเภทแทปกลางจะมีความเครียดแรงดันไฟฟ้าข้ามไดโอดจะสูงกว่าความเครียดแรงดันไฟฟ้าข้ามไดโอดในประเภทฟูลบริดจ์ ดังนั้น ประเภทแทปกลางจึงไม่เหมาะกับโทโพโลยีที่ต้องการแรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงสูง และประเภทดังกล่าวมีการเกิดการสูญเสียพลังงานสูงจาก การทำงานพัลส์วิดมอดูเลชั่น (PWM) อีกด้วย [1] วงจรเรียงกระแสกริ่งคลื่นมีโครงสร้างพื้นฐานที่สุด แต่มีประสิทธิภาพต่ำ (ใช้เพียงครึ่งหนึ่งของรูปคลื่น) แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อมสูงซึ่งต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อปรับให้เรียบ และจำกัดเฉพาะการใช้งานพลังงานต่ำๆแสดงดังจากรูปที่ 1 (ก) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น นั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าโดยใช้ทั้งคลื่นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ช่วยลดการกระเพื่อมของแรงดันได้ดี แต่มีความซับซ้อนของวงจร และการใช้ไดโอดหรือหม้อแปลงเพิ่มเติม [2]-[4] แสดงดังรูปที่ 1 (ข) วงจรแบบทวีแรงดัน จะเพิ่มแรงดันได้โดยไม่ต้องใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่ สามารถเพิ่มแรงดันเอาต์พุตเป็นสองเท่าด้วยส่วนประกอบที่น้อยที่สุด ไม่ต้องใช้หม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบสูงแต่จะมีข้อบกพร่องที่แรงดันตกคร่อมที่ V_{C1} กับ V_{C2} ไม่สมดุลกัน [5] แสดงดังรูปที่ 1 (ค)



รูปที่ 1 โครงสร้างของวงจรเรียงกระแส (ก) วงจรเรียงกระแสแบบกึ่งคลื่น (ข) วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น (ค) วงจรเรียงกระแบบทวีแรงดัน (ง) วงจรเรียงกระแบบทวีแรงดันที่นำเสนอ

ดังนั้นบทความนี้ขอเสนอการปรับปรุงสมดุลของตัวเก็บประจุด้านออก แบบวงจรทวีแรงดันบนพื้นฐานคอนเวอเตอร์พุช-พูลเรโซแนนซ์แหล่งจ่ายกระแสที่มีอัตราการขยายด้านออกสูง โดยออกแบบแรงดันอินพุตที่ 12 โวลต์กระแสตรง แรงดันด้านเอาต์พุตที่ 350 โวลต์กระแสตรงโดยผ่านวงจรเรียงกระแสแบบทวีแรงดัน ความถี่สวิตช์ที่ใช้ 343 กิโลเฮริตซ์ โดยการทำงานของวงจรดังกล่าวก็จะมีการทำงานแบบกระแสศูนย์ เพื่อลดการสูญเสียขณะสวิตชิ่ง จะช่วยให้ตัวเก็บประจุด้านออกทั้งสองตัวสมดุลกัน $V_{C1} = V_{C2}$ และทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ในบทความนี้จะถูกยืนยันด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE เพื่อยืนยันการทำงานของวงจร แสดงดังรูปที่ 2

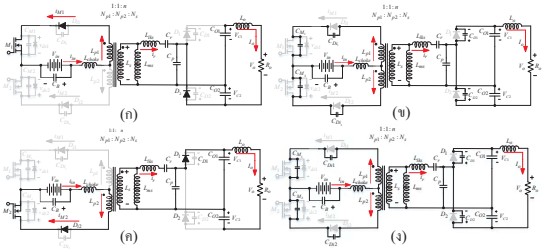


รูปที่ 2 โครงสร้างของวงจรที่นำเสนอ

2. ขั้นตอนการวิเคราะห์สภาวะการทำงาน

2.1 การวิเคราะห์สภาวะการทำงาน

โครงสร้างวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบแยกโดดที่มีอัตราการขยายแรงดันทางด้านออกสูงแสดงไว้ในรูปที่ 2 วงจรที่เสนอประกอบด้วยตัวเก็บประจุอินพุต C_B สวิตช์ไวงาน M_1 และ M_2 ที่มีไดโอดแบบแอนตี้พาราเรลเลล และตัวเก็บประจุ C_{M1} และ C_{M2} ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์หลัก และทำงานภายใต้รูปแบบพัลส์วิดมูเลชั่น ที่มี ค่าวัดจักรงานที่ประมาณ 52% วงจรนี้ยังมีตัวเหนี่ยวนำอินพุต L_{in} ไดโอดชอตกี D_{i1} และ D_{i2} หม้อแปลงความถี่สูง วงจรเรียงกระแสแบบทวีแรงดัน ชุดวงจรเรโซแนนซ์ LCC และตัวเหนี่ยวนำเอาต์พุต L_{out} วงจรที่เสนอใช้เทคนิคแบบซอฟต์สวิตช์ผ่านเรโซแนนซ์ LCC แบบอนุกรมแบบขนาน เทคนิคนี้จะลดการสูญเสียการสลับระหว่างสถานะเปิดและปิดของสวิตช์หลัก ไดโอดของวงจรทวีแรงดัน D_1 และ D_2 จะเปลี่ยนสถานะเป็นออฟสเตตภายใต้เงื่อนไขการสวิตช์กระแสเป็นศูนย์ (ZCS) นอกจากนี้ การสูญเสียของหม้อแปลงยังลดลงเนื่องจากตัวเหนี่ยวนำอินพุตและตัวเพิ่มแรงดันไฟจะลดอัตราส่วนรอบของหม้อแปลง



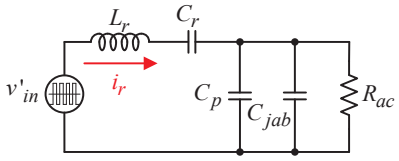
รูปที่ 3 สภาวะการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 โหมดการทำงานของวงจรที่นำเสนอ

Mode	M_1	M_2	D_{i1}	D_{i2}	D_1	D_2
1	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON
2	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
3	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF
4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

2.2 การวิเคราะห์และการออกแบบวงจรที่นำเสนอ

ในส่วนของโครงสร้างวงจรเรโซแนนซ์ที่นำเสนอในรูปที่ 4 จะประกอบไปด้วยตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ แต่ค่าของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้จะเป็นค่าตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลที่เกิดขึ้นเองในหม้อแปลงความถี่สูง และมีตัวเก็บประจุแฝงของไดโอดที่เกิดขึ้นจากภาควงจรเรียงกระแส ซึ่งเทคนิคที่ใช้จะเห็นได้ว่าไม่มีจำนวนของอุปกรณ์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่กลับเป็นการใช้ประโยชน์จากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในตัวของอุปกรณ์และในวงจรที่นำเสนอ



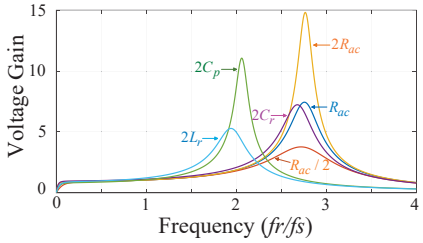
รูปที่ 4 วงจรเทียบเคียงเรโซแนนซ์ที่นำเสนอ

ดังนั้นฟังก์ชันการโอนย้ายของวงจรเทียบเคียงจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{v_{Rac}}{v'_{in}}(s)=\left(\frac{sC_rR_{ac}}{s^3L_rC_r\left(C_p+C_{jab}\right)R_{ac}+s^2L_rC_r+s\left(C_p+C_{jab}\right)R_{ac}+sC_rR_{ac}+1}\right) \quad (1)$$

จากนั้นหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ที่มีพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุแฝงของไดโอดจะสามารถวิเคราะห์และเขียนได้ดังนี้

$$Z_i(s)=\left(\frac{s^3L_rC_r\left(C_p+C_{jab}\right)R_{ac}+s^2L_rC_r+s\left(\left(C_p+C_{jab}\right)R_{ac}+C_rR_{ac}\right)+1}{s^2C_r\left(C_p+C_{jab}\right)R_{ac}+sC_r}\right) \quad (2)$$



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายแรงดันต่ออัตราความถี่ที่นำเสนอ

จากรูปที่ 5 เมื่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลมีการเปลี่ยนแปลง L_r เป็น 2 เท่า พบว่าจุดการทำงานของ วงจรมีการเปลี่ยนแปลงไปตามไปด้วย เมื่อตัวเหนี่ยวนำรั่วไหลมีค่าสูงขึ้นอัตราการขยายของแรงดัน มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์อนุกรม C_r เป็น 2 เท่า พบว่าจุดการทำงานของวงจรมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้น จุดการทำงานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกณฑ์การขยายของแรงดันมีอัตราการขยายที่สูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ขนาน C_p เป็น 2 เท่า พบว่าจุดการทำงาน ลดน้อยลงเมื่อตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกณฑ์การขยายของแรงดันมีค่าสูงขึ้นหลายเท่าแต่มี ช่วงการทำงานที่แคบ และเมื่อตัวเก็บประจุมีขนาดเล็กมาก ๆ พบว่าอัตราการขยายของวงจรลดลงอย่างมาก จนมีลักษณะของเกณฑ์การขยายที่คล้ายคลึงกับเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากการออกแบบวงจร โดยเพิ่มตัวเหนี่ยวนำด้านออก L_o จะเห็นได้ว่ากระแสด้านออกมีการกระเพื่อมน้อยลง และสิ่งสำคัญอีกอย่างคือช่วยให้แรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุทั้งสองมีแรงดันตกคร่อมสมดุล โดยตัวเหนี่ยวนำด้านออก L_o ทำหน้าส่งพลังงานไปยัง ตัวเก็บประจุตัวที่ C_{o2} เพื่อให้แรงดันสมดุล โดยการวิเคราะห์ และคำนวณหาค่า ตัวเหนี่ยวนำด้านออก L_o เพื่องลดการกระเพื่อมของกระแส ΔI_L และปรับความสมดุลของแรงดันตกคร่อมของตัวเก็บประจุทั้งสอง

$$L_o=0.298\frac{V_s}{\omega I_o}=\frac{0.298\times225}{2\pi\times343\times10^3\times0.538}=57.828\mu\text{H} \quad (1)$$

โดยในที่นี่กำหนดให้ ΔI_L มีค่าไม่เกิน 20% ของกระแสด้านออก

$$\Delta I_L=0.2\times I_o \quad (2)$$

ทำการคำนวณหา V_o โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$V_o=0.9V_s-\frac{2\omega L_sI_o}{\pi} \quad (3)$$

$$=0.9\times225-\frac{2\pi\times343\times10^3\times13.43\times10^{-6}\times0.538}{\pi}=196.228\,\text{V}$$

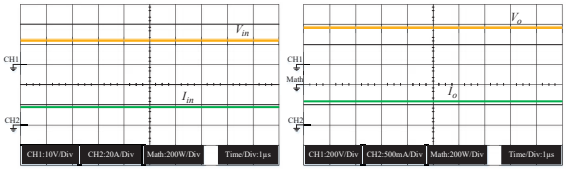
จากสมการที่ (3) เป็นสมการคำนวณ V_o ของวงจรวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น $V_o=V_{CO}$ แต่ในที่นี้ได้เอาสมการ (3) มาคำนวณหา V_o ของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบทวีแรงดัน ดังนั้นจึงทำให้แรงดัน V_o มีค่าเท่ากับ $V_{C1}+V_{C2}$ โดยแรงดัน $V_{C1}=V_{C2}$ แรงดันตกคร่อมของตัวเก็บประจุ C_{O1} และ C_{O2} ดังนั้นจะได้แรงดันด้านออกเท่ากับ $2V_o$

โดยวงจรดังกล่าวเป็นวงจรที่มีอัตราการขยายสูง แต่โดยอาศัยคุณสมบัติต่างๆของวงจร จึงทำให้อัตรารอบของหม้อแปลงต่ำ การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำด้านเข้า L_{in} กับการทำงานของสวิตช์ช่วงคาบเกี่ยว มีขอดีในการช่วยทำให้กระแสทางด้านเข้ามีการกระเพื่อมต่ำให้แรงดันไฟฟ้าบนขดปฐมภูมิของหม้อแปลงไม่ลดลงมากเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น และกระแสลงที่ในขดปฐมภูมิ ทำให้สามารถลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งทุติยภูมิได้ดี

3. ผลการจำลอง

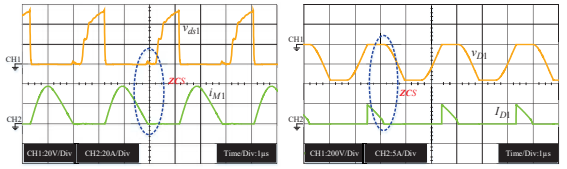
การจำลองวงจรแปลงผันแบบพุช-พูลทำได้โดยใช้ PSpice และนำเสนอผลการจำลองที่นี่ ข้อมูลรายละเอียดและอุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองวงจรนี้มีดังนี้ L_{in}= 4.7 µH, L_1=L_2 = 6.76 µH, L_s = 762µH, C_{O1}= C_{O2}=100 µF, C_r = 18.8 nF, C_p= 9 nF และ R_o= 650 Ω กระแสด้านเข้าแรงดันด้านเข้า, กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก แสดงอยู่ในรูปที่ 6

กระแส และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ M_1, กระแส และแรงดันตกคร่อมไดโอด D_1 แสดงอยู่ในรูปที่ 7 กระแส แรงดันตัวเก็บประจุโซแน C_r, กระแส และแรงดันตัวเก็บประจุโซแนนซ์ C_p แสดงอยู่ในรูปที่ 8 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{O1},C_{O2} กระแส และแรงดันตกคร่อมไดโอด D_{i1} แสดงอยู่ในรูปที่ 9



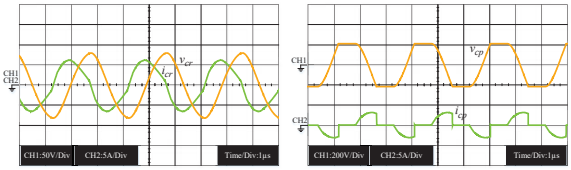
(ก) (ข)

รูปที่ 6 ผลการจำลองพารามิเตอร์ของวงจร (ก) กระแสด้านเข้า แรงดันด้านเข้า, (ข) กระแสด้านออก และแรงดันด้านออก



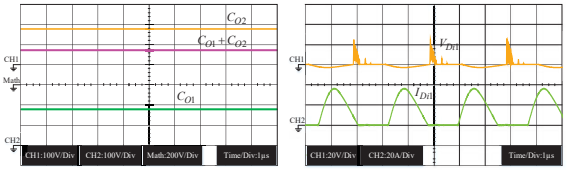
(ก) (ข)

รูปที่ 7 ผลการจำลองพารามิเตอร์ของวงจร (ก) กระแส และแรงดันตกคร่อมสวิตช์ M_1, (ข) กระแส และแรงดันตกคร่อมไดโอด D_1



(ก) (ข)

รูปที่ 8 ผลการจำลองพารามิเตอร์ของวงจร (ก) กระแส และแรงดันตัวเก็บประจุโซแนนซ์ C_r, (ข) กระแส และแรงดันตัวเก็บประจุโซแนนซ์ C_p



(ก) (ข)

รูปที่ 9 ผลการจำลองพารามิเตอร์ของวงจร (ก) แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ C_{O1} C_{O2} , (ข) กระแส และแรงดันตกคร่อมไดโอด D_{i1}

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบระหว่างวงจรที่อ้างอิง [4] กับวงจรที่นำเสนอ

พารามิเตอร์	วงจรที่อ้างอิง [4]	วงจรที่นำเสนอ
V_{in}	12 V_{DC}	12 V_{DC}
V_o	370 V_{DC}	350 V_{DC}
fs	220 kHz	343 kHz
V_{C1}	280 V_{DC}	176 V_{DC}
V_{C2}	90 V_{DC}	174 V_{DC}
Turn Ratio	1:34	1:10
Resonant Technique	Series (LC)	Series Parallel (LCC)

จากตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวงจรที่อ้างอิง [4] กับวงจรที่นำเสนอ จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดัน V_{C1} และ V_{C2} ของวงจรอ้างอิง [4] มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งแรงดันตกคร่อมที่ไม่สมดุลนี้ส่งผลให้ตัวเก็บประจุมีอายุการใช้งานสั้นลง และเกิดความร้อนสะสมภายในวงจร ซึ่งอาจทำให้วงจรเสียหายได้ นอกจากนี้ การที่หม้อแปลงมีอัตราส่วนรอบสูง ยังทำให้วงจรมีขนาดใหญ่ขึ้น และเกิดการสูญเสียภายในหม้อแปลงมากกว่าหม้อแปลงที่มีอัตราส่วนรอบต่ำ

4. สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองการทำงานของ วงจรพุช-พูลเรโซแนนซ์คอนเวอเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแสสำหรับแหล่งจ่ายพลังงานขนาดเล็กอยู่บนพื้นฐานวงจรเรียงกระแสแบบทวีแรงดัน โดยการจำลองใช้แรงดันด้านเข้า 12 โวลต์ แรงดันด้านออก 350 โวลต์ จากที่ได้ทำการจำลองวงจรจะเห็นได้ว่าความสมดุลของตัวเก็บประจุ ความสมดุล V_{C1} = 176 โวลต์ และ V_{C2} = 174 โวลต์ จากการประเมินจะช่วยให้ตัวเก็บประจุมีทั้งสองมาอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ลดโอกาสเสียหายจากแรงดันเกิน ลดความร้อนสะสมของตัวเก็บประจุ และทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการพระราชทานความช่วยเหลือแก่ราชอาณาจักรกัมพูชา ตามพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ประจำปี 2566

เอกสารอ้างอิง

[1] Mohan Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2001). Fundamentals of Power Electronics. Springer.

[2] Butterworth-Heinemann. Abdul Hamid, Hartini. (2024). RECTIFIER (POWER ELECTRONIC).

[3] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley.

[4] Bilsalam, A.; Ekkaravarodome, C.; Chunkag, V.; Thounthong, P. Analyzing the Effect of Parasitic Capacitance in a Full-Bridge Class-D Current Source Rectifier on a High Step-Up Push–Pull Multiresonant Converter. Sustainability 2021, 13, 5477. https://doi.org/10.3390/su13105477.

[5] C. Ekkaravarodome, A. Bilsalam, W. Pattarapongsathit and P. Thounthong, "DC-DC High Conversion Ratio Push-Pull Resonant Converter Based on Voltage Double Rectifier," *2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C)*, Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/RI2C48728.2019.8999959.

Reliability analysis of DC –Link Capacitors Adjustable-Speed Drive Systems

Prasit Mongkhonkaset[1] Santi Narakulnan[2] and Gontapon promnigon[1]

Department of Science and Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Roi Et Rajabhat University
E-mail: flas.reru.ac.th

Abstract

This study proposes an online method to estimate ESR and capacitance of DC-link aluminum electrolytic capacitors using inverter data. Harmonic currents are injected into the motor to generate ripple voltage, which is processed via RLS to determine ESR. Temperature effects are compensated using stator resistance. Experiments with a 250-W motor show only 2.88% estimation error. The method is accurate, hardware-free, and supports early capacitor fault detection.

Keywords— Capacitor (DC-link), inverter, ESR (Equivalent Series Resistance)

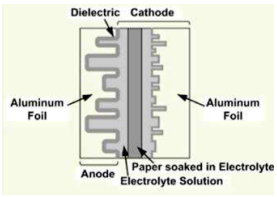
I. Introduction

DC-link capacitors are crucial but failure-prone components in power converters, mainly due to ESR increase and capacitance loss over time. Traditional offline assessments are impractical for real-time monitoring. This paper introduces an online method using MATLAB Simulink to monitor capacitor health by analyzing inverter operation data, enabling accurate ESR estimation without hardware intervention. The proposed approach enhances system reliability by detecting capacitor degradation early.

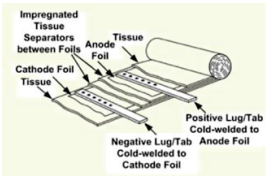
II. Structural Composition and Failure Mechanism

Aluminum electrolytic capacitors consist of two aluminum foils separated by electrolyte-impregnated paper, typically using ethylene glycol. An electrochemically formed oxide layer (Al_2O_3) on the anode serves as the dielectric. The foils are etched to increase surface area and wound into a cylindrical shape to maximize the capacitance-to-volume ratio. Electrically, the capacitor is modeled as a series combination of capacitance, equivalent series resistance (ESR), and inductance.

Capacitor degradation primarily results from thermal, electrical, mechanical, and environmental stresses. The dominant wear-out mechanism is electrolyte evaporation through the end seal, accelerated by ripple currents, ambient heat, and overvoltage. This evaporation reduces the effective contact area, lowering the capacitance (C) and increasing ESR, which in turn raises internal temperatures and accelerates deterioration.



(a)



(b)



(c)

Figure 1. Aluminum electrolytic capacitors. (a) Diagram of dielectric configuration. (b) Construction. (c) Electrical equivalent circuit [3].

have been unsuccessful *[1]–[3]*. Additional failure modes encompass the following: 1*)* The rupture or explosion of a capacitor resulting from excessive internal pressure when normal operating parameters are surpassed; 2*)* open or short circuit failures caused by recurrent mechanical stress on the leads or capacitor; or 3*)* corrosion of leads due to cleaners, adhesives, coating substances, or other foreign materials, primarily affecting PCB- mounted capacitors. *[2]*.

III. The operation and relationship of power switching devices in the inverter and the voltage in the capacitor (DC link).

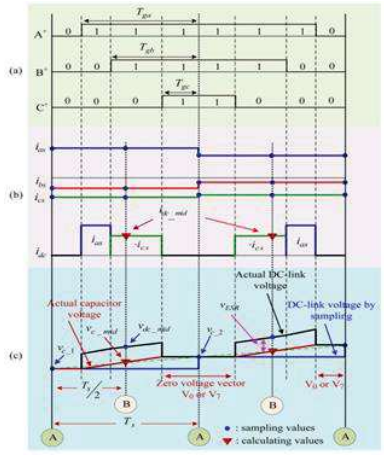


Figure 2: Measurement locations for voltage $\boldsymbol{Vc_{\_mid}}$, $\boldsymbol{Vdc_{\_mid}}$ กระแส $\boldsymbol{i_{dc}}$ [3]

The correlation between voltage and current in the capacitor of an inverter is depicted in Figure 2*(*a*)*, which illustrates the switching sequence of each gate in the inverter, denoted as $\boldsymbol{S_a}$, $\boldsymbol{S_b}$ and $\boldsymbol{S_c}$ along with $\boldsymbol{T_{ga}}$, $\boldsymbol{T_{gb}}$ and $\boldsymbol{T_{gc}}$ and $\boldsymbol{T_s}$ represents the sampling interval of the

voltage associated with the DC power supply. Equation *(1)* delineates the method for calculating the current ***i*** in relation to the stator current and the inverter's switching sequence.

L E E (1)

When denotes the capacitor voltage current *(*connected to a DC circuit*)*, and Æ Æ represent the stator currents, as illustrated in Figure 2, the current traversing the capacitor between designated time intervals induces a voltage drop across it. The internal resistance of the capacitor becomes substantial when the upper or lower switches are concurrently in the open- close position, aligning with the zero- voltage vector. In this circumstance, the current from the rectifier circuit, L , as illustrated in Figure 2. Thus, the direct current, , can be represented by Equation *(2)*.

L E (2)

When denotes the capacitor's current

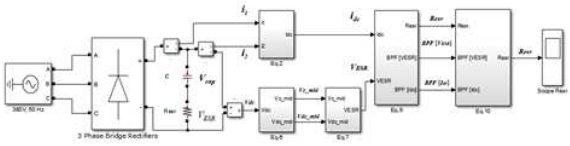


Figure 3: The procedure for measuring the voltage of a capacitor (DC circuit connection) to evaluate the internal resistance of the capacitor.

Figure 3 illustrates that the DC voltage comprises the voltage across the capacitor, which is integral to the DC circuit, and the voltage drop attributable to the internal resistance : q ,as delineated in Equation *(3)*.

L E q ~L E ~ H *(3)*

When ~ denotes the equivalent series resistance *(*ESR*)* of a capacitor, the voltage measurement of the capacitor *(*attached to a DC link*)* in an inverter can be performed during the zero-voltage vector intervals.

IV. **Motor control for assessing the internal resistance of a capacitor *(*DC link*)***

Controlling the motor's speed by utilizing the reference axis current u while keeping the reference axis current uconstant at 3 A, necessitates the injection of a harmonic sine wave signal with a frequency of 25 Hz into the stator reference axis current u as outlined in Equation *(4)*.

H :; L : ° ; *(4)*

Figure 4 depicts the regulation of a 3-phase induction motor employing the PI control methodology within MATLAB Simulink.

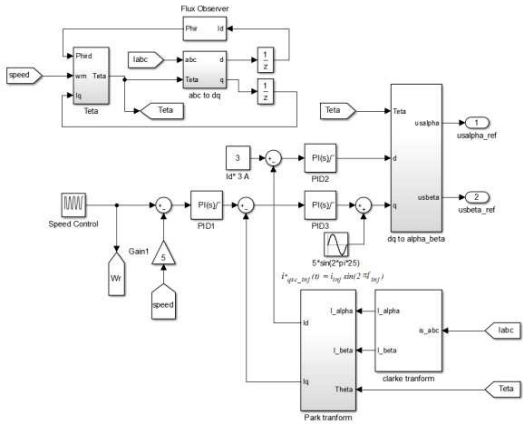


Figure 4*:* Control of a three-phase induction motor via the PI control method

When 4 is the harmonic signal introduced into the reference axis u, and and denote the magnitude and frequency, respectively, the article use 5sin*(*2π25t*)* to input this signal. This injection induces fluctuations in the motor's torque and rotational speed, along with variations in the capacitor voltage. We utilize these ripple signals to assess the internal resistance of the capacitor. We elucidate the criteria for determining the frequency and size of this signal in *[5]*.

V. Assessment of Capacitor Internal Resistance *(*DC Link*)*

The internal resistance ~q of a capacitor *(*connected in a DC circuit*)* is calculated from the voltage drop across the capacitor q and the current flowing through the capacitor , as expressed by Equation *(5)*.

~ L q ~ *(5)*

To measure the q voltage across a capacitor linked to a DC link in an inverter, the explanation is as follows*:* In the interval of zero voltage vectors, as depicted in Figure 1, there is no current passing through the capacitor, leading to a q voltage drop of 0 V, as demonstrated in Figure 2. The q value is calculated by determining the difference between the voltage drop across the capacitor, , and the voltage drop , in addition to the midway voltage 4 . The midpoint voltage 4 is determined as the mean of the capacitor voltage.

The charge at two successive sites, as seen in Figure 2, results in the equation for 4 , as delineated in Equation *(6)*.

4 L 4 > 4 *(6)*

The zero-voltage vector time period can be estimated using the q when and are determined by

measuring the voltage drop across the capacitors, as articulated in Equation *(7)*.

$$\boldsymbol{V_{ESR} = V_{dc\_mid} - V_{c\_mid}} \qquad (7)$$

Equation *(5)* can be rewritten as Equation *(8)*.

$$\boldsymbol{V_{ESR} = R_{esr} \times i_{dc}} \qquad (8)$$

Given that the input signal produces ripple waves associated with the direct current *(*DC*)*, and in the process of measuring the voltages $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$, $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$, and the current $\boldsymbol{i_{dc}}$ to ascertain the internal resistance, it is imperative to employ a band- pass filter with a cutoff frequency of 25 Hz, leading to Equation *(9)*.

$$\boldsymbol{BPF_{(V_{ESR})} = R_{esr} \times BPF_{(i_{dc})}} \qquad (9)$$

A band- pass filter, referred to as $\boldsymbol{BPF_{(V_{ESR})}}$, selectively filters the signal. The calculation of internal resistance relies on $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$, $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$, and $\boldsymbol{i_{dc}}$, which encompass ripple components; hence, this article use the Recursive Least Squares *(*RLS*)* algorithm. This technique is an iterative adaptive method that provides a swift convergence rate based on its methodology. It is quite effective in minimizing processing errors. Equation *(*10*)* presents the resultant equation. Figure 3 depicts the procedure for measuring the voltage across the capacitor to ascertain the internal resistance**.**

$$\boldsymbol{R_{esr}(K+1) = R_{esr}(K) + y(K)BPF_{(i_{dc}(K))} \times \left(BPF_{(V_{ESR(K)})}\right) - R_{esr}(K) \times BPF_{i_{dc}(K)}} \qquad (10)$$

The value of y*(*k*)* is $\boldsymbol{4.5 \times 10^{-6}}$.

VI. simulation

The experiment entails replicating the functionality of a 3- phase SVPWM inverter utilizing MATLAB Simulink. The motor parameters comprise a power rating of 4 kW, a voltage of 400 V, a frequency of 50 Hz, and 2 poles. The DC- link capacitor possesses a capacitance of 2200 μF, with an internal resistance ranging from 0. 04 to 0. 3 Ω. Figure 5 depicts the integration of a diode bridge rectifier within the architecture of the 3- phase SVPWM inverter system in MATLAB Simulink. Figures 6*(*a*)* and *6 (*b*)* illustrate the fluctuation in rotational speed *(*RPM*)* and the reference stator current $\boldsymbol{I_d}$, both regulated at a nominal value of 3A. The reference stator current $\boldsymbol{I_q}$ comprises the DC voltage and a 25 Hz harmonic signal, as seen in Figures 6*(*c*)* and 6*(*d*)*, respectively.

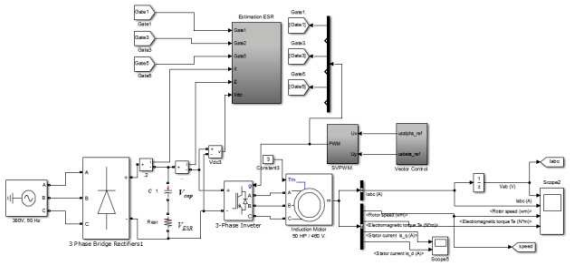


Figure 5 shows a 3-phase inverter with SVPWM *(*Space Vector Pulse Width Modulation*)*

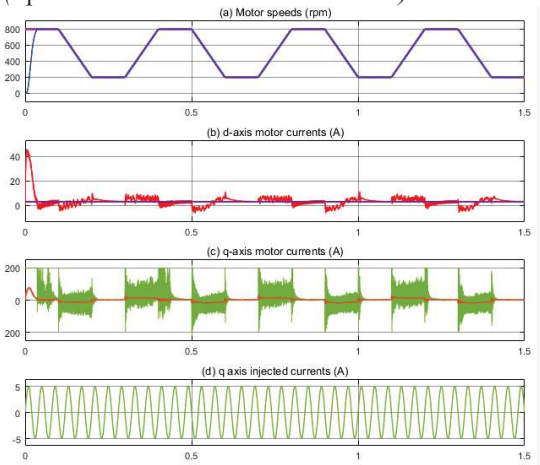


Figure 6*: (a)* Motor Speed *(*b*)* Reference Current for Id Axis *(*c*)* Reference Current for Iq Axis *(*d*)* Iq Axis Harmonic Signal at 25 Hz

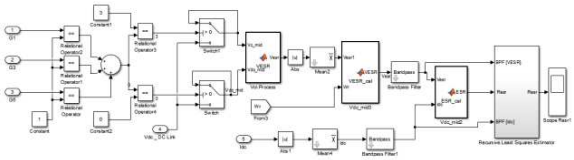


Figure 7*:* The Process of Estimating ESR

Figure 7 depicts the methodology for ascertaining the measurement locations for $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$ and $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$ utilizing sensors. Figure 8 illustrates the identification of zero voltage vector points, notably at V7= 111 and V7= 000, which correspond to a switching time *(*Ts*)* of 0.5 ms. The measurement of $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$ is equivalent to the average value between the midpoint of V7= 000 and V7= 111, which is Ts/ 2= 0. 25 ms. For the voltage $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$, the reference point at Ts/ 2= 0. 25 msT_s/ 2 = 0. 25 ms. corresponds to V7=111V7 = 111 and V7=000V7 = 000, leading to the derivation of $\boldsymbol{V_{c1}}$ and $\boldsymbol{V_{c2}}$ from Equation 6. In Figure 9*(*a*)*, the motor speed $(\boldsymbol{\omega_r})$ diminishes from 800 RPM to 200 RPM, establishing the criteria for ascertaining the voltage measuring location of $\boldsymbol{V_{ESR}}$. Figure 9*(* b*)* illustrates the measurement location of $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$, whereas Figure 9*(*c*)* depicts the measurement location of $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$. Figure 9*(* d*)* illustrates the $\boldsymbol{V_{ESR}}$ voltage measurement's position during the interval of

motor speed reduction. Figure 10 illustrates the method for estimating internal resistance by incorporating $\boldsymbol{R_{esr} = 0.04\Omega}$ in series with a capacitor linked to the DC bus of the inverter. This replicates the internal resistance of the ***system.*** The average ESR measurements taken after three instances of motor deceleration produce an average ESR value of 0.038 Ω.

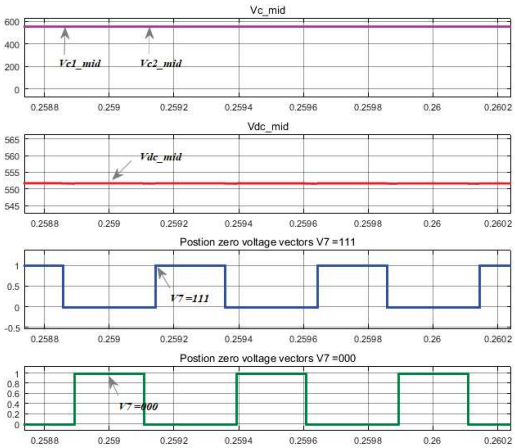


Figure 8 illustrates the measurement positions for $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$ and $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$ in comparison with the switching states of the inverter.

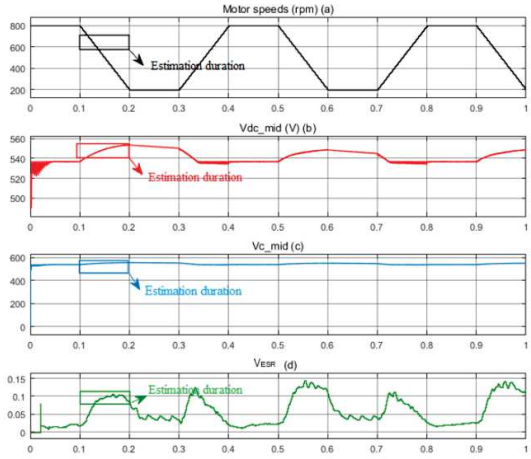


Figure 9 illustrates the values of $\boldsymbol{V_{dc\_mid}}$, $\boldsymbol{V_{c\_mid}}$, and the voltage $\boldsymbol{V_{ESR}}$.

VII. Summary of Simulation

This article offers an online assessment of internal resistance for a DC-link capacitor in an inverter utilizing MATLAB Simulink alongside a diode bridge rectifier circuit. The findings indicate that the estimation error of the suggested approach is 2.88%, deemed acceptable. The researchers intend to perform experiments with real equipment to assess the internal resistance of the capacitor in the inverter utilizing the method outlined in this article.

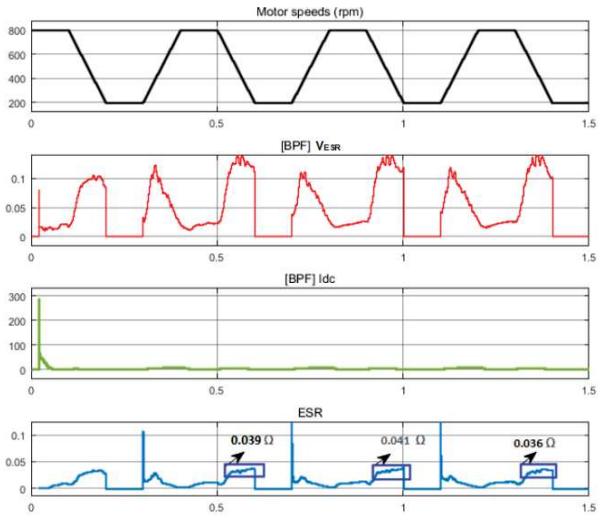


Figure 10 shows the average ESR = 0.038 Ω.

Table 1: Simulation Results of ESR Estimation

$\boldsymbol{R_{esr}}$	ESR *(Estimate)*	Error *(%)*
0.04	0.038	2%
0.08	0.078	2.5%
0.12	0.116	3.3%
0.16	0.158	2.2%
0.2	0.193	3.5%
0.24	0.231	3.7%
0.3	0.291	3%
Error ***(%)***		2.88 **%**

References

[1] S.-H. Hwang and J.-M. Kim, "Dead time compensation method for voltage-fed PWM inverter," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 25, No. 1, pp. 1-10, Mar. 2010.

[2] X. S. Pu, T. H. Nguyen, D.-C. Lee, K.-B. Lee, and J.-Mr. Kim, "Fault diagnosis of DC-link capacitors in three-phase AC/DC PWM converters by online estimation of equivalent series resistance," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 9, pp. 4118-4127, Sep. 2013.

[3] T. H. Nguyen and D.-C. Lee, "Deterioration monitoring of DC-link capacitors in ac machine drives by current injection," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 3, pp. 1126-1130, Mar. 2015

[4] Thanh Hai Nguyenand, Quoc Anh Le, D.-C. Lee, "Estimation of ESR in the DC-Link Capacitors of AC Motor Drive Systems with a Front-End Diode Rectifier," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 30, No. 3, pp. 1126-1130, Mar. 2015

[5] Thanh Hai Nguyenand, Quoc Anh Le, D.-C. Lee, "Estimation of ESR in the DC-Link Capacitors of AC Motor Drive Systems with a Front-End Diode Rectifier," Journal of Power Electronics. vol. 15, No. 2, pp. 411-418, Mar. 2015.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

วิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์เพื่อลดความสูญเสียการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดในเชิงเวลาจริงสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับโดยอาศัยข้อมูลกระแสด้านออกและการทำให้เป็นจริงด้วยการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์

A PWM Method to Reduce Minimum Switching Losses in Real Time for Two-Level Inverters Using Output Current Sensing and Its Realization With Carrier-Based Modulation

ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร[1] ชาตรี สรรคอนุรักษ์[1] และ สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

[2] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

การสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับจะอาศัยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ วิธีการมอดูเลตดังกล่าวจะใช้ความถี่การสวิตช์สูงอยู่ที่ประมาณ 5-10 kHz จึงส่งผลให้มีความสูญเสียเกิดขึ้นที่สวิตช์ค่อนข้างสูง บทความนี้นำเสนอการมอดูเลตเพื่อลดความสูญเสียการสวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดในเชิงเวลาจริงสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ โดยอาศัยข้อมูลขนาดของกระแสด้านออกประกอบในการพิจารณาเลือกเฟสที่ไม่สวิตช์อย่างเหมาะสม การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์ที่นำเสนอจะใช้การมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ ซึ่งเป็นวิธีการมอดูเลตที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการมอดูเลตที่นำเสนอสามารถลดความสูญเสียการสวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดได้

Abstract

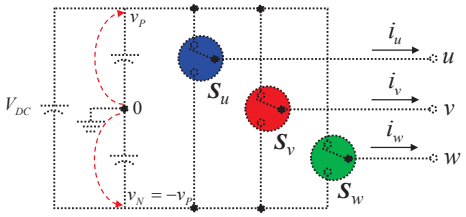
The command output voltage generation for the two-level inverters is used by pulse width modulation (PWM) method. This method has always used the high switching frequency about 5-10 kHz affected high switching losses. This paper presents a modulation technique to reduce minimum switching losses in real time for two-level inverters using absolute values of output currents to choose a phase of non-switching properly. The PWM switching signals can be generated by using carrier-based PWM which can be realized very easily. The research results reveal that the switching losses can be minimized.

Keywords: two-level inverter, carrier-based modulation, switching losses

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เป็นคอนเวอร์เตอร์ที่ยังคงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมและปัจจุบันยังถูกนำมาใช้กับเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า[1] อีกด้วย การสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะอาศัยวิธีการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งวิธีการมอดูเลตแบบนี้จะใช้ความถี่การสวิตช์สูงอยู่ที่ประมาณ 5-10 kHz จึงส่งผลให้มีความสูญเสียจากการสวิตช์ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีบทความที่ได้นำเสนอเทคนิคการมอดูเลตเพื่อลดจำนวนครั้งของการสวิตช์ [2-5] โดยอาศัยการเลือกเฟสของแรงดันด้านออกที่มีค่าแรงดันสูงสุดหรือต่ำสุดเฟสใดเฟสหนึ่งไม่สวิตช์ตลอด (DPWM 120°, DPWM 60°, DPWM 30°) [5] เทคนิคในการมอดูเลต DPWM 120° จะสามารถลดการสูญเสียที่สวิตช์ได้ประมาณ 33.33% เมื่อเทียบกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) ในขณะที่ DPWM 60° และ DPWM 30° จะลดค่าสูญเสียที่สวิตช์ได้มากกว่า 33.33% ขึ้นอยู่กับมุมเฟสของกระแสหรือตัวประกอบกำลังด้านออก อย่างไรก็ตามมุมเฟสของกระแสหรือตัวประกอบกำลังด้านออกมักจะมีค่าไม่คงที่โดยขึ้นกับจุดทำงานของโหลดในขณะนั้น

บทความนี้นำเสนอการมอดูเลตเพื่อลดความสูญเสียจากการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดสำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ โดยอาศัยข้อมูลของกระแสด้านออกในเชิงเวลาจริงประกอบในการพิจารณาเลือกเฟสที่ไม่สวิตช์อย่างเหมาะสม และใช้การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์โดยอาศัยคลื่นพาห์ที่มีขั้นตอนที่ง่ายและใช้การคำนวณที่น้อย



รูปที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

2. โครงสร้างและรูปสมการทั่วไปของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

อินเวอร์เตอร์ 2 ระดับมีลักษณะโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกได้ดังสมการที่ (1) - (2)

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \\ m_{31} & m_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_P \\ v_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* + v_Z \\ v^* + v_Z \\ w^* + v_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$0 \le m_{ij} \le 1, \ \sum_{j=1}^{3} m_{ij} = 1, \ \ i = \{1,2,3\}, j = \{1,2,3\} \quad (2)$$

โดยที่ v_P, v_N คือแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้าค่าบวกและลบตามลำดับ

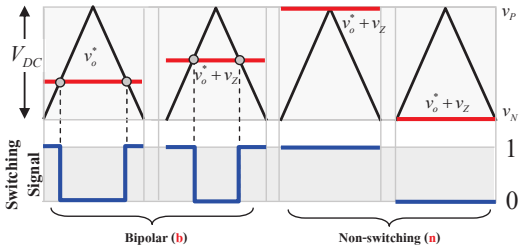
u^*, v^*, w^* คือแรงดันด้านออกคำสั่ง

m_{ij} คือฟังก์ชันการมอดูเลต v_Z คือแรงดันลำดับศูนย์

3. การสร้างสัญญาณความกว้างพัลส์โดยอาศัยคลื่นพาห์

3.1 รูปแบบการสวิตช์ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาห์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอินเวอร์เตอร์สองระดับซึ่งสามารถสร้างรูปแบบการสวิตช์ที่สมมูลกับการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ได้แต่จะใช้การคำนวนที่น้อยกว่าและมีขั้นตอนง่ายๆ การมอดูเลตแบบนี้จะอาศัยการสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์โดยใช้แรงดันอ้างอิงเปรียบเทียบกับรูปคลื่นพาห์สามเหลี่ยม แรงดันอ้างอิงดังกล่าวนั้นจะได้จากแรงดันด้านออกที่ต้องการสร้างบวกกับแรงดันลำดับศูนย์ ความสูงของรูปคลื่นพาห์สามเหลี่ยมจะมีขนาดเท่ากับแรงดันบัสไฟตรงด้านเข้า ส่วนความถี่ของรูปคลื่นจะถูกกำหนดด้วยความถี่การสวิตช์ ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการมอดูเลตได้ดังรูปที่ 2

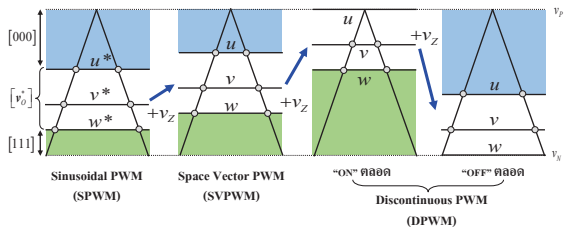


รูปที่ 2 การมอดูเลตโดยอาศัยคลื่นพาห์สำหรับอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ากรณีของอินเวอร์เตอร์สองระดับจะให้รูปแบบการสวิตช์ที่เป็นไปได้เพียง 2 รูปแบบ คือ แบบไม่สวิตช์ (Non-switching) และแบบสองขั้ว (Bipolar)

3.2 แรงดันลำดับศูนย์ v_Z ในแต่ละรูปแบบการสวิตช์

จากโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 1 จะมีด้วยกัน 3 กิ่ง โดยในแต่ละกิ่งจะมีสวิตช์ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการสร้างแรงดันด้านออกที่ต้องการ 2 ตัว สลับกันนำกระแส สัญญาณที่ใช้ในการขับนำสวิตช์ทั้ง 3 กิ่งดังกล่าวจะได้จากการนำแรงดันอ้างอิงทั้ง 3 เฟส เปรียบเทียบกับคลื่นพาห์ ซึ่งแรงดันอ้างอิงทั้ง 3 เฟสนี้จะได้จากการนำแรงดันคำสั่งทั้ง 3 เฟสบวกด้วยแรงดันลำดับศูนย์ v_Z เพื่อให้แรงดันอ้างอิงไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 2 ระดับ เมื่อบวกแรงดันลำดับศูนย์ที่แตกต่างกัน

ก. การมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ (SVPWM)

การมอดูเลตแบบนี้คือการเลือกบวกแรงดันลำดับศูนย์ที่ให้ [111] และ [000] มีขนาดเท่าๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะสมมูลกับวิธีการมอดูเลตเชิงสเปซเวกเตอร์ที่นิยมใช้สำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับ โดยรูปแบบการสวิตช์ที่ได้จะเป็นแบบสองขั้วทั้งสามเฟส <3b> PWM ลักษณะดังกล่าวจะได้จำนวนการสวิตช์ 6 ครั้งต่อรายคาบการสวิตช์ หาก $u^* > v^* > w^*$ ในกรณีนี้แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ (4)

$$v_Z = \frac{[v_P - u^*] + [v_N - w^*]}{2} \tag{4}$$

ข. การมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส (DPWM)

เพื่อลดจำนวนครั้งการสวิตช์เราสามารถเลือกแรงดันลำดับศูนย์ตามสมการที่ (5a) หรือ (5b) ซึ่งจะได้การมอดูเลตเป็นแบบที่ไม่สวิตช์ 1 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะมีด้วยกัน 2 กรณี คือ

- กรณี "ON" ตลอด หมายถึงการให้สวิตช์ตัวบนเฟสที่มีค่าแรงดันมากสุดนำกระแสตลอดในหนึ่งคาบการสวิตช์ กรณีนี้จะได้ $u = u^* + v_Z = v_P$ แรงดันลำดับศูนย์หาได้ตามสมการที่ (5a)

$$v_Z = v_P - u^* \tag{5a}$$

- กรณี "OFF" ตลอด หมายถึงการให้สวิตช์ตัวล่างค่าแรงดันต่ำสุดนำกระแสตลอดในหนึ่งคาบการสวิตช์ ซึ่งกรณีนี้จะได้ $w = w^* + v_Z = v_N$ แรงดันลำดับศูนย์จะเป็นไปตามสมการที่ (5b)

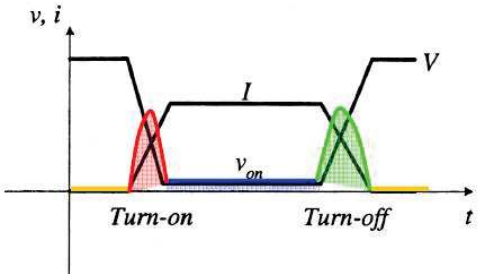
$$v_Z = v_N - w^* \tag{5b}$$

จากการเลือกแรงดันลำดับศูนย์ของการมอดูเลตแบบไม่สวิตช์ 1 เฟส หากพิจารณาการใช้เวกเตอร์ศูนย์ของการมอดูเลตสเปซเวกเตอร์แบบ DPWM จะพบว่า การมอดูเลตกรณี "ON" ตลอดจะใช้เวกเตอร์ศูนย์เฉพาะ [111] (สีเขียว) เท่านั้น ในทางตรงกันข้าม กรณี "OFF" ตลอดจะใช้เพียงเวกเตอร์ศูนย์ [000] (สีฟ้า) เท่านั้น การมอดูเลตทั้งสองกรณีจะทำให้มีหนึ่งเฟสเป็นแบบไม่สวิตช์และที่เหลืออีกสองเฟสจะเป็นแบบสองขั้ว หรือ <1n2b> PWM ทำให้จำนวนการสวิตช์เหลือเพียง 4 ครั้งต่อรายคาบการสวิตช์ ซึ่งจะน้อยกว่าการมอดูเลต SVPWM ที่เป็น 6 ครั้ง ค่าสูญเสียการสวิตช์จึงลดลง 1 ใน 3 หรือลดลงประมาณ 33.33% อย่างไรก็ตามค่าสูญเสียการสวิตช์ยังสามารถลดลงได้มากกว่า 33.33% หากเลือกรูปแบบการสวิตช์แบบ "ON" ตลอด หรือ "OFF" ตลอด สลับกันอย่างเหมาะสม

4. การมอดูเลตเพื่อลดค่าสูญเสียจากการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดที่นำเสนอ

4.1 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์

การสูญเสียจากการสวิตช์[6] จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จากหยุดนำกระแสเป็นนำกระแส (Turn on) และจากนำกระแสเป็นหยุดนำกระแส (Turn off) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การสูญเสียจากการสวิตช์ช่วงนำกระแสและหยุดนำกระแส

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าในช่วงเปลี่ยนสถานะการสวิตช์จากนำกระแสและหยุดนำกระแส กระแสและแรงดันจะไม่เปลี่ยนแปลงแบบทันที ทันใดแต่จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและลดลงทำให้สวิตช์มีกระแสและแรงดันเกิดขึ้นพร้อมกันลักษณะดังกล่าวส่งผลให้สวิตช์มีค่าสูญเสียเกิดขึ้นซึ่งเมื่อเชื่อมโยงกับจำนวนครั้งการสวิตช์จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (6)

$$P_{SW,loss} = \sum_{i=1}^{N} \frac{v_i i_i (t_{on} + t_{off}) f_s}{2} \tag{6}$$

เมื่อ

$P_{SW,loss}$ คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์
v_i, i_i คือแรงดันตกคร่อมสวิตช์และกระแสที่ไหลผ่านสวิตช์
t_{on}, t_{off} คือช่วงเวลาสับเปลี่ยนการนำกระแสและหยุดกระแส
f_s คือความถี่การสวิตช์
N คือจำนวนครั้งการสวิตช์ในหนึ่งรายคาบการสวิตช์

จากสมการที่ 6 ชี้ให้เห็นว่าค่าสูญเสียการสวิตช์จะขึ้นอยู่กับความถี่การสวิตช์ จำนวนครั้งในการสวิตช์ แรงดันและกระแสในช่วงเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ ดังนั้นแนวทางการลดค่าสูญเสียสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดจะต้องอาศัยข้อมูลดังกล่าวร่วมกันพิจารณา อย่างไรก็ตามการลดค่าสูญเสียการสวิตช์ไม่สามารถลดความถี่การสวิตช์ได้ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความผิดเพี้ยนของกระแสด้านออก ส่วนจำนวนครั้งการสวิตช์จะลดลงได้น้อยสุดเพียง 4 ครั้งต่อรายคาบการสวิตช์ ดังนั้นการลดค่าสูญเสียที่สวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดจึงควรโฟกัสไปที่การลดแรงดันและกระแส แต่จากการศึกษาพบว่าแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ในช่วงเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ จะเท่ากับแรงดันที่บัสไฟตรงโดยปรกติจะมีค่าคงที่ จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นการลดค่าสูญเสียที่สวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดจึงทำได้เพียงวิธีการเดียวคือการลดกระแสในช่วงเปลี่ยนสถานะการสวิตช์ให้มีขนาดน้อยที่สุด

4.2 เทคนิคการมอดูเลตโดยอาศัยข้อมูลขนาดของกระแสด้านออกในการเลือกเฟสไม่สวิตช์

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการสวิตช์แบบ “ON” ตลอด จะเกิดขึ้นกับเฟสที่มีแรงดันค่าสูงสุดในขณะนั้น ส่วน “OFF” ตลอด จะเกิดขึ้นกับเฟสที่มีค่าต่ำสุดอยู่ในขณะนั้น ดังนั้นการลดค่าสูญเสียในการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดก็เพียงแค่เลือกรูปแบบการสวิตช์แบบ “ON” ตลอด หรือ “OFF” ตลอด โดยอาศัยข้อมูลกระแสในช่วงเวลานั้นว่าขนาดของกระแสเฟสที่แรงดันมีค่าสูงสุดและต่ำสุด เฟสใดมีขนาดกระแสมากกว่ากัน

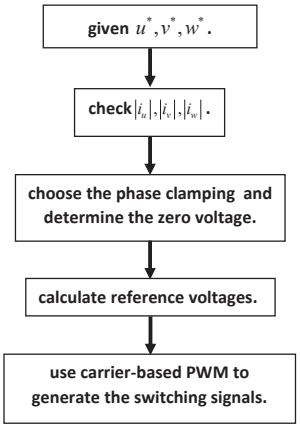
เพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายในที่นี้จะสมมติให้แรงดันด้านออกมีลำดับค่าดังนี้ $u^* > v^* > w^*$ กรณีอื่นก็คิดได้ในทำนองเดียวกัน ซึ่งในกรณีนี้กระแสเฟสที่แรงดันมีค่าสูงสุดคือ i_u และต่ำสุดคือ i_w หากขนาดกระแส $|i_u| \geq |i_w|$ จะเลือกไม่สวิตช์เฟส u แต่ถ้าขนาดกระแส $|i_u| < |i_w|$ จะเลือกไม่สวิตช์เฟส w แทน ดังนั้นจะได้

$$\underbrace{u = u^* + v_Z = v_P,\ v_Z = v_P - u^*}_{if\ |i_u| \geq |i_w|} \tag{7a}$$

หรือ

$$\underbrace{w = w^* + v_Z = v_N,\ v_Z = v_N - w^*}_{if\ |i_u| < |i_w|} \tag{7b}$$

จากแนวทางการมอดูเลตเพื่อลดค่าสูญเสียการสวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดโดยอาศัยข้อมูลขนาดของกระแสด้านออกในการพิจารณาเลือกเฟสที่ไม่สวิตช์สามารถแสดงอัลกอรึทึมได้ดังรูปที่ 5

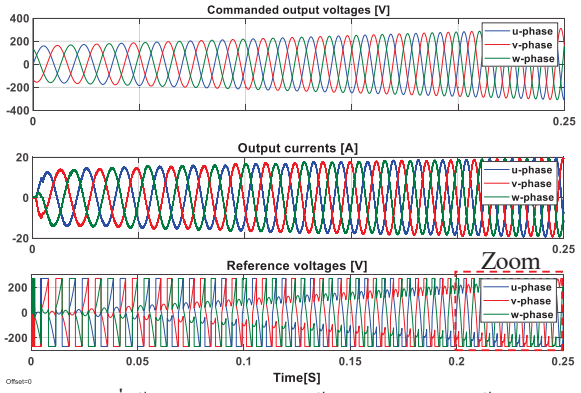


รูปที่ 5 อัลกอริทึมของการมอดูเลตเพื่อลดความสูญเสียจากการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุด

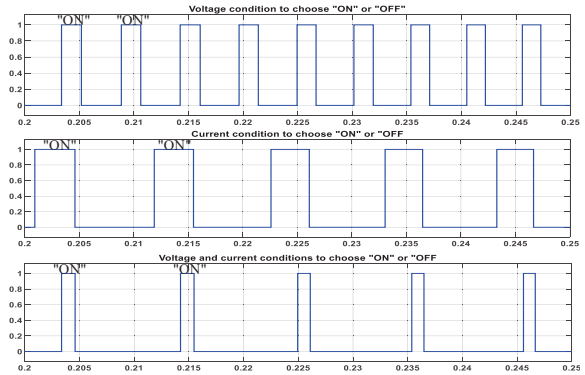
5. ผลการจำลองการทำงาน

เพื่อยืนยันแนวคิดที่นำเสนอในการลดค่าสูญเสียการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุดตามที่นำเสนอ ในที่นี้จะแสดงผลการจำลองการทำงานได้ดังรูปที่ 6 โดยกำหนดให้แรงดันบัสไฟตรง V_{DC}= 540 V แรงดันด้านออกถูกควบคุมแบบ v/f และโหลด R=10 โอห์มอนุกรมกับ L=20mH

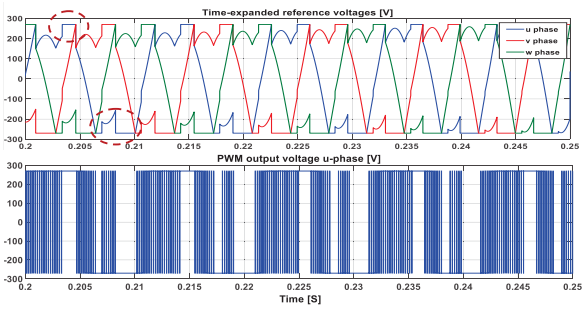
รูปที่ 6(a) แสดงผลการจำลองโดยกำหนดให้ความถี่ด้านออกเริ่มต้นที่ 50 Hz เพิ่มขึ้นจนเป็น 100 Hz ซึ่งจะทำให้มุมเฟสของกระแสด้านออกมีค่าเปลี่ยนแปลงเพื่อตรวจสอบอัลกอริทึมของการมอดูเลตที่นำเสนอ จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดันด้านออกจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นและมุมเฟสกระแสด้านออกก็เพิ่มขึ้นตามความถี่ดังกล่าว อย่างไรก็ตามกระแสด้านออกในช่วงเริ่มต้นจะมีความผิดเพี้ยนเล็กน้อยจากสภาวะชั่วครู่



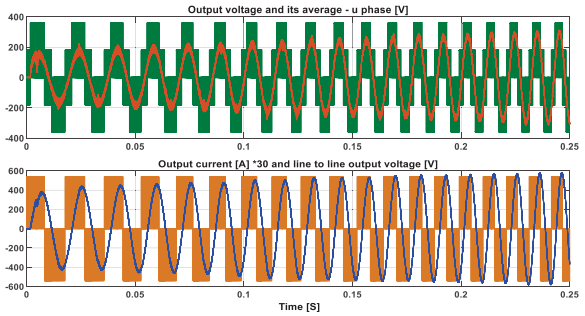
(a) แรงดันคำสั่งด้านออก (บน) กระแสด้านออก และแรงดันอ้างอิง (ล่าง)



(b) สัญญาณควบคุมการเลือกเฟสไม่สวิตช์สำหรับเฟส u



(c) แรงดันอ้างอิงในส่วนขยายสเกลเวลา และ PWM แรงดันเฟส u



(d) แรงดันเฟสด้านออก (บน) แรงดันระหว่างเฟส และกระแสด้านออก

รูปที่ 6 ผลการจำลองการมอดูเลตเพื่อลดค่าสูญเสียจากการสวิตช์ให้มีค่าน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมในรูปที่ 6(b) และในส่วนขยายเวลาในรูปที่ 6(c) จะเห็นได้ว่าแรงดันอ้างอิงเฟส u จะเลือกแคลมป์บัสบวกเมื่อแรงดันมีค่ามากสุดและกระแสเฟส u มีขนาดมากสุด และจะเปลี่ยนเป็นแคลมป์บัสลบเมื่อแรงดันเฟส u มีค่าต่ำสุดและขนาดกระแสเฟส u มีค่ามากสุด โดยการเลือกแคลมป์จะเป็นไปตามเงื่อนไขของทั้งแรงดันและขนาดกระแส ลักษณะดังกล่าวทำให้ช่วงเวลาที่ใช้สำหรับการแคลมป์แตกต่างกัน ซึ่งปรกติจะมีช่วงเวลาเท่ากันๆ ในกรณีนี้การแคลมป์ที่บัสลบหรือ “OFF” ตลอดจะมีช่วงเวลาที่มากกว่าเล็กน้อย (เส้นปะสีแดง) แต่หากพิจารณารูปแบบการสวิตช์จะพบว่าจะมีการไม่สวิตช์หนึ่งเฟสตลอดเวลา <1n2b> PWM (DPWM) ลักษณะดังกล่าวจึงทำให้การสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าลดลงน้อยที่สุดตามที่นำเสนอ นอกจากนั้นหากพิจารณารูปที่ 6(d) จะพบว่ากระแสด้านออกยังคงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ซึ่งสะท้อนว่าแนวทางการควบคุมที่นำเสนอสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ โดยไม่มีผลกระทบต่อกระแส และเมื่อนำวิธีที่นำเสนอมาเปรียบเทียบในแต่ละวิธี [5] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบการมอดูเลตแบบต่างๆ ที่ความถี่ 50 Hz

	Modulation methods				
Parameters	**SVPWM**	**DPWM 120°**	**DPWM 60°**	**DPWM 30°**	**Proposed**
PWM mode	<3b>	<1n2b>	<1n2b>	<1n2b>	<1n2b>
%THDi	0.73	0.75	0.77, 0.79	0.73	0.78
BSOs	6	4	4	4	4
Switching losses	High	Medium	Low	Low	Lowest

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการมอดูเลตความกว้างพัลส์เพื่อลดค่าสูญเสียจากการสวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดสำหรับอินเวอร์เตอร์สองระดับด้วยการเลือกแคลมป์เฟสในเชิงเวลาจริงอย่างเหมาะสมโดยอาศัยข้อมูลขนาดของกระแสด้านออก การสร้างสัญญาณขับนำสวิตช์จะอาศัยการมอดูเลตบนฐานคลื่นพาห์ที่มีขั้นตอนที่ง่ายและใช้การคำนวณที่น้อย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการควบคุมการเลือกแคลมป์เฟสเป็นไปตามที่ต้องการจึงยืนยันได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถลดค่าสูญเสียจากการสวิตช์ให้เหลือน้อยที่สุดได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อกระแสด้านออก

เอกสารอ้างอิง

[1] A. K. Vijayan, S. Chakkalakkal and A. Emadi, "Efficiency Evaluation of 800V Electric Vehicle Powertrain using Two-Level Voltage Source Inverter with different Modulation Techniques," *2023 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 2023, pp. 1-6.

[2] A. M. Trzynadlowski and S. Legowski, "Minimum-loss vector PWM strategy for three-phase inverters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 26-34, Jan. 1994.

[3] V. Blasko, “Analysis of a hybrid PWM based on modified space-vector and triangle-comparison methods,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 33, no. 3, pp. 756-764, May-June 1997.

[4] A. M. Hava, R. J. Kerkman and T. A. Lipo, “A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm,” *IEEE Tran. Ind. Applicat.*, vol. 34, no. 5, pp. 1059-1071, Sept.-Oct. 1998.

[5] Dae-Woong Chung, Joohn-Sheok Kim and S. -K. Sul, “Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion,” *IEEE Tran. Ind. Applicat.*, vol. 34, no. 2, pp. 374-380, March-April 1998.

[6] Ned Mohan, M. Undeland and P. Robbins, *Power Electronics Converter, Application, and Design*, 2nd edition John Wiley & Sons, Inc., pp. 20-24, 1995.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ที่ใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์

Three-Phase Induction Motor Drive with Three-Phase Matrix Converter using Space-Vector PWM

สันติสุข สว่างกล้า[1] สถาพร เสือเทศ[2] และ ประสพโชค โห้ทองคำ[3*]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
E-mail: [*]prasopchok.hot@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส โดยตรงที่ปราศจากวงจรเชื่อมโยงดีซีหรือวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สวิตช์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด ซึ่งประกอบด้วยไอจีบีที-ไดโอดกำลังทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ด้านอินพุทที่มีความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ที่สามารถปรับความถี่และขนาดแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยการปรับค่าความถี่และค่าอัตราการมีอดดูเลตที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ (SVPWM) เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยพิจารณาการทดสอบกับโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสได้ทำการทดสอบแรงบิดและความเร็วรอบโดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความถี่เอาท์พุทของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ โดยมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าได้รับโหลดที่ค่าขนาด 5 N.m. รวมทั้งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าด้วย ผลการทดสอบเป็นไปในทางที่ดี

คำสำคัญ: วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส, สเปซเวคเตอร์พีดับบลิวเอ็ม, มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส

Abstract

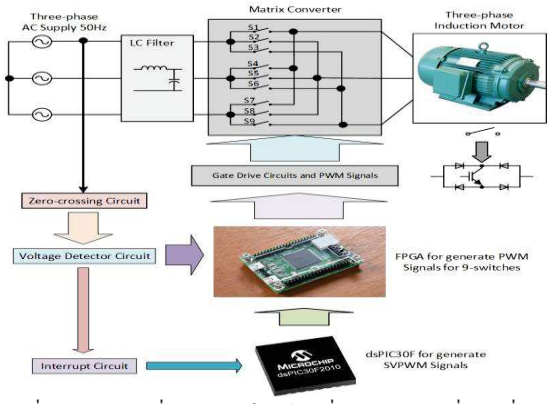
This paper presents the direct conversion of the Three-phase AC input to the Three-phase AC output without the DC Link or called a Three-phase Matrix Converter. This converter is using the 9-units of bidirectional, IGBT-Power Diode. The converter is converting a constant utility three-phase sinusoidal supply voltage and frequency into a variable output voltage and frequency through alteration of the frequency and modulation index of the SVPWM signals used by the converter for the Three-phase Induction Motor Drive. The simulation results are torque and speed of the Three-phase Induction Motor which can be tested by adjusted the output frequencies of this converter. The Three-phase Induction Motor took the load at 5 N.m. In addition, the output voltage and current waveforms are observed. These results are good agreement.

Keywords: Three-phase Matrix Converter, Space Vector PWM, Three-Phase Induction Motor

1. บทนำ

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพียงขั้นตอนเดียวด้วยสวิตช์สองทิศทางจำนวน 9 ชุด ใช้ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้า จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ที่คงที่แปลงผันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ด้วยสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทิศทาง โดยลักษณะสวิตช์สองทิศทางที่ใช้ในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยไอจีบีที 1 ตัวกับไดโอดกำลัง 4 ตัว ต่อแบบบริดจ์ โดยมีงานวิจัยที่ใช้สวิตช์สองทางแบบนี้ โดยมีการวิเคราะห์การทำงานและได้ทำการจำลองทางโมเดลคณิตศาสตร์พร้อมทดสอบการทำงานจริง [1], [2], [3], [4] งานวิจัยเกี่ยวกับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสมีอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีการใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้แบบต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกันในลักษณะของค่า Total Harmonic Distortion (THD) ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่าความสูญเสียในการสวิตช์ ด้วยการจำลองการทำงานของวงจรที่ใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแต่ละแบบ เพื่อทดสอบถึงจุดเด่นและจุดด้อยของแต่ละแบบของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่มีความเหมาะสมในการใช้งานกับวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส พบว่าสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแต่ละมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปตามแต่จะเลือกไปใช้งานในแต่ละสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแต่สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM ก็คงยังมีข้อดีในหลายด้าน [6] ระบบ high-frequency link matrix converter (HFLMC) เป็นระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ใช้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส โดยพบปัญหาที่กระแสไฟฟ้ามีริปเปิลมากจึงทำให้เกิดปัญหาต่อระบบจึงได้มีการนำสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM มาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสทำให้สามารถลดกระแสไฟฟ้าริปเปิลลงได้อย่างเป็นที่น่าพอใจ [7] ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาใช้ชุดสวิตช์สองทางที่ประกอบด้วยไอจีบีที 2 ตัว กับไดโอดกำลัง 2 ตัว นำมาต่อกัน ดังนั้น

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM มาใช้ในการควบคุมสวิตช์สองทางที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ดังกล่าวมาข้างต้นมาใช้ในการจำลองระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสที่สามารถปรับความถี่เอาท์พุทได้ เพื่อพิจารณาผลของแรงบิดและความเร็วรอบที่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM ที่สามารถปรับความถี่และอัตราการมือดได้มาใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทาง เพื่อเป็นข้อมูลที่นำไปใช้ในการทดสอบต้นแบบจริงต่อไป



รูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ขับเคลื่อนด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสที่นำเสนอในงานวิจัย

2. หลักการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส[1]

สมการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางเอาท์พุทของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1-5 ที่สัมพันธ์กับสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่เป็นฟังก์ชั่นการสวิตช์ของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์นี้

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) \\ \cos(\omega_s t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_s t + 120^\circ) \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 \\ F_3 & F_1 & F_2 \\ F_2 & F_3 & F_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$= \frac{3AV}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t - 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_3 & F_2 \\ F_2 & F_1 & F_3 \\ F_3 & F_2 & F_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$= \frac{3AI}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{3A_i V}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + 120^\circ) \\ \cos(\omega_o t - 120^\circ) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$+ \sum_{n=2,5,8}^{\infty} \frac{3A_n V}{2} \begin{bmatrix} \cos[(n\omega_s + \omega_i)t] \\ \cos[(n\omega_s + \omega_i)t + n120^\circ] \\ \cos[(n\omega_s + \omega_i)t - n120^\circ] \end{bmatrix}$$

$$+ \sum_{n=4,7,10}^{\infty} \frac{3A_n V}{2} \begin{bmatrix} \cos[(n\omega_s - \omega_i)t] \\ \cos[(n\omega_s - \omega_i)t + n120^\circ] \\ \cos[(n\omega_s - \omega_i)t - n120^\circ] \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{3A_i I}{2} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t - 120^\circ) \\ \cos(\omega_i t + 120^\circ) \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$+ \sum_{n=2,5,8}^{\infty} \frac{3A_n I}{2} \begin{bmatrix} \cos[(n\omega_s + \omega_o)t] \\ \cos[(n\omega_s + \omega_o)t - n120^\circ] \\ \cos[(n\omega_s + \omega_o)t + n120^\circ] \end{bmatrix}$$

$$+ \sum_{n=4,7,10}^{\infty} \frac{3A_n I}{2} \begin{bmatrix} \cos[(n\omega_s - \omega_o)t] \\ \cos[(n\omega_s - \omega_o)t - n120^\circ] \\ \cos[(n\omega_s - \omega_o)t + n120^\circ] \end{bmatrix}$$

โดยที่ V_{an}, V_{bn}, V_{cn} เป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟสด้านอินพุทที่เฟสสมดุล

V_{AN}, V_{BN}, V_{CN} เป็นแรงดันไฟฟ้าสามเฟสด้านเอาท์พุทที่เฟสสมดุล

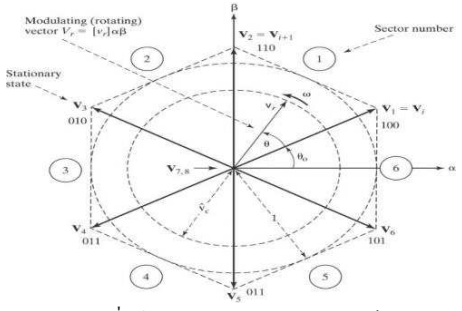
F_1, F_2, F_3 เป็นฟังก์ชั่นการสวิตช์ของวงจรคอนเวอร์เตอร์

I_a, I_b, I_c เป็นกระแสไฟฟ้าสามเฟสด้านอินพุทที่เฟสสมดุล

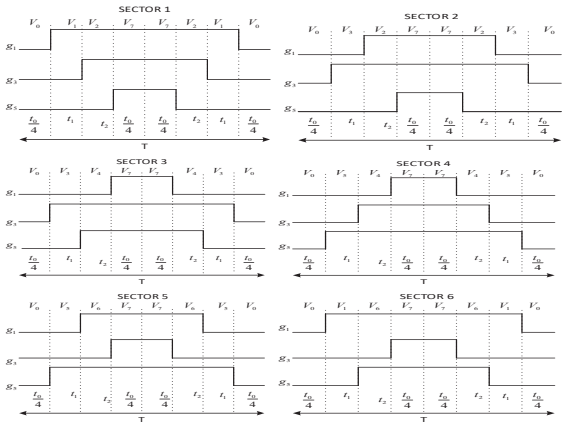
I_A, I_B, I_C เป็นกระแสไฟฟ้าสามเฟสด้านเอาท์พุทที่เฟสสมดุล

3. หลักการของ Space-Vector PWM [5]

สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวกเตอร์เป็นหลักการที่ใช้เวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้ามากำหนดการสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบสองระดับหรืออินเวอร์เตอร์สองระดับด้วยการแบ่งเป็น 6 เซคเตอร์ๆ ละ 60 องศาแทนลำดับการสวิตช์ ซึ่งเป็นการสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับที่นำมาประยุกต์ใช้ในการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งจะมีเวกเตอร์ทั้งหมด 8 เวกเตอร์ แทนสภาวะการทำงานของสวิตช์ในวงจรอินเวอร์เตอร์ทั้ง 6 ตัว โดยจะมีลักษณะของสเปซเวกเตอร์ดังรูปที่ และมีลำดับการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 เซคเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์ทั้ง 6 ตัว ที่เวลาการทำงานของสวิตช์สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 7



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของสเปซเวกเตอร์



รูปที่ 3 ลำดับการสวิตช์ของสัญญาณพีดับลิวเอ็มในแต่ละเซ็คเตอร์

สมการที่ 6 เป็นการคำนวณหาค่าอัตราการมอดของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์นี้จะเป็นตัวกำหนดค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ด้านเอาท์พุทของวงจรคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 โดยที่ค่ามากกว่า 1.0 จะเป็นช่วงการทำงานในสภาวะ over modulation ซึ่งสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์สามารถทำงานได้ ส่วนสมการที่ 7 เป็นการคำนวณหาค่าช่วงเวลาในการทำงานของสวิตช์แต่ละตัวในแต่ละเซ็คเตอร์ของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM

$$m_a = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{dc}} \tag{6}$$

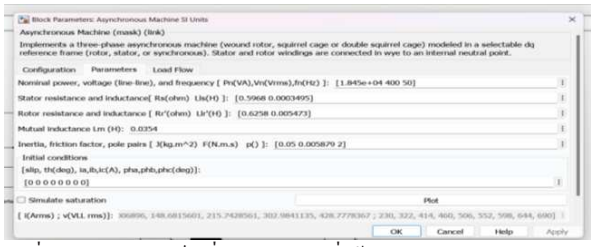
$$t_1 = \frac{\sqrt{3}V_{ref}T_s}{V_{dc}}\sin\left(\frac{\pi}{3}-\theta'\right)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{3}V_{ref}T_s}{V_{dc}}\sin\theta' \tag{7}$$

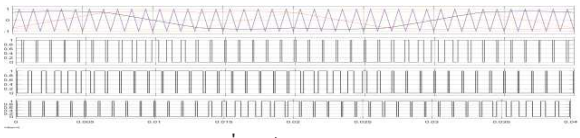
$$t_0 = T_s - t_1 - t_2$$

4. ผลการจำลองการทำงานของระบบ

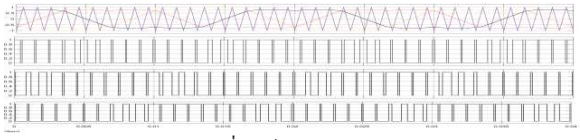
วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่ใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ในการขับนำสวิตช์สองทางในวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ได้ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย 3 เฟส ความถี่ 50Hz ผ่านวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟส เพื่อทำการตัดต่อเป็นไฟฟ้าสามเฟสที่สามารถปรับขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่โหลดที่เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสมีพิกัดตามรูปที่ สัญญาณพีดับบลิวเอ็มสามารถปรับความถี่และอัตราการมอดได้ โดยได้ทำการแสดงการปรับความถี่ที่ค่า 25Hz และ 50Hz ที่ค่าอัตราการมอดเท่ากับ 0.8 แล้วทำการพิจารณาค่าของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส โดยที่ทำการจ่ายโหลดที่ค่า 5 N.m. จ่ายให้มอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟส โดยลักษณะของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ที่ใช้แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 พิกัดของมอเตร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

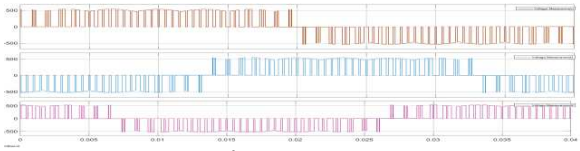


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz

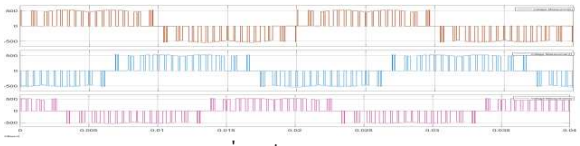


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 5 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบสเปซเวคเตอร์ที่ค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ50Hz, อัตราการมอดเท่ากับ0.8

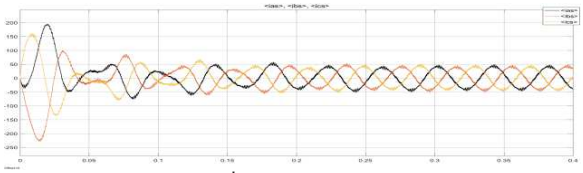


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz

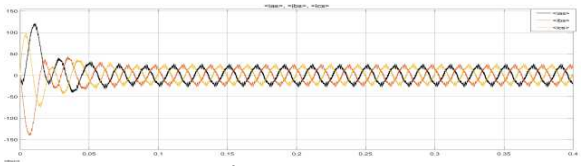


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุททั้งสามเฟสที่อัตราการมอดเท่ากับ 0.8

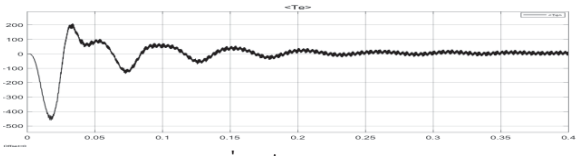


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz

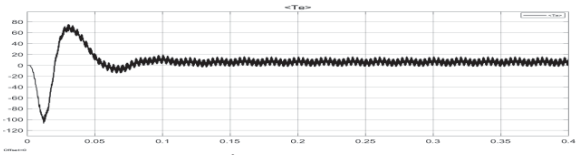


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเอาท์พุททั้งสามเฟสที่โหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสที่อัตราการมอดเท่ากับ0.8

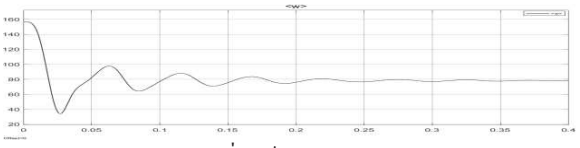


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz

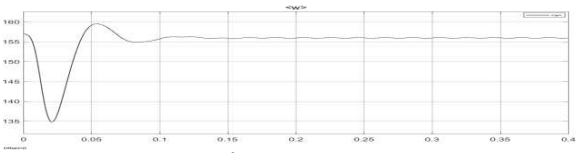


ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 8 แรงบิด (Torque) ที่อัตราการม็อดเท่ากับ0.8 และที่ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz



ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz



ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

รูปที่ 9 ความเร็ว (Speed) ที่อัตราการม็อดเท่ากับ0.8 ที่ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz

จากการจำลองระบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีการปรับค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz และอัตราการม็อดเท่ากับ 0.8 พบว่ากระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสที่ได้จากการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 7 มีลักษณะการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มีความไวที่ค่าความถี่เท่ากับ 50Hz เมื่อเทียบกับค่าความถี่เท่ากับ 25Hz ที่ค่าความถี่ที่ลดลง ส่วนแรงบิดที่ทำการทดสอบพบว่ามีค่าลดลงเมื่อความถี่ลดลงจาก 50Hz เป็น 25Hz และมีการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ช้ากว่าเมื่อความถี่ลดลงรวมทั้งมีการกระเพื่อมของแรงบิดที่มากขึ้น อีกทั้งค่าความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสเมื่อปรับความถี่จาก 25Hz เป็น 50Hz จะมีการกระเพื่อมที่น้อยลงและการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ไวขึ้นตามผลการทดสอบที่แสดงข้างต้น

3. สรุปผลการจำลอง

จากการจำลองการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้สัญญาณพีดับบลิวเอ็มแบบ SVPWM แบบทางตรงสามารถปรับความถี่เอาท์พุทได้ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่ค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปเมื่อค่าความถี่สูงขึ้นแรงบิดและความเร็วมีการแกว่งของสัญญาณที่ลดลง รวมทั้งการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ไวมากขึ้นตามการเพิ่มของความถี่ และมีค่าเช่นเดียวกับการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ส่วนในเรื่องอัตราการม็อดได้ทำการทดสอบที่ค่าเท่ากับ 0.8 ทั้งสองความถี่ จากข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์สามเฟสที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าสามเฟสต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว) ร่วมกับโครงการวิจัยพื้นฐานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้มอบทุนวิจัยงบทางด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ปี 2564 (เลขที่สัญญา A12-2564) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยแก่งานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Phoivos D. Ziogas, Shahidul I. Khan, and Muhammad H. Rashid, “Analysis and Design of Forced Commutated Cycloconverter Structures with Improved Transfer Characteristics”, IEEE Transctions on Industrial Electronics, Vol. IE-33, No.3, August 1986.

[2] Prasopchok Hothongkham, “Theoretical and Practical Analysis of 6-pulse Three-Phase PWM AC- AC Matrix Converter”, *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011*, 17-19 May 2011, Khon Kaen, Thailand, pp.739-743.

[3] Prasopchok Hothongkham, Somkiat Kongkachat, and Narongchai Thodsaporn, “Synthesis and Design of Three- Phase PWM AC- AC Matrix Converter”, *TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference TENCON 2011*, 21-24 November 2011, Bali, Indonesia, pp.1020-1024.

[4] Prasopchok Hothongkham and Sataporn Suathed, “Simulation of Three-phase PWM AC-AC Matrix Converter without the DC-Link Testing with the Passive Loads and without input filter”, *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 24-27 May 2022, Prachuap Khiri Khan, Thailand.

[5] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics, Devices, Circuit, and Applications”, Fourth Edition, Pearson Education Limited. 2014.

[6] Fayssal Saidi, Elhadj Bounadja, and Abdelkadir Djahbar, 2023, “A comparative analysis of SVM, Venturini, and PWM with three intervals modulation techniques for the control of an AC/AC three-phase matrix converter”, *2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM 2023)*, Medea, Algeria, 28-29 November 2023.

[7] Jinqiu Song , Bin Duan, Xiangjie Li, Dongxiang Wan, Wenlong Ding, Chenghui Zhang, and Chunshui Du, 2022, “A Modified Space Vector Modulation for DC-Side Current Ripple Reduction in High-Frequency Link Matrix Converter”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol.8, No.4, December 2022.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การจำลองแบบเรียลไทม์กับวงจรแปลงผันแบบทบระดับ ขนาด 1.5 กิโลวัตต์

Using the Real Time Simulator with the 1.5 kW Boost Converter

นายวาฤทธิ์ ช่างประดับ นายนิโรธ ชื่นชม นางสาวอินทิรา คำพิมพ์ และ ธิระวรรธน์ สืบธนะวงษ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: thirawad.s@cit.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบเสมือนจริง (Hardware in the Loop, HIL) สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยเครื่องจำลองผลแบบเรียลไทม์ OPAL-RT รุ่น OP4510 ที่มีแบบจำลองวงจรแปลงผันแบบทบระดับ ขนาด 1.5 kW แรงดันด้านเข้าและออก 325 Vdc และ 400 Vdc ตามลำดับ เป็นภาควงจรกำลัง ที่มีคาบเวลาของการประมวลผลแบบจำลองที่ 4 µs โดยสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่อง OPAL-RT เป็นสัญญาณค่าแรงดัน ±16 Vdc ที่เสมือนค่าดังกล่าวผ่านชุดเซ็นเซอร์วัดแรงดันและกระแส จากภาควงจรกำลัง และรับสัญญาณอินพุตเข้าเครื่อง OPAL-RT เป็นสัญญาณการสับสวิตช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความถี่สับสวิตช์ 4 kHz ควบคุมแบบวงรอบปิด โดยจุดเด่นของการทดสอบเสมือนจริงคือระยะเวลาของผลตอบสนองระบบเป็นเวลาจริงที่ควบคุมผลตอบสนองด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

คำสำคัญ: จำลองผลแบบเรียลไทม์, วงจรทบระดับ

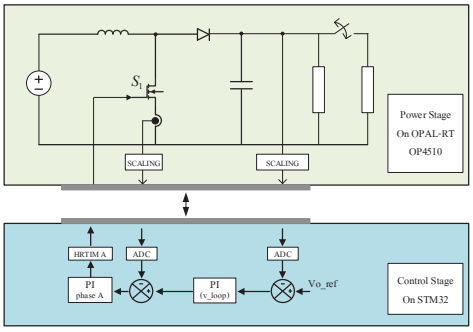
Abstract

This article presents a Hardware in the Loop (HIL) simulation for power electronics using the OPAL-RT OP4510 real-time simulation device, which features a 1.5 kW DC-DC boost converter model with input and output voltages of 325 Vdc and 400 Vdc, respectively, as a power stage with a computation processing time of 4 µs. The output signal from the OPAL-RT is a voltage signal of ±16 Vdc, emulating the values through a set of voltage and current measurement sensors from the power circuit, while the input signal to the OPAL-RT is a switching signal from a microcontroller operating at a switching frequency of 4 kHz in a closed-loop control configuration. The highlights of the virtual testing include real-time system response times controlled by the microcontroller.

Keywords: HIL, Boost Converter

1. บทนำ

หลักการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามแบบจำลอง (Model-Based Development) แยกระบบรวมทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่ม ภาควงจรควบคุม (Control model) คือ ส่วนที่เป็นกระบวนการควบคุม หรืออัลกอริทึม (algorithm) และภาควงจรกำลัง (Plant model) คือ แบบจำลองของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่รวมกันเป็นวงจร เช่น ตัวเหนี่ยวนำ สวิตช์ ไดโอด ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน เป็นต้น โดยทั้งสองส่วนมีการสื่อสารกันอย่างต่อเนื่องในลักษณะวงรอบหรือลูป (Close-Loop) เช่น การส่งข้อมูลแรงดันหรือกระแสจากภาคกำลังไปยังภาคควบคุม และการตอบสนองโดยการสั่งเปิด-ปิดสวิตช์จากภาคควบคุมกลับมายังภาคกำลัง และจุดเด่นของการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามแบบจำลองคือ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาและแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นและสามารถทดสอบซ้ำบนแบบจำลองได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถแบ่งลำดับขั้นของการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามแบบจำลอง ดังนี้ พัฒนาในระดับหลักการ (Model in the Loop, MIL) พัฒนาในระดับเสมือนซอฟต์แวร์ (Software in the Loop, SIL) พัฒนาในระดับใช้งานในโปรเซสเซอร์(Processor in the Loo, PIL) และพัฒนาในระดับทดสอบเสมือนจริง (Hardware in the Loop, HIL) เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ตามแบบจำลอง (Model-Based Development) ในการพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมมุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้งานร่วมกับ Hardware-in-the-Loop ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยืดหยุ่น



รูปที่ 1 ภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุมสำหรับการจำลองผลแบบเรียลไทม์

บทความวิจัยนี้นำเสนอการทดสอบเสมือนจริง (HIL) กำหนดให้วงจรทบระดับ ขนาด 1.5 kW แรงดันด้านเข้าและด้านออก 325 Vdc และ 400 Vdc ตามลำดับ เป็นภาควงจรกำลังที่ประมวลผลแบบเรียลไทม์ด้วยเครื่อง OPAL-RT รุ่น OP4510 โดยสัญญาณเอาต์พุตจากเครื่อง OPAL-RT เป็นสัญญาณค่าแรงดัน ±16 Vdc ที่เสมือนค่าดังกล่าวผ่านชุดเซ็นเซอร์แรงดันและกระแส จากภาควงจรกำลัง และรับสัญญาณอินพุตเข้าเครื่อง OPAL-RT เป็นสัญญาณการสับสวิตช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบแสดงในตารางที่ 1

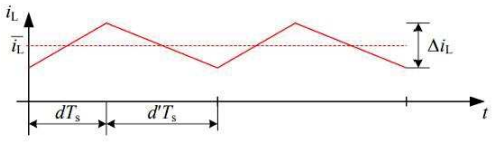
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

สัญลักษณ์	ขนาด	อธิบาย
v_{in}	220 Vac	แรงดันด้านเข้า
v_{out}	400 Vdc	แรงดันด้านออก
P_{out}	1.5 kW	กำลังไฟฟ้าด้านออก
f_{sw}	4 kHz	ความถี่สับสวิตช์
L_1	5 mH	ตัวเหนี่ยวนำ
C_{OUT}	1,800 µF	ตัวเก็บประจุ

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์และตัวควบคุม

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรทบระดับ

กระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์นำกระแส และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำขณะสวิตช์ไม่นำกระแสสามารถหาได้จากสมการที่ 1-2 เนื่องจากวิธีที่ใช้ในการควบคุมเป็นแบบโหมดการควบคุมกระแสเฉลี่ยจึงต้องหาค่ากระแสตัวเหนี่ยวนำเฉลี่ย หาได้จากสมการที่ 5 เพื่อนำค่ากระแสนี้ไปเข้าลูปการควบคุมกระแส [3-4] โดย V_s คือแรงดันอินพุต V_o คือแรงดันเอาต์พุต D คือดิวตี้ไซเคิล T คือคาบเวลาและ L คือตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2 กระแสที่ตัวเหนี่ยวนำในโหมดกระแสต่อเนื่อง

$$i_{L(ON)} = \frac{V_s DT}{L} \quad (1)$$

$$i_{L(OFF)} = \left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2)$$

$$P_{in} = P_{out} \quad (3)$$

$$V_{in} i_L = \frac{V^2_{out}}{R} \quad (4)$$

$$i_L = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 R} \quad (5)$$

2.2 การออกแบบตัวควบคุม

ออกแบบตัวควบคุมโดยการใช้โปแกรม MATLAB/sisotool สำหรับการออกแบบ ตัวควบคุม PI ของลูปกระแส และลูปแรงดัน โดยนำพลานต์ ของระบบ ออกแบบตัวควบคุมลูปกระแสและลูปแรงดัน เป็น Bandwidth = 357 Hz, Phase margin = 65.6° และ Bandwidth = 1 Hz, Phase margin = 32.3° ตามลำดับ เมื่อ

ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระแสตัวเหนี่ยวนำต่อคาบเวลานำกระแสและฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันด้านออกต่อกระแสโหลดแสดงตามสมการที่ (6) และ (7) [1-2] โดย L คือตัวเหนี่ยวนำ R คือตัวต้านทาน C คือตัวเก็บประจุและ S คือโดเมนความถี่

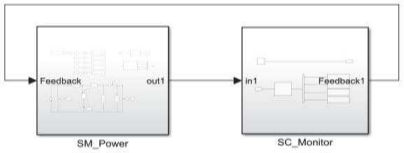
$$G_{id}(s) = \frac{V_c}{sL} \quad (6)$$

$$G_{load}(s) = \frac{R}{1+sRC} \quad (7)$$

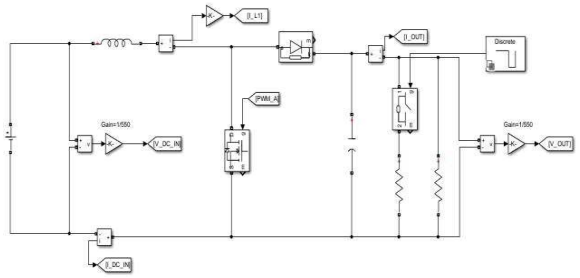
3. การทำงานของระบบจำลองผลแบบเรียลไทม์

หลักการสร้างแบบจำลองสำหรับงานทดสอบแบบเรียลไทม์นั้นพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และ โปรแกรม RT-LAB โดยต้องแยกออกเป็น 2 กลุ่มย่อย กลุ่มแบบจำลองที่สร้างเป็นภาควงจรกำลัง (SM_Power) เพื่อโหลดลงเครื่อง OPAL-RT ให้ทำงานแบบเรียลไทม์ และกลุ่มที่แสดงผล (SC_Monitor) เพื่อส่งค่ากลับมาแสดงผลในเครื่องคอมพิวเตอร์

ภายในบล็อก SM_Power เป็นวงจรกำลังของวงจรแปลงผันทบระดับขนาด 1.5 kW โดยกำหนดสัญญาณอินพุตแบบดิจิทัลสำหรับสัญญาณ PWM ของการสับสวิตช์ และสัญญาณการปลดต่อโหลดโดยรับเข้ามาจากภายนอกเครื่อง OPAL-RT และสัญญาณเอาต์พุตเป็นค่าแรงดันด้านเข้าและด้านออก กระแสด้านเข้าและด้านออก ตามลำดับ ที่ส่งออกจากเครื่อง OPAL-RT แสดงในรูปที่ 4



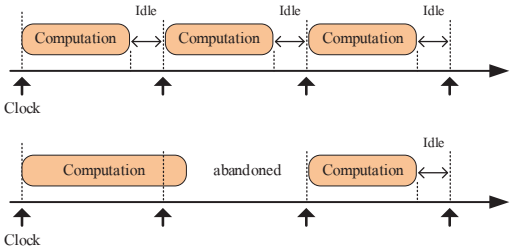
รูปที่ 3 บล็อก SM และ SC สำหรับแบบจำลองผลแบบเรียลไทม์



รูปที่ 4 แบบจำลองวงจรแปลงผันทบระดับแรงดันขนาด 1.5 kW

ส่วนภายในบล็อก SC_Monitor ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นส่วนของการเฝ้าดูค่าคาบเวลาของการประมวลผลในแต่ละจังหวะ Time step สมบูรณ์หรือไม่ มีหลักการทำงานงานแสดงดังในรูปที่ 5 อธิบายดังนี้ แบบจำลองที่อยู่ภายในเครื่อง OPAL-RT จะถูกสั่งให้คำนวณเป็นจังหวะ Time step หรือ Clock กรณีที่ 1 เมื่อการประมวลผลแบบจำลอง หรือ Computation time เสร็จก่อนจังหวะ Clock ถัดไป จะมีค่าส่วนต่างทางเวลา หรือ Idle time ซึ่งกรณีนี้ถือว่าการประมวลผลสมบูรณ์ แสดงในรูปที่ 5 (บน) และกรณีที่ 2 เวลาการประมวลผล หรือ Computation time เกินคาบเวลา กรณีนี้เกิด Over run และจะละเว้นไม่ประมวลผล (abandoned) ในคาบเวลาที่เกินนี้ แสดงในรูปที่ 5 (ล่าง) ในงานวิจัยนี้เลือกคาบเวลา (Time step) อยู่ที่ 4 µs เป็นคาบเวลาที่เล็กที่สุดที่สามารถทำได้โดยไม่เกิด Over run โดยแบบจำลองประมวลผลโดยใช้ CPU ภายในเครื่อง OPAL-RT หรือเรียก CPU-base และแสดงพารามิเตอร์ระหว่างการทดสอบในตารางที่ 2

กรณีต้องการให้คาบเวลาการประมวลผลเร็วขึ้น จำเป็นต้องเลือกสร้างแบบจำลองประมวลผลให้อยู่บน FPGA หรือ FPGA-base ที่อยู่ในเครื่อง OPAL-RT และจำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองด้วยโปรแกรม eHs ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่เพิ่มเติมในโปรแกรม MATLAB โดยเป็นโปรแกรมเฉพาะสำหรับสร้างแบบจำลองให้สามารถประมวลผลอยู่บน FPGA ได้



รูปที่ 5 เวลาการประมวลผลแบบจำลอง และคาบเวลา (Time step) (บน) ทำงานตรงจังหวะ (ล่าง) เกิดการข้ามจังหวะ Over run

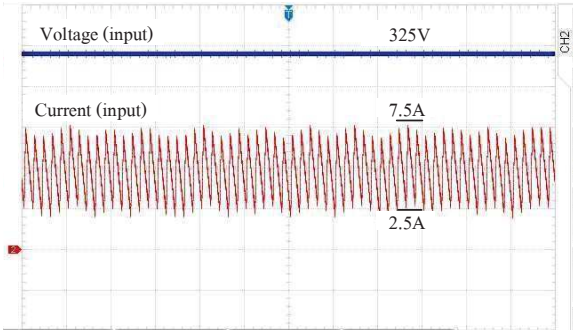
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ปรากฏระหว่างการทดสอบ

Model size	39877 Bytes
Microcontroller sampling per synchronize step	100 times
Real step size	3.999 %
Computation time	0.2449 %
Idle time	2.979 %

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบวงจรแปลงผันทบระดับแรงดันโดยการจำลองผลแบบเรียลไทม์ โดยวัดจริงด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป วัดสัญญาณแรงดันที่เป็นตัวแทนของ แรงดันด้านเข้า แรงดันด้านออก และกระแสด้านเข้าและกระแสด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 6 ที่โหลด 100% (1.5 kW) กระแสด้านเข้า $i_{in,\max}$ มีค่า = 7.5A และ $i_{in,\min}$ มีค่า = 2.5A และแรงดันด้านเข้า V_{in} = 325V

ผลตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีโดยในช่วงแรกทำการลดโหลดจาก 100% (1.5 kW) เป็น 50% (750 kW) และช่วงถัดมาเพิ่มโหลดจาก 50% เป็น 100% ช่วงแรกมี I_{out} = 4A และช่วงต่อมามี I_{out} = 2A แรงดันด้านออก V_{out} = 394.4 V มีค่า overshoot และ undershoot อยู่ที่ 10.3% แสดงในรูปที่ 7

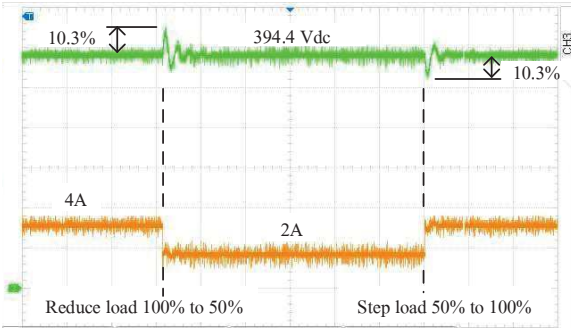


รูปที่ 6 (บน) แรงดันด้านเข้า V_{in} (ล่าง) กระแสไหลด้านเข้า i_{in} ขณะจ่ายโหลด 100%

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการทดสอบเสมือนจริง (Hardware in the Loop, HIL) สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยเครื่องจำลองผลแบบเรียลไทม์ OPAL-RT รุ่น OP4510 ที่มีแบบจำลองวงจรแปลงผันแบบทบระดับ ขนาด 1.5 kW เป็นภาควงจรกำลัง ที่มีคาบเวลาของการประมวลผล

แบบจำลองที่ 4 µs. และภาควงจรควบคุมประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ความถี่สับสวิตช์ 4 kHz ควบคุมแบบวงรอบปิด และทดสอบระบบขณะมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด



รูปที่ 7 ผลตอบสนอง ปลด-ต่อ โหลด (บน) แรงดันด้านออก V_{out} (ล่าง) กระแสด้านออก I_{out}

ผลการทดสอบสอดคล้องกับผลของการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจุดเด่นของการทดสอบนี้คือระยะเวลาของผลตอบสนองระบบ เป็นเวลาจริง ที่ควบคุมผ่านชุดประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และจุดด้อยคือเวลาของการประมวลผลแบบจำลองภายในเครื่อง OPAL-RT กรณีแบบจำลองอยู่บน CPU-base มีขีดจำกัด ไม่สอดคล้องกับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ความถี่สับสวิตช์สูงได้ โดยแนวทางแก้ไขคือต้องพัฒนาแบบจำลองของภาควงจรกำลังใหม่ ให้ทำงานอยู่บน FPGA-base เพื่อให้คาบเวลาของการประมวลผลแบบจำลองเร็วขึ้นอยู่ในระดับนาโนวินาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท พีทีเอส คอมบิเนชั่น จำกัด ที่ให้ความสนับสนุนเครื่อง OPAL-RT 4510 และการอบรม ให้ความรู้การใช้งานพื้นฐานสำหรับการจำลองผลแบบเรียลไทม์

เอกสารอ้างอิง

[1] Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Petzoldt. Digital Control for Interleaved Boost Power Factor Correction (PFC) Rectifiers. approved dissertation from Dipl.-Ing. Tobias Grote. Day of the oral exam: April 11, 2014

[2] M.M. Jovanovic: Digital Control of Power Converters, Training material by DELTA Power Electronics R&D Laboratory, Soest, Germany, March 2012.

[3] OPAL-RT Technologies. (n.d.). *OPAL-RT user documentation*. OPAL-RT. Online: https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PODLP/overview

[4] รัฐภัทร จิตต์ภาคภูมิ และ ศุภกร วัดรอบ. (2566). วงจรแปลงผันทบระดับแรงดันสำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่ควบคุมกระแสที่ในโหมดกระแสเฉลี่ย.ใน *ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[5] เกรียงไกร แซ่ตัง และสมาชิก. (2566). วงจรทบระดับชนิดแก้ไขตัวประกอบกำลังแบบอินเตอร์ลีฟ โดยใช้ MATLAB และพัฒนาบนบอร์ด dsPIC33. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 (น.165-168)*. มหาวิทยาลัยนครพนม.



นายวาฤทธิ์ ช่างประดับ สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า), 2568 จากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



นายนิโรธ ชื่นชม สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า), 2568 จากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



นางสาวอินทิรา คำพิมพ์ สำเร็จการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า), 2568 จากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ธิระวรรธน์ สืบธนะวงษ์ สำเร็จการศึกษา ปร.ด (ไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ งานวิจัยด้านโมเดลเบสสำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส

Capacitorless Single-Phase Induction Motor Drive Using Two-Phase Voltage Source Inverter

ศักดาวุฒิ บุญตั้ว[*1], กัลยรัตน์ ใจชื่น[2], วรพล อินทร์แปลง[2], ณัฐพงศ์ แสงสูงเนิน[2], ชาคริต วินิจธรรม[2] และ ประหยัด กองสุข[2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ [2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี 131 หมู่ 10 ถนนบำราศนราดูร ต.พลวง อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี 22210

E-mail: sakdawut_bo@rmutto.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุ เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์สเปซเวกเตอร์แบบคลื่นพาห์สองเฟสสำหรับอินเวอร์เตอร์สามกิ่งถูกนำมาใช้ในงานวิจัย ระบบที่นำเสนอสามารถควบคุมอินเวอร์เตอร์ให้จ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟสสำหรับชุดขดลวดหลักและขดลวดช่วยได้ มากกว่านั้นสามารถกำหนดอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าของทั้งสองขดลวดที่มีค่าอิมพิแดนซ์ไม่เท่ากันได้ งานวิจัยที่นำเสนอได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/simulink และทดสอบจริงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D เพื่อประมวลผลการขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาด 0.5 แรงม้า จากผลการทดสอบจริงพบว่า ระบบสามารถทำงานได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด สามารถยืนยันความถูกต้องของระบบที่นำเสนอได้

คำสำคัญ: มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสองเฟส, อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส, การมอดูเลตคลื่นพาห์แบบสเปซเวกเตอร์สองเฟส

Abstract

This paper proposed the capacitorless single-phase induction motor drive. The two-phase carries-based space vector technique for the three-legs inverter is applied in this research. This proposed system can control the inverter which is achieved with the two-phase voltage of main winding and auxiliary winding. Moreover, it can be defined that the voltage ratio of both windings unsymmetrically impedances. This proposed research was simulated using MATLAB/simulink program and implemented based on TMS320F28379D microcontroller to drive the motor rated 0.5 HP. The experimental results found that the proposed system can operate under defined conditions that can be confirmed the correctness of proposed systems.

Keywords: Two-phase induction motor, Two-phase voltage source inverter, carries-based space vector pulse width modulation

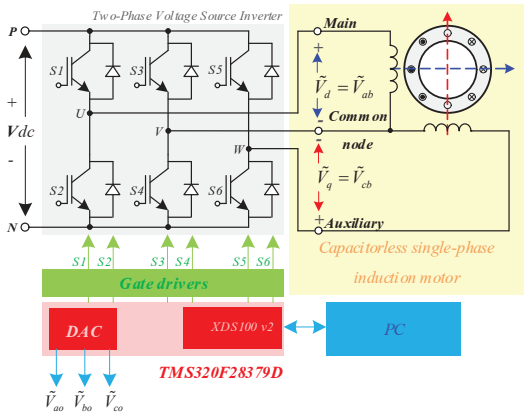
1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบตัวเก็บประจุ (Capacitor single-phase induction motor; CS-SPIM) เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย มีแรงบิดช่วงเริ่มต้นหมุนราว 2-3 เท่า[1] แต่ยังมีข้อด้อยเรื่องประสิทธิภาพต่ำ และกระแสไฟฟ้าใช้งานสภาวะคงตัวมีค่าสูง เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่พิกัดกำลังทางกลเท่ากัน

โครงสร้างของ CS-SPIM ประกอบด้วย ชุดขดลวดหลัก (Main winding) และขดลวดช่วย (Auxiliary winding) ซึ่งถูกออกแบบติดตั้งให้ทำมุมตั้งฉากกัน กระแสของขดลวดช่วยทำมุมนำหน้าขดลวดหลักที่ 90 องศา และมีตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่ออนุกรมในวงรอบขดลวดช่วย ทำหน้าที่ช่วยในการเริ่มต้นหมุน การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสมนั้น สามารถสร้างรูปแบบสนามแม่เหล็กหมุนตั้งฉากของขดลวดช่วยเพื่อให้แรงบิดสูงสุดกับมอเตอร์ได้[1] เมื่อมอเตอร์ใช้งานกับระบบไฟฟ้าหลัก แต่ในกรณีที่ต้องการใช้งานร่วมกับแหล่งพลังงานทดแทน อย่างเช่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ต้องมีวงจรอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงผันกำลัง เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าให้สามารถทำงานได้

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสสามารถทำได้ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าหนึ่งเฟสผ่านอินเวอร์เตอร์ประเภทออฟกริด วิธีการดังกล่าวไม่มีการควบคุมแรงบิดและเพิ่มประสิทธิภาพได้ อีกวิธีคือการขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์สองเฟส ซึ่งเป็นการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดของมอเตอร์ สามารถเพิ่มแรงบิดและประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้[2]

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการสวิตช์บนพื้นฐานของเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบคลื่นพาห์ ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ปั๊มน้ำเพื่อเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสเดิม ให้สามารถใช้งานกับแหล่งพลังงานทดแทน หรือในพื้นที่ที่ระบบไฟฟ้าหลักไม่สามารถเข้าถึงได้ เป็นแบบการประยุกต์ใช้งานภาคเกษตรกรรม และเป็นการสร้างนวัตกรรมเทคโนโลยีเพื่อการวิจัยมาพัฒนาท้องถิ่นส่งเสริมเศรษฐกิจสู่ชุมชนได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุด้วยอินเวอร์เตอร์ชนิดจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส

2. การออกแบบระบบที่นำเสนอ

2.1 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุ

ในงานวิจัยได้เลือกใช้ปั๊มน้ำชนิดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบคาปาซิเตอร์รันมาทำการออกแบบนำตัวเก็บประจุที่ต่อร่วมในวงรอบขดลวดช่วยออก และทำการต่อจุดร่วม (common node) ทำหน้าที่เป็นศักย์ไฟฟ้าศูนย์ของขดลวด วิธีการนี้อินเวอร์เตอร์สามกิ่งสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วยโดยตรงได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 และสามารถควบคุมขนาดและทิศทางของแรงดันไฟฟ้าของขดลวดได้ ส่งผลให้สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ [1][2][3]

2.2 เทคนิคการควบคุมการมอดูเลตความกว้างพัลส์สเปซเวกเตอร์แบบคลื่นพาห์

สัญญาณคลื่นไซน์อ้างอิงเฟส v_{ar} v_{br} และ v_{cr} ถูกออกแบบให้ควบคุมการสวิตช์แรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์กิ่ง U V และ W ตามลำดับ งานวิจัยออกแบบให้กิ่ง V เป็นจุดต่อร่วมศูนย์ และให้กิ่ง U และ W ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสที่ขดลวดหลักและขดลวดช่วย ตามลำดับ จาก [2][3][4] สมการสัญญาณอ้างอิงของระบบ ดังสมการที่ (1) (2) และ (3)

$$v_{ar} = V_o \sin(\omega t) = m_a V_{dc} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$v_{br} = V_o \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = m_a V_{dc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$v_{cr} = V_o \sin(\omega t - \pi) = m_a V_{dc} \sin(\omega t - \pi) \quad (3)$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันใช้งานเอาต์พุต (Output rms voltage) V_{dc} คือ แรงดันไฟตรงอินพุต m_a คือ ดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) เป็นอัตราส่วนค่ายอดคลื่นไซน์ต่อค่ายอดคลื่นพาห์ มีค่าอยู่ในช่วง 0-1

พื้นฐานวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์แบบคลื่นพาห์เทคนิคนี้ใช้ค่าแรงดันวัฏจักรศูนย์ (Zero sequence Voltage; v_z) สมการที่ (4) เข้ามาลบกับสัญญาณคลื่นไซน์อ้างอิง ดังสมการที่ (5) (6) และ (7)

$$v_z = \frac{\max(v_{ar}, v_{br}, v_{cr}) + \min(v_{ar}, v_{br}, v_{cr})}{2} \quad (4)$$

สัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์สเปกเวกเตอร์แบบคลื่นพาห์ โดยที่คลื่นสัญญาณแสดงในรูปที่ 4 (ก)

$$v_{ao} = v_{ar} - v_z = m_a V_{dc} \sin(\omega t) - v_z \quad (5)$$

$$v_{bo} = v_{br} - v_z = m_a V_{dc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - v_z \quad (6)$$

$$v_{co} = v_{cr} - v_z = m_a V_{dc} \sin(\omega t - \pi) - v_z \quad (7)$$

แรงดันเฟสเอาท์พุตระหว่างกิ่ง U-V และ W-V คำนวณได้จากดังสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ แรงดันระหว่างกิ่ง U-V เท่ากับ

$$V_{UV} = V_{abo} = V_{ao} - V_{bo} = m_a V_{dc} \sin(\omega t) - m_a V_{dc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_{UV} = V_{abo} = \overbrace{m_a \sqrt{2} V_{dc}}^{Amplitude} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right) \quad (8)$$

แรงดันระหว่างกิ่ง W-V เท่ากับ

$$V_{WV} = V_{cbo} = V_{co} - V_{bo} = m V_{dc} \sin(\omega t - \pi) - m V_{dc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_{WV} = V_{cbo} = \overbrace{m_a \sqrt{2} V_{dc}}^{Amplitude} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \quad (9)$$

2.3 อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟสแบบไม่สมมาตร

ในเงื่อนไขที่ต้องการควบคุมแรงดันของแต่ละชุดขดลวดแบบไม่สมมาตร [2][3][4][5] เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าฯ ทำงานได้ตามคุณลักษณะสามารถทำได้โดยการปรับมุมกำลัง (δ) ดังสมการที่ (10)

$$V_{br*} = V_o \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) = m_a V_{dc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \delta\right) \quad (10)$$

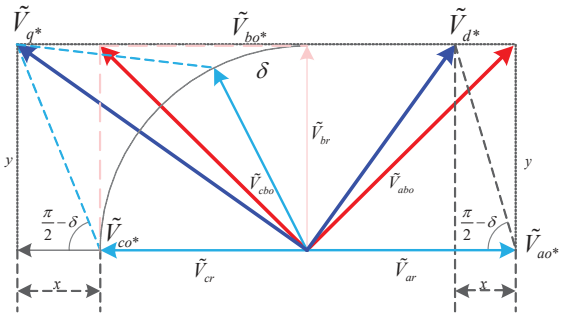
จะได้ สมการแรงดันระหว่างกิ่ง U-V ดังสมการที่ (11)

$$V_{d*} = V_{ab*} = \overbrace{m_a \sqrt{2} V_{dc} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)}^{Amplitude} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \quad (11)$$

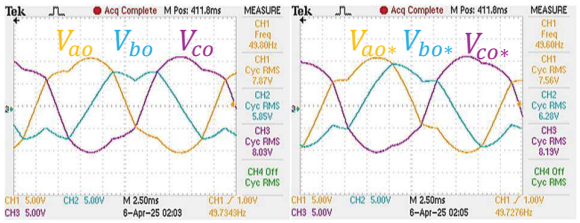
สมการแรงดันระหว่างกิ่ง W-V ดังสมการที่ (12)

$$V_{q*} = V_{cb*} = \overbrace{m_a \sqrt{2} V_{dc} \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\delta}{2}\right)}^{Amplitude} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right) \quad (12)$$

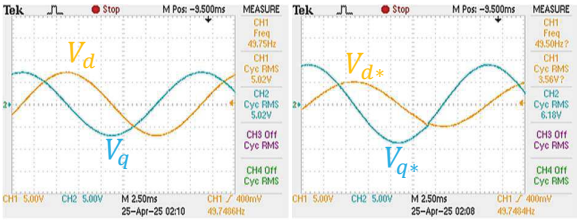
จากสมการข้างต้น นำมาเขียนเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรม ได้ดังรูปที่ 2 เส้นสีแดงแสดงถึงเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าสองเฟสแบบสมมาตร ตามสมการ (5) (6) และ (7) และเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงเฟสเซอร์แรงดันไฟฟ้าสองเฟสแบบไม่สมมาตร ตามสมการ (10) (11) และ (12)



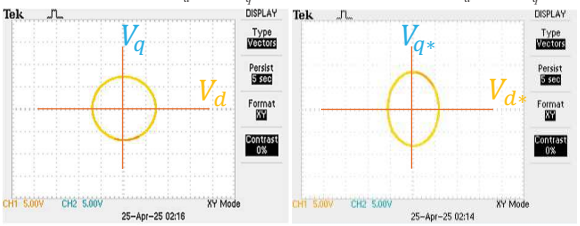
รูปที่ 3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันไฟฟ้าสองเฟส



ก. มุม $\delta = 0$ องศา ข. มุม $\delta = 40$ องศา



ค. แรงดันไฟฟ้า V_d และ V_q ง. แรงดันไฟฟ้า V_{d*} และ V_{q*}



จ. แรงดันไฟฟ้าแบบสมมาตร ฉ. แรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร

รูปที่ 4 สัญญาณอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสองเฟส

การปรับค่ามุม δ ที่เฟส B ส่งผลต่อแรงดันรวมทางเวกเตอร์ของขดลวดหลักและขดลวดช่วยที่เปลี่ยนแปลง เมื่อค่ามุมเป็นบวก $+\delta$ แรงดันขดลวดช่วยในแนวแกนคิว V_{q*} มีค่าสูงขึ้น แต่แรงดันขดลวดหลักในแนวแกนดี V_{d*} มีค่าลดลง คำนวณอัตราส่วนรอบราว 1.73 ดังรูปที่ 3

การทดสอบหาอัตราส่วนรอบ (Turn ratio; a) ของมอเตอร์ [4] เท่ากับ 1.478 ในงานวิจัยได้ทดลองปรับมุมกำลัง (δ) เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของขดลวดช่วยมีค่าตามความสัมพันธ์อัตราส่วนรอบกับขดลวดหลัก โดยผลรวมขนาดพิกัดของแรงดันทั้งสองขดลวดจะแสดงถึงพิกัดแรงดันไฟตรงอินพุตขั้นต่ำสำหรับระบบขับเคลื่อนที่นำเสนอ[4] [5]

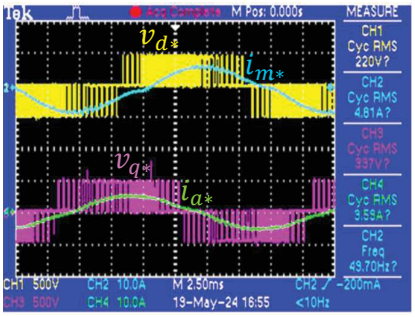
3. ผลการทดสอบการเริ่มเดินของมอเตอร์ที่นำเสนอ

ตารางที่ 1 ข้อมูลแผ่นป้ายของ Mitsubishi Electric รุ่น WCH-375S

พิกัดกำลังไฟฟ้า	: 0.37 kW	พิกัดแรงดัน	: 220 V
พิกัดความถี่	: 50 Hz	พิกัดกระแส	: 3.1 A
พิกัดความเร็ว	: 2900 rpm	จำนวนขั้วแม่เหล็ก	: 2 Pole

ค่าพิกัดของ CS-SPIM ตามที่ผู้ผลิตกำหนดแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการต่อวัดค่าทางไฟฟ้าขณะใช้งานในสภาวะการทดสอบจริงของระบบขับเคลื่อนที่นำเสนอ

จากรูปที่ 5 สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะทำงานในสภาวะคงตัว ที่มีการปรับมุม $\delta = 30$ องศา แรงดันไฟฟ้าของขดลวดหลัก (v_{d*}) เท่ากับ 220V ตามพิกัดผู้ผลิต แรงดันขดลวดช่วย (v_{q*}) เท่ากับ 377V จากขนาดของแรงดันเมื่อนำมาคำนวณอัตราส่วนรอบได้ผลลัทธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ทดสอบได้ และค่ากระแสไฟฟ้าของขดลวดหลัก (i_{m*}) และขดลวดช่วย (i_{a*}) มีค่าเท่ากับ 4.81A และ 3.59A ตามลำดับ



$v_{d*} = 500V/div, i_m = 10A/div, v_{q*} = 500V/div, i_a = 10A/div, Time = 2.5ms/div$

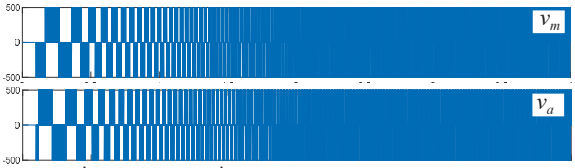
รูปที่ 5 แรงดันและกระแสไฟฟ้าของชุดขดลวดหลักและขดลวดช่วย กรณีแรงดันไฟฟ้าสองเฟสแบบไม่สมมาตร ที่มุม δ เท่ากับ 30 องศา

มากกว่านั้น ได้ทำการทดสอบการเริ่มเดินแบบ Soft starting เปนียบเทียบภายใต้เงื่อนไขการเริ่มเดินทั้งแบบแรงดันสมมาตรและไม่สมมาตร เทคนิคดังกล่าวได้กำหนดใช้วิธีการแรงดันต่อความถี่แบบคงที่ (v/f) กำหนดค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้าโดยใช้วิธีการแบบ Look-up table

ในการทดลองผู้วิจัยได้ทำการวัดค่าทางไฟฟ้าของมอเตอร์ โดยใช้ออสซิลโลสโคป YOKOGAWA รุ่น DLM2003 บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ข้อมูล .csv เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการอัลกอริทึมเพื่อหาความเร็วรอบและแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการประมาณค่า (Estimated Rotor speed & Electromagnetic torque; ω_{est} &T_{est}) ผ่านโปรแกรม MATLAB โดยทำการ import ไฟล์ .csv จัดเก็บในบล็อก to workspace และอ่านข้อมูลกลับเข้ามาในแบบจำลองของ Simulink เพื่อประมวลผลคำนวณ (Complier) และพล็อตสัญญาณผ่าน property editor [2][5]

การกำหนดเงื่อนไขการเริ่มต้นหมุนแบบ soft starting ออกแบบเริ่มหมุนที่ความถี่ต่ำ 5Hz จนถึง 50Hz ในช่วงเวลา 2 วินาที กำหนดค่าแรงดันไฟตรง 450V โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ดังนี้

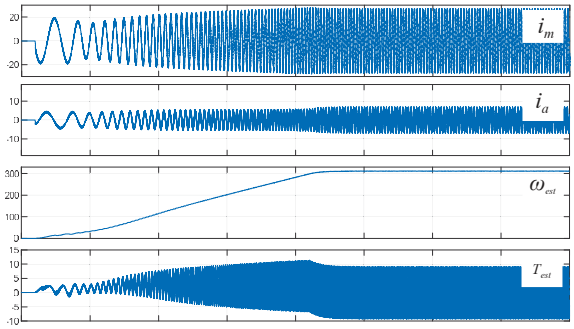
แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ ที่วัดได้จากขดลวดหลักและขดลวดช่วย พบว่าเป็นลักษณะรูปแบบยูนิโพล่าร์ ซึ่งการทดลองทั้ง 2 เงื่อนไข พบลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดหลัก (V_m) และขดลวดช่วย (V_a)

ก. การเริ่มต้นหมุนด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าแบบสมมาตร

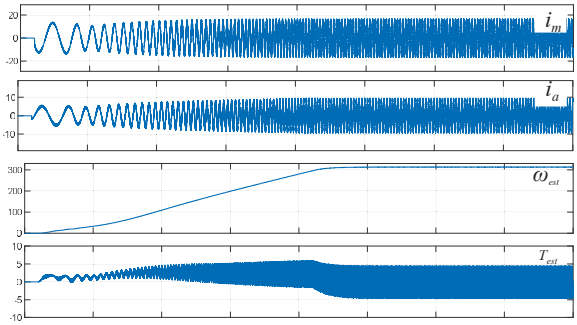
ในกรณีนี้ได้กำหนดค่ามุม $\delta = 0$ องศา แสดงพฤติกรรมการเริ่มต้นหมุนได้ ดังรูปที่ 7 (ก.)



ก. กระแสขดลวดหลัก ขดลวดช่วย ความเร็วเชิงมุม และแรงบิด

ข. การเริ่มต้นหมุนด้วยเทคนิคแรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร

ในกรณีนี้ได้กำหนดค่ามุม $\delta = 30$ องศา แสดงพฤติกรรมการเริ่มต้นหมุนได้ ดังรูปที่ 7 (ข.)



ข. กระแสขดลวดหลัก ขดลวดช่วย ความเร็วเชิงมุม และแรงบิด

รูปที่ 7 สัญญาณทางไฟฟ้าขณะเริ่มต้นหมุนของระบบที่นำเสนอ

4. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอถึงหลักการการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบไร้ตัวเก็บประจุ ในงานวิจัยได้แสดงผลลัพธ์การออกแบบผ่านการวัดสัญญาณอ้างอิงตามสมการที่ใช้ออกแบบ ซึ่งจากสมการที่นำมาใช้ในการออกแบบ พบว่าการปรับค่ามุมเฟสที่สัญญาณอ้างอิง v_{bo^*} สามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดของมอเตอร์ได้ โดยเมื่อเพิ่มค่ามุมมากขึ้นผลรวมทางเวกเตอร์ของแรงดันขดลวดช่วยจะมีค่าสูงขึ้น สามารถประยุกต์ในการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าตามค่าอัตราส่วนรอบที่เหมาะสมได้ มากกว่านั้น จากผลการทดสอบจริงได้ยืนยันความถูกต้องของระบบที่ออกแบบผ่านการทดลองด้วยวิธีการเริ่มต้นหมุนแบบ soft starting บนพื้นฐานเทคนิคแบบแรงดันต่อความถี่ อย่างไรก็ตาม ระบบที่นำเสนอมีข้อเสียเรื่องของพิกัดใช้งานของแรงดันไฟตรงอินพุตที่ขนาดมากสูง ในการออกแบบเลือกใช้แหล่งจ่ายอาจจะต้องพิจารณาความเหมาะสมและความปลอดภัย สำหรับการพัฒนาหรือการประยุกต์ใช้งานร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อลดปัญหาแหล่งจ่ายไฟตรง ซึ่งแผงเซลล์สามารถต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าในระดับที่เหมาะสมต่อระบบ วิธีดังกล่าวจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับมอเตอร์ปั๊มน้ำในภาคเกษตรกรรมที่พื้นที่ระบบไฟฟ้าหลักยังไม่สามารถเข้าถึงได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Chapman, Stephen J. (2012). Electric Machinery Fundamentals. New York: McGraw-Hill.

[2] C. Charumit and V. Kinnares, "Analogue space vector modulator for two-phase loads using a three-leg voltage source inverter," 2008 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, 2009, pp. 1607-1612, doi: 10.1109/ROBIO.2009.4913241.

[3] Y. Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn and V. Kinnares, "A Carrier-Based Unbalanced PWM Method for Four-Leg Voltage Source Inverter Fed Unsymmetrical Two-Phase Induction Motor," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 5, pp. 2031-2041, May 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2228138.

[4] ศิริชัย แดงเอม มนฑล นาวงษ์ สมชาย เบียนสูงเนิน ณฐภัทร พันธ์คง และ วิจิตร กิณเรศ. (2566). อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามกิ่งสำหรับขับคอมเพรสเซอร์ลูกสูบแบบปิดของตู้เย็น. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15* (น.229-232). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร.

[5] ประหยัด กองสุข. "การวิเคราะห์สมรรถนะมอเตอร์เหนี่ยวนำสองเฟสแบบไม่สมมาตรเมื่อขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันสามกิ่งโดยอาศัยขั้นตอนวิธีเชิงพันธกรรมสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2562.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาการปรับกำลังไฟฟ้าของวงจรควอไซเรโซแนนซ์ สำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ

STUDY OF POWER ADJUSTMENT IN A QUASI-RESONANCE CIRCUIT FOR METAL FORMING APPLICATIONS

พินิจ บุญหล้า[1] , สายชล ชุดเจือจีน[2],ณัฐภัทร พันธ์คง[3] และอภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์[4]
[1,2,4]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชคลมงกรุงเทพเลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 โทรศัพท์ 0-2287-9600 ต่อ 2105
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทรศัพท์ 0-2549-3400
Pinit.b@mail.rmutk.ac.th[1], saichol.c@mail.rmutk.ac.th[2], nathabhat.p@en.rmutt.ac.th[3]Apirach.r@mail.rmutk.ac.th[4]

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมการปรับกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตของวงจรควอไซเรโซแนนซ์ (Quasi-Resonance Converter) ซึ่งประยุกต์ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำสำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ โดยมีเป้าหมายเพื่อทดแทนวิธีการดั้งเดิมอย่างการใช้หม้อแปลงปรับแรงดันหรือวาริแอค ด้วยระบบควบคุมแบบดิจิทัลที่แม่นยำและตอบสนองได้รวดเร็ว ผ่านการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโมดูลควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Dimmer) และจำลองผลด้วยโปรแกรม PSIM เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลเชิงแรงดัน กระแส และการเรโซแนนซ์ของระบบที่ระดับการจ่ายกำลังไฟฟ้าต่างกัน (30%, 50%, 70%) ทดลองที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 1.5 กิโลวัตต์ ผลการทดลองพบว่ามีผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันและสามารถควบคุมอินพุตได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้แรงดันต้นทางจะคงที่ โดยการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ความแม่นยำและยืดหยุ่นสูงกว่า ลดการสูญเสีย และเหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิความร้อนอย่างแม่นยำในระยะเวลาสั้นๆ

คำสำคัญ: การปรับกำลังไฟฟ้า, วงจรควอไซเรโซแนนซ์, การทุบขึ้นรูปโลหะ

Abstract

This paper aims to study the input power control of a Quasi-Resonance Converter applied in induction heating processes for metal forging. The focus is on replacing conventional methods such as variable transformers or variacs with a more precise and responsive digital control system. The proposed approach utilizes a microcontroller in conjunction with an AC dimmer module and compares its performance with circuit simulations conducted in the PSIM program. The investigation analyzes voltage, current, and resonant behavior under different power delivery levels (30%, 50%, 70%). Tested at a rated power of 1.5 kilowatts. The results indicate that both the simulation and the microcontroller-based implementation yield consistent outcomes and effectively regulate input power, even with a constant input voltage. The microcontroller-based control demonstrates superior precision, flexibility, and reduced power loss compared to traditional methods, making it highly suitable for industrial applications that require rapid and accurate thermal energy control.

Keywords: Power Regulation. , Quasi-Resonance Converter. , Metal Forging.

1. บทนำ

ในกระบวนการทุบขึ้นรูปโลหะ การให้ความร้อนโลหะด้วยวิธีการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (Induction Heating) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากให้ความร้อนเร็ว ควบคุมง่าย และมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ขดลวดเหนี่ยวนำอย่างแม่นยำจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งวงจรควอไซเรโซแนนซ์ (Quasi-Resonance Converter) เป็นวงจรที่เหมาะสมในการควบคุมกำลังไฟฟ้า เพราะสามารถทำงานแบบ Soft Switching สามารถลดการสูญเสียพลังงานและปรับกำลังไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว

ในปัจจุบัน ยังมีการใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ปรับแรงดันแบบแมนนวลที่มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพและการควบคุม บทความนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้วงจรควอไซเรโซแนนซ์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าแทนหม้อแปลงปรับแรงดัน โดยจำลองและวิเคราะห์สัญญาณของแรงดัน กระแส และกำลังที่จ่ายเข้าสู่โหลด เพื่อประเมินศักยภาพของวงจรดังกล่าวในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมงานทุบขึ้นรูปโลหะ

2. ทฤษฎี

2.1 วงจรควอไซเรโซแนนซ์

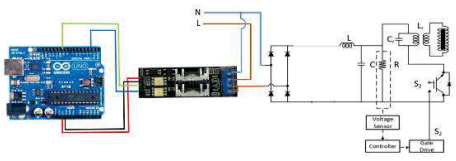
วงจรควอไซเรโซแนนซ์เป็นวงจรที่พัฒนาจากหลักการของอินเวอร์เตอร์คลาสอี โดยอาศัยหลักการเรโซแนนซ์เพื่อช่วยลดพลังงานสูญเสียจากการสวิตชิ่ง และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน วงจรนี้ออกแบบมาเพื่อใช้ร่วมกับเทคนิค Soft Switching ซึ่งประกอบด้วย Zero Voltage Switching (ZVS) ที่ช่วยให้แรงดันตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์ก่อนเปิดใช้งาน และ Zero Current Switching (ZCS) ที่ช่วยให้กระแสเป็นศูนย์ก่อนปิดสวิตช์ ซึ่งช่วยลดพลังงานสูญเสียจากการสวิตชิ่ง ซึ่งช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากการสวิตชิ่ง (Switching Loss) และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (EMI) ในวงจรควอไซเรโซแนนซ์ ขดลวดเหนี่ยวนำมีขนาดเพียงพอที่จะรักษากระแสจากแหล่งจ่ายให้อยู่ในรูปของอินพุตกระแสตรง (Input DC Current, Iin) ขณะที่วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำกว่าความถี่สวิตชิ่ง (fr < f) ทำให้วงจรทำหน้าที่เป็นโหลดอินดักทีฟ เมื่อสวิตช์เปิด กระแสจะไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำและโหลดเป็นกระแสซายน์ที่ถูกควบคุมโดยวงจรเรโซแนนซ์ เมื่อสวิตช์ปิดกระแสจะไหลผ่านตัวเก็บประจุต่อขนาน (C1) ทำให้เกิดการสลับของกำลังไฟฟ้าระหว่างองค์ประกอบของวงจร โดยกระแสสวิตช์ (IS) และกระแสตัวเก็บประจุต่อขนาน (IC1) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสัญญาณซายน์ที่มีเฟสต่างกัน 180°

2.2 หลักการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ

การเหนี่ยวนำความร้อนเป็นวิธีให้ความร้อนกับวัสดุนำไฟฟ้าโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรงและไม่ต้องใช้เชื้อเพลิง โดยอาศัยการไหลวนของกระแส (Eddy Current) ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กสลับในขดลวด ซึ่งทำให้เกิดความร้อนในวัสดุนำไฟฟ้า ปัจจุบันได้นำหลักการนี้มาใช้ในเตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace) ที่มีการทำงานคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขดลวดปฐมภูมิสร้างสนามแม่เหล็กให้เหนี่ยวนำกระแสในชิ้นงาน ซึ่งทำหน้าที่เสมือนขดลวดทุติยภูมิแบบลัดวงจร ทำให้เกิดความร้อนในตัวชิ้นงาน

3.การออกแบบและหลักการทำงาน

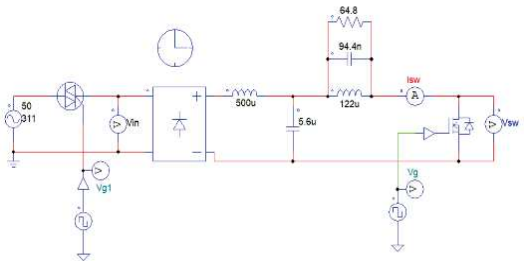
3.1 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมปรับกำลังไฟฟ้าด้านอินพุตของวงจรควอไซเรโซแนนซ์สำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการเชื่อมต่อ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3

จากรูปที่ 1 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 กับโมดูลควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ AC Dimmer ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC 220V) ที่จ่ายเข้าสู่วงจรควอไซเรโซแนนซ์สำหรับงานทุบขึ้นรูปโลหะ โดยการทำงานเริ่มจาก Arduino UNO ทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมหลักที่ส่งสัญญาณ PWM หรือสัญญาณควบคุมแบบ Phase Angle ไปยังโมดูล AC Dimmer ซึ่งใช้ไตรแอก (TRIAC) ร่วมกับโฟโตไตรแอก (Opto-Triac) เพื่อควบคุมการนำกระแสไฟในแต่ละครึ่งไซเคิลของสัญญาณ AC เมื่อ Arduino สั่งลดระดับไฟ โดยปรับค่าความกว้างของ Pulse หรือมุมเฟสที่กระแสนำ โมดูลจึงปรับแรงดันเฉลี่ยของ AC ที่จ่ายเข้าสู่วงจรควอไซเรโซแนนซ์ได้ตามต้องการ ซึ่งการควบคุมด้วยวิธีการนี้ช่วยทำให้สามารถปรับเพิ่มหรือลดกำลังไฟฟ้าอินพุตที่จ่ายให้กับวงจรได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสำคัญอย่างยิ่งในงานทุบขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากวงจรควอไซเรโซแนนท์ (Quasi-Resonance Converter) ต้องการแรงดันที่ปรับค่าได้ตามลักษณะของโหลดและความถี่ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ยังมีวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสร่วมด้วยในระบบเพื่อส่งข้อมูลกลับไปยัง Arduino สำหรับการควบคุมแบบปิด (Closed-loop control) ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อโหลดที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพสูง การทำงานระหว่างการควบคุมแบบดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และวงจร AC Dimmer จึงมีบทบาทสำคัญต่อการจัดการกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพในระบบการเหนี่ยวนำความร้อนโลหะสำหรับงานอุตสาหกรรม

ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองวงจรควอไซเรโซแนนซ์ โดยการออกแบบวงจรจะประกอบด้วย วงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และอุปกรณ์สวิตชิ่งชนิด MOSFET ที่ควบคุมด้วยสัญญาณ PWM ภายใต้หลักการ Soft Switching แบบ Zero Voltage Switching (ZVS) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปรับกำลังไฟฟ้า จุดสังเกตในการจำลองเน้นที่ลักษณะสัญญาณของแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่โหลดเหนี่ยวนำซึ่งจำลองเป็นขดลวดให้ความร้อน ทำการปรับความถี่ของสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น

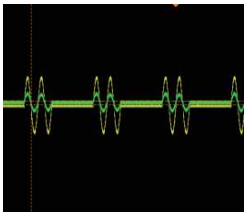


รูปที่ 2 วงจรควอไซเรโซแนนซ์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM

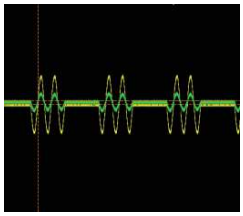
จากรูปที่ 2 วงจรควอไซเรโซแนนซ์ที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับความถี่ 50 Hz และแอมพลิจูด 311 V ซึ่งถูกส่งผ่านวงจรเรียงกระแสแบบฟูลบริดจ์เพื่อแปลงเป็นแรงดันกระแสตรง จากนั้นจะถูกส่งผ่านอินดักเตอร์ขนาด 500 μH ไปยังวงจรเรโซแนนซ์ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุขนาด 5.6 μF และวงจรอนุกรม RLC ที่มีค่าความต้านทาน 64.8 Ω ตัวเก็บประจุ 94.4 nF และตัวเหนี่ยวนำ 122 μH ทำหน้าที่เป็นโหลดเหนี่ยวนำจำลองการให้ความร้อน ส่วนการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะใช้ MOSFET เป็นสวิตช์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณ PWM จากแหล่งจ่ายควบคุม Vg ซึ่งเมื่อทำงานร่วมกับหลักการ Zero Voltage Switching (ZVS) จะช่วยลดความสูญเสียจากการสวิตชิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังติดตั้งเครื่องมือวัดแรงดันและกระแสในจุดสำคัญ ได้แก่ V_{in}, V_{sw} และ I_{sw} เพื่อสังเกตุการทำงานของระบบระหว่างการทดลองและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการปรับค่าความถี่ของ PWM ที่ระดับต่าง ๆ

4.ผลการทดลอง

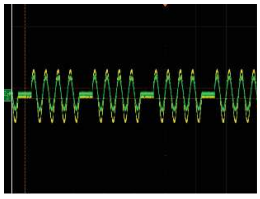
4.1 การทดลองปรับกำลังไฟฟ้าด้วยไมโครคอลโทรลเลอร์



(ก)ที่กำลังไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์



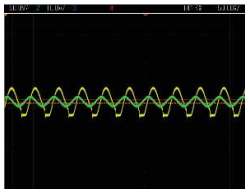
(ข)ที่กำลังไฟฟ้า 50 เปอร์เซ็นต์



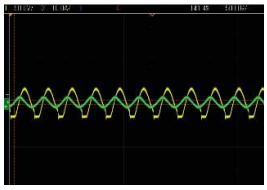
(ค)ที่กำลังไฟฟ้า 80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 2 แรงดันอินพุต V_{in} และกระแสอินพุต I_{in} ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

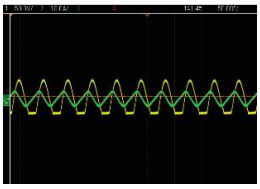
จากรูปที่ 2 กราฟแรงดันทั้ง 3 พบว่าการควบคุมมุมเฟสของแรงดัน AC 220V ด้วย Arduino และ AC Dimmer สามารถปรับระดับกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายเข้าสู่วงจรควอไซเรโซแนนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระดับแรงดันสูงสุดจะคงที่ที่ประมาณ 310V แต่มีช่วงเวลาการนำกระแสของ TRIAC ที่แตกต่างกัน โดยในรูปที่ 2 (ก) ที่กำลังไฟฟ้า 30% แสดงถึงช่วงการนำกระแสของ TRIAC ที่สั้น ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าต่ำ วงจรจึงยังไม่สามารถเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์ได้อย่างเต็มที่ ในรูปที่ 2 (ข) ที่กำลังไฟฟ้า 50% รูปคลื่นแสดงถึงการเรโซแนนซ์ที่ชัดเจนขึ้น กำลังไฟฟ้าเพียงพอแก่โหลด และในรูปที่ 2 (ค) ที่กำลังไฟฟ้า 80% เกิดการนำกระแสของ TRIAC ที่เร็ว และมีแรงดันเฉลี่ยสูงสุด ส่งผลให้วงจรสามารถเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ แสดงถึงความยืดหยุ่นและแม่นยำของการควบคุมพลังงานผ่านมุมเฟส และมีสัญญาณจากทางด้านเอาท์พุตตามรูปที่ 3



(ก)ที่กำลังไฟฟ้า 30 เปอร์เซ็นต์



(ข)ที่กำลังไฟฟ้า 50 เปอร์เซ็นต์



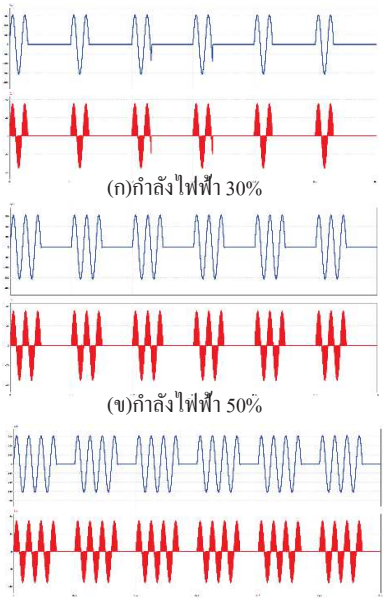
(ค)ที่กำลังไฟฟ้า 80 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 3 แรงดันเอาท์พุต V_{out} และกระแสเอาท์พุต I_{out} ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 3 คลื่นเอาท์พุตของวงจรควอไซเรโซแนนซ์ที่ระดับกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ พบว่าแรงดันและกระแสที่จ่ายเข้าสู่โหลดเหนี่ยวนำมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับการควบคุม โดยรูปที่ 3 (ก) กำลังไฟฟ้า 30% คลื่นเอาท์พุตมีแอมพลิจูดต่ำ ทั้งแรงดันและกระแสแสดงความต่อเนื่องแต่ความถี่ของการเรโซแนนซ์ยังไม่สูงมาก แสดงถึงการส่งพลังงานระดับต่ำเหมาะสำหรับช่วงเริ่มต้นของการให้ความร้อน ซึ่งในรูปที่ 3 (ข) กำลังไฟฟ้า 50% รูปคลื่นมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเสถียร แสดงถึงการเข้าสู่สภาวะเรโซแนนซ์ที่เหมาะสม วงจรสามารถส่งพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และควบคุมพลังงานเข้าสู่โหลดได้อย่างสม่ำเสมอ และในรูปที่ 3 (ค)กำลังไฟฟ้า 80% สัญญาณ

เอาท์พุตมีแอมพลิจูดสูงสุด แสดงถึงความถี่เรโซแนนซ์มีความถี่และต่อเนื่องที่สุด ซึ่งหมายถึงการจ่ายพลังงานเต็มพิกัดของวงจร

4.2 การทดลองปรับกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตด้วยโปรแกรม PSIM



รูปที่ 5 แรงดันอินพุต V_{in} และกระแสอินพุต I_{in} ในโปรแกรม PSIM

จากรูปที่ 5 (ก) ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 30% รูปคลื่นสัญญาณที่ปรากฏมีจำนวนไซเคิลน้อย แสดงถึงช่วงการเปิดสวิตช์ที่สั้น ทำให้จ่ายกำลังไฟฟ้าต่ำ เหมาะสำหรับการอุ่นชิ้นงานเบื้องต้น โดยมีการสูญเสียน้อยและควบคุมได้แม่นยำ ในรูปที่ 5 (ข) ที่ระดับกำลังไฟฟ้า 50% ลักษณะการเรโซแนนซ์ของวงจรปรากฏชัดเจน ส่งพลังงานอย่างเสถียรและยังคงรักษาสภาพ Zero Voltage Switching (ZVS) ได้ดี เหมาะสำหรับช่วงกลางของกระบวนการให้ความร้อน และในรูปที่ 5 (ค) ที่กำลังไฟฟ้าเป็น 80% จะเห็นได้ว่าช่วงการเปิดสวิตช์ยาวขึ้น ส่งผลให้การจ่ายพลังงานเพิ่มมากขึ้น แต่เริ่มมีความเสี่ยงในการสูญเสียเงื่อนไข ZVS และอุณหภูมิของระบบอาจสูงขึ้น จึงเหมาะกับช่วงเร่งอุณหภูมิปลายกระบวนการ

5.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งในการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM และการควบคุมจริงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโมดูล AC Dimmer พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยรูปคลื่นแรงดันอินพุต (Vin) และการเรโซแนนท์ในแต่ละช่วงการทำงาน (30%, 50%, 80%) แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานเฉลี่ยที่ส่งเข้าสู่วงจรในรูปแบบเดียวกัน ทั้งจำนวนรอบของรูปคลื่นและช่วงเวลาในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทำให้สามารถคาดการณ์ผลของระบบจากการจำลองได้อย่างแม่นยำ สำหรับการเปรียบเทียบกับหม้อแปลงปรับแรงดันหรือวารีแอค การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมุมเฟสมีข้อได้เปรียบอย่างชัดเจน คือให้การควบคุมแบบ Real-Time สามารถปรับค่าพลังงานได้ละเอียด รวดเร็ว และอัตโนมัติผ่านซอฟต์แวร์ ขณะที่หม้อแปลงปรับแรงดันมีข้อจำกัดในด้านความเร็วในการปรับ ความแม่นยำต่ำ ซึ่งไม่เหมาะกับงานที่โหลดเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว เช่น งานทุบขึ้นรูปโลหะ สรุปคือการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับการจำลองใน PSIM ไม่เพียงแต่สอดคล้องกันทางผลลัพธ์ แต่ยังเพิ่มประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นในการควบคุมที่เหนือกว่าวิธีการแบบแมนนวลได้อย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

[1] สายชล ชุดเจือจีน. 2547. “เครื่องให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำโดยใช้อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายกระแสแบบเต็มบริดจ์สำหรับงานขึ้นรูปโลหะ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[2] ปฏิพงษ์ เจริญเวียงเหนือ และ อิษฎา บุญญาอรุณเนตร. 2554. “การควบคุมอุณหภูมิอย่างง่ายสำหรับเตาหุงต้มเหนี่ยวนำความร้อนประสิทธิภาพสูง และมีตัวประกอบกำลังสูง” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

[3] Saichol Chudjuarjeen, Vichien Hathairatsiri, Wiroj Pechpunsri, Anawach Sangswang, and Chayant Koompai. 2013 “Quasi-Resonant Converter for Induction Heating in High Temperature Applications”, IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). : 2164-5256

[4] Paradorn Techasakolrat, Saichol Chudjuarjeen, Panithan Chakkuchan, and Santanu Kumar Dash. 2024 “Study of Class E Inverter for Induction Heating in High Temperature”, 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON).

[5] Chunyang Wu. 2023. “Adaptive Quasi-Resonant Control for the MediumFrequency Power Supply With Wide Variation of Output Frequency.”, 2023 IEEE PELS Students and Young Professionals Symposium.

[6] Patipong Charoenwiangnuea. 2017. “Design of Domestic Induction Cooker based on Optimal Operation Class-E Inverter with Parallel Load Network under Large-Signal Excitation.”, Journal of Power Electronics. Vol. 17, No. 4, pp. 892-904.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เสถียรภาพของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด ภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากริดอิมพิแดนซ์

Stability of LCL Grid-Tied Inverter under Grid Impedance Variation

ปรัชญา ปฐมชัยวัฒน์[1*] เดชา ปานประเสริฐ[1] วราห์ สาดาระ[1] และ กรวิทย์ กระจ่างพันธ์[1]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
E-mail: pratchaya.p@cit.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดด้วยวิธีเชิงอิมพิแดนซ์ โดยเน้นศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่ากริดอิมพิแดนซ์ โดยใช้แผนภาพไนควิสต์และแผนภาพโบเดในการวิเคราะห์ จากผลการศึกษาพบว่า เมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์เพิ่มสูงขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มสูญเสียเสถียรภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีทดสอบที่กริดมีค่าอิมพิแดนซ์สูงมาก (7 mH) ผลการศึกษานี้เน้นย้ำความสำคัญในการกำหนดขอบเขตอิมพิแดนซ์ของกริดและการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์

คำสำคัญ: แอลซีแอลอินเวอร์เตอร์, เสถียรภาพเชิงอิมพิแดนซ์, เกณฑ์ไนควิสต์

Abstract

This paper presents the impedance-based stability analysis of a LCL grid-tied inverter under varying grid impedance conditions using Nyquist and Bode diagrams. The study investigates the effects of grid impedance changes on system stability. The analysis indicates that as the grid impedance increases, the system stability deteriorates significantly, especially in scenarios of high grid impedance (7 mH). The results emphasize the importance of defining appropriate grid impedance boundaries and designing suitable control systems to maintain stability under varying grid impedance conditions

Keywords: LCL inverter, impedance-based stability, Nyquist stability criterion

1. บทนำ

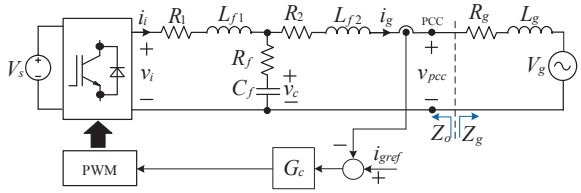
ในปัจจุบัน ความต้องการพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Sources, RES) เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด (Grid-Connected Inverter, GCI) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการส่งพลังงานไฟฟ้าจาก RES เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้วงจรกรองแบบแอลซีแอล (LCL filter) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการลดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์ที่สูงขึ้น (Weak Grid Condition) ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่เสถียรของระบบหรือทำให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าลดลง [2-3] ดังนั้น ในบทความนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์เสถียรภาพของ LCL อินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกริด โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงอิมพิแดนซ์ (Impedance-based Stability Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความไม่เสถียรที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์ [4-5] วิธีนี้มีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เนื่องจากสามารถอธิบายและแสดงให้เห็นผลกระทบโดยตรงของกริดอิมพิแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเสถียรภาพของระบบได้อย่างชัดเจน

2. การวิเคราะห์เสถียรภาพจากอัตราส่วนอิมพิแดนซ์ของวงจรต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริด

2.1 วงจรต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกริด

รูปที่ 1 แสดงวงจรต่อเฟสของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกริดซึ่งประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมกระแสที่จ่ายเข้าสู่กริด โดยมีแรงดันอินพุต (V_s) เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันไฟฟ้าสลับและส่งเข้าสู่วงจรกรองแบบแอลซี

แอลที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำฝั่งอินเวอร์เตอร์ (L_{f1}) ตัวเก็บประจุ (C_f) และตัวเหนี่ยวนำฝั่งกริด (L_{f2}) เพื่อกรองสัญญาณ ก่อนจะเชื่อมต่อเข้าสู่กริดที่จุดต่อร่วม (pcc) โดยที่ตัวต้านทาน R_1, R_2 และ R_f แทนค่าความต้านทานภายในของตัวเหนี่ยวนำ L_{f1}, L_{f2} และตัวเก็บประจุ C_f ตามลำดับ นอกจากนี้ตัวเหนี่ยวนำกริด (L_g) และตัวต้านทาน (R_g) จะใช้แทนค่ากริดอิมพิแดนซ์



รูปที่ 1 วงจรต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกริด

จากวงจรในรูปที่ 1 เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนของวงจรแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสในวงจรได้ดังนี้

-สมการแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองฝั่งอินเวอร์เตอร์

$$sL_{f1}i_i(s) = v_i(s) - (i_c(s)R_f + v_c(s)) - R_1 i_i(s) \quad (1)$$

-สมการแรงดันที่ตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองฝั่งกริด

$$sL_{f2}i_g(s) = (i_c(s)R_f + v_c(s)) - v_{pcc}(s) - R_2 i_g(s) \quad (2)$$

-สมการกระแสที่ตัวเก็บประจุของวงจรกรอง

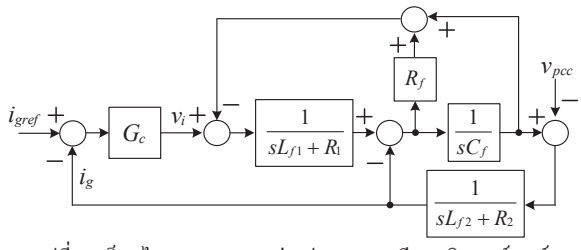
$$i_c(s) = sC_f v_c(s) \quad (3)$$

-สมการแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์

$$v_i(s) = (i_{gref}(s) - i_g(s))G_c(s) \quad (4)$$

โดยที่ $G_c(s) = k_p + (k_i / s)$ คือ ตัวควบคุมกระแสแบบพีไอ

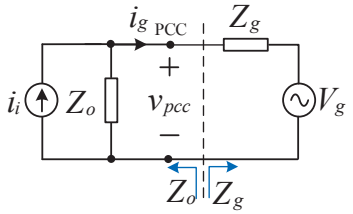
จากนั้นนำสมการ (1), (2), (3) และ (4) มาสร้างเป็นบล็อกไดอะแกรมของวงจรต่อเฟสของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมวงจรต่อเฟสของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์

2.2 วงจรสมมูลนอร์ตันต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกริด

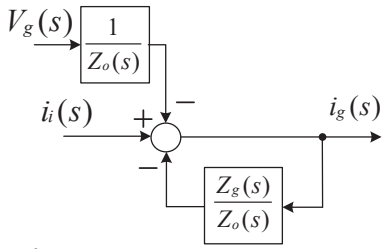
จากวงจรต่อเฟสของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อที่ 2.1 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตันได้ดังรูปที่ 3 โดยจะประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ (i_i) ต่อขนานกับเอาต์พุตอิมพิแดนซ์ของอินเวอร์เตอร์ (Z_o) จากนั้นนำมาเชื่อมต่อกับอิมพิแดนซ์กริด (Z_g) และแรงดันกริด (V_g) ที่จุดต่อร่วม PCC โดยสมการความสัมพันธ์ของกระแสที่จ่ายเข้าสู่กริดจะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 3 วงจรสมมูลนอร์ตันต่อเฟสของแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ขณะเชื่อมต่อกริด

$$i_g(s) = \frac{Z_o(s)i_i(s) - V_g(s)}{Z_o(s) + Z_g(s)}$$
$$= i_i(s)\frac{1}{1+(Z_g(s)/Z_o(s))} - V_g(s)\frac{(1/Z_o(s))}{1+(Z_g(s)/Z_o(s))} \quad (5)$$

เมื่อนำสมการที่ (5) มาสร้างเป็นบล็อกไดอะแกรมจะได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 บล็อคไดอะแกรมของวงจรสมมูลนอร์ตัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4 เนื่องจากแรงดันกริด (V_g) มีค่าคงที่ ดังนั้นอินพุตของระบบจะเหลือเพียงกระแสที่จ่ายออกจากอินเวอร์เตอร์ (i_i) และเอาต์พุตของระบบ คือ กระแสที่จ่ายเข้าสู่กริด (i_g) ซึ่งเมื่อพิจารณาระบบนี้จะมีอัตราส่วนป้อนกลับ (return ratio, $L(s)$) ของระบบตามสมการที่ (6)

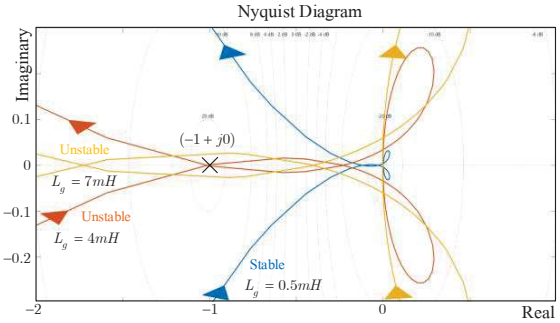
$$L(s) = Z_g(s) / Z_o(s) \quad (6)$$

โดยเป็นอัตราส่วนระหว่าง Z_g และ Z_o ซึ่งอัตราส่วนปิ้อนกลับนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อพิจารณาเสถียรภาพของระบบในหัวข้อถัดไป โดยที่ Z_o หาได้จากการหาฟังก์ชั่นถ่ายโอนระหว่างแรงดันที่จุดต่อร่วม (v_{pcc}) และกระแสที่จ่ายเข้าสู่กริด (i_g) ของบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 2 เมื่อให้อินพุตกระแสกริดอ้างอิงเป็นศูนย์ ($i_{gref} = 0$) จะได้เอาต์พุตอิมพิแดนซ์ของอินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (7)

$$Z_o(s) = \frac{v_{pcc}(s)}{i_g(s)}$$
$$= \frac{(C_f L_{f1} L_{f2})s^3 + (C_f L_{f1} R_f + C_f L_{f2} R_f + C_f L_{f1} R_2 + C_f L_{f2} R_1)s^2}{(C_f L_{f1})s^2 + (C_f R_f + C_f R_1)s + 1}$$
$$+ \frac{(C_f R_1 R_f + C_f R_1 R_2 + C_f R_2 R_f + C_f R_f G_c + L_{f1} + L_{f2})s + R_1 + R_2 + G_c}{(C_f L_{f1})s^2 + (C_f R_f + C_f R_1)s + 1} \quad (7)$$

3 การวิเคราะห์เสถียรภาพวงจรต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดภายใต้การเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์

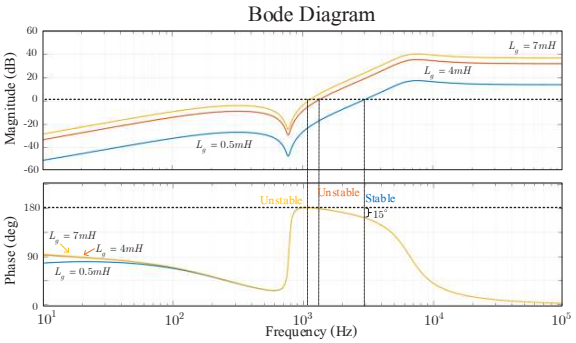
หัวข้อนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากอัตราส่วนอิมพิแดนซ์ที่ได้จากหัวข้อที่ 2 โดยพิจารณาผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งได้กำหนดให้อินเวอร์เตอร์เริ่มต้นการทำงานโดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัด จากนั้นทดสอบเปลี่ยนแปลงค่ากริดอิมพิแดนซ์ที่มีตัวเหนี่ยวนำตั้งแต่ 0.5 mH , 4 mH และ 7 mH ในการวิเคราะห์เสถียรภาพจะใช้เกณฑ์ไนควิสต์ (Nyquist Stability Criterion) โดยพล็อตแผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Diagram) และแผนภาพโบเด (Bode Plot) ของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์ โดยรูปที่ 5 แสดงแผนภาพไนควิสต์ของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์ โดยแต่ละเส้นกราฟจะแทนค่ากริดอิมพิแดนซ์ที่แตกต่างกันคือ 0.5 mH (เส้นสีน้ำเงิน), 4 mH (เส้นสีแดง) และ 7 mH (เส้นสีเหลือง) ตามลำดับ



รูปที่ 5 แผนภาพไนควิสต์ของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์

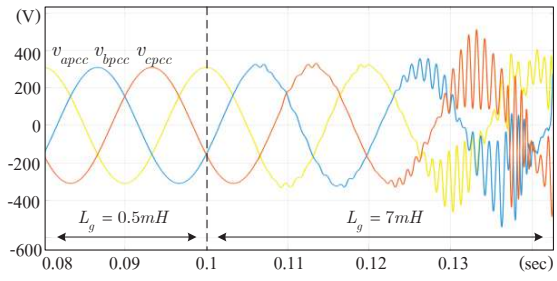
จากแผนภาพไนควิสต์ พบว่าเมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์มีขนาด 0.5 mH คอนทัวร์ของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์จะไม่มีการวนรอบจุด (-1, j0) แสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพ แต่เมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์เพิ่มขึ้นเป็น 4 mH และ 7 mH คอนทัวร์จะมีลักษณะวนรอบจุด (-1, j0) ส่งผลให้ระบบเกิดความไม่เสถียร และเมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์เพิ่มมากขึ้น (7 mH) ระบบจะมีความไม่เสถียรชัดเจนยิ่งขึ้น

รูปที่ 6 แสดงแผนภาพโบเดของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์ ซึ่งจะแบ่งเป็นสองส่วนคือ ส่วนขนาด (Magnitude) และส่วนเฟส (Phase) จากแผนภาพโบเดนี้จะพบว่าเมื่อกริดอิมพิแดนซ์มีค่า 0.5 mH ระบบจะยังคงมีส่วนเผื่อเฟส (Phase Margin) อยู่ที่ 15 องศา ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพ แต่เมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์เพิ่มเป็น 4 mH และ 7 mH จะเห็นได้ชัดเจนว่าระบบจะไม่มีส่วนเผื่อเฟสซึ่งแสดงว่าระบบไม่มีเสถียรภาพอย่างชัดเจน



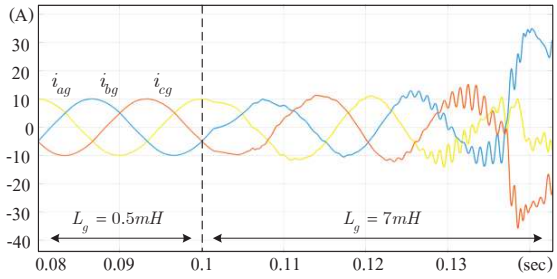
รูปที่ 6 แผนภาพโบเดของอัตราส่วนอิมพิแดนซ์

นอกจากนี้ เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางทฤษฎีวงจรแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดได้ถูกจำลองการทำงานโดยกำหนดให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกระแสเข้าสู่กริดที่พิกัด 10 A จากนั้นที่เวลา 0.1 วินาที ได้ปรับค่าอิมพิแดนซ์ของกริดโดยเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำกริดจาก 0.5 mH เป็น 7 mH



รูปที่ 7 ผลการจำลองการทำงานแรงดันที่จุดต่อร่วม

โดยรูปที่ 7 แสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันที่จุดต่อร่วม ซึ่งก่อนเวลา 0.1 วินาที แรงดันที่ PCC มีลักษณะคงที่และไม่มีความผิดเพี้ยน แต่หลังจากที่ค่ากริดอิมพิแดนซ์เพิ่มขึ้น แรงดันเริ่มเกิดการแกว่งอย่างชัดเจนและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แสดงถึงการสูญเสียเสถียรภาพของระบบ และรูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมของกระแสที่จ่ายเข้าสู่กริด ซึ่งพบว่าหลังจากเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำกริดแล้ว กระแสมีลักษณะเป็นคลื่นที่แกว่งรุนแรงขึ้นและเริ่มมีความผิดเพี้ยนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากแผนภาพไนควิสต์และโบเดที่ระบุว่าระบบจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อค่ากริดอิมพิแดนซ์สูงขึ้น



รูปที่ 8 ผลการจำลองการทำงานกระแสที่จ่ายเข้ากริด

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวงจรแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า
ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง	L_{f1}, L_{f2}	7 mH, 0.1 mH
ตัวเหนี่ยวนำกริด	L_g	0.5 mH – 7 mH
ตัวเก็บประจุวงจรกรอง	C_f	6 µF
เกณฑ์ตัวควบคุมกระแส	k_p, k_i	17, 1000
พิกัดกำลังอินเวอร์เตอร์		5 kW
ระบบไฟฟ้า	V_g	380 V, 50Hz
แรงดันอินพุต	V_s	550 V

4. สรุป

จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรต่อเฟสแอลซีแอลอินเวอร์เตอร์แบบเชื่อมต่อกริดด้วยวิธีการเชิงอิมพิแดนซ์ภายใต้การเปลี่ยนแปลงค่ากริดอิมพิแดนซ์ พบว่าเมื่อกริดอิมพิแดนซ์มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบจะมีแนวโน้มสูญเสียเสถียรภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นความสำคัญในการออกแบบระบบควบคุมและการกำหนดขอบเขตเอาต์พุตอิมพิแดนซ์ให้เหมาะสมกับกริดอิมพิแดนซ์ เพื่อป้องกันปัญหาความไม่เสถียรของระบบที่อาจเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่ากริดอิมพิแดนซ์ในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ทั้งในด้านทรัพยากรและอุปกรณ์ รวมถึงการให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

[1] J. He, Y. W. Li, D. Bosnjak and B. Harris, "Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel-Inverter-Based Microgrid," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, pp. 234-246, Jan. 2013.

[2] X. Wang, F. Blaabjerg and W. Wu, "Modeling and Analysis of Harmonic Stability in an AC Power-Electronics-Based Power System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 12, pp. 6421-6432, Dec. 2014.

[3] J. Sun, "Impedance-Based Stability Criterion for Grid-Connected Inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3075-3078, Nov. 2011.

[4] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, "Modeling and Analysis of Harmonic Stability in an AC Power-Electronics-Based Power System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 12, pp. 6421-6432, Dec. 2014.

[5] M. Amin and Y. A.-R. I. Mohamed, "Review of Stability Criteria and Methods for Grid-Connected Inverters under Weak Grid Conditions," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 3, pp. 2062-2070, May-Jun. 2017.


ปรัชญา ปฐมชัยวัฒน์
อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ


เดชา ปานประเสริฐ
อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ


วราห์ สาคาระ
อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ


กรวิทย์ กระจ่างพันธ์
อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องขยายตลับลูกปืนแบบใช้การเหนี่ยวนำความร้อน

Bearing Heater by Induction Heating

ศิริชัย แดงเอม[1*] นิติพงศ์ ปานกลาง[1] สมชาย เบียนสูงเนิน[1] ณัฐพล หาอุปละ[1] นิธิกร จันทร์หัวโทน[1] ศีลวัตร ร่มโพธิ์ชัย[1]
ชานนท์ ชูพงษ์[1] มนฑล นาวงษ์[1] และ ณฐพัทธ์ พันธ์คง[1]
[1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: sirichai.d@en.rmutt.ac.th[*]

บทคัดย่อ

เครื่องขยายตลับลูกปืนนี้ใช้หลักการเหนี่ยวนำความร้อน โดยมีหลักการ คือ จะใช้วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์สร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์จ่ายให้ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นให้วิ่งไปตามแกนเหล็ก เมื่อนำตลับลูกปืนไปสวมไว้ที่แกนเหล็ก ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ตลับลูกปืน และเกิดความร้อนขึ้นจนทำให้ตลับลูกปืนขยายตัว จึงสามารถนำไปสวมใส่กับเพลาได้อย่างง่ายดาย และเมื่อตลับลูกปืนเย็นลง ก็จะหดตัวลงทำให้ติดแน่นกับเพลาพอดี

ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องขยายตลับลูกปืน โดยการเหนี่ยวนำความร้อนให้ตลับลูกปืน ขนาด 25มม., 40มม., 55 มม. ตามลำดับ จนมีอุณหภูมิ 120^{O}C ซึ่งเมื่อเทียบกับวิธีให้ความร้อนแบบเดิมที่ใช้ขดลวดไฟฟ้าจ่ายด้วยแรงดัน 1 เฟส 220V 50Hz โดยตรง จะใช้เวลาทำความร้อนนานถึง 57.81 Sec, 67.73 Sec, 85.28 Sec ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เครื่องขยายตลับลูกปืนที่นำเสนอ ที่มีการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ จะสามารถลดเวลาในการเหนี่ยวนำความร้อนได้ ทำให้ร้อนเร็วขึ้นเป็น 13.98 Sec, 22.01 Sec, 46.69 Sec ตามลำดับ แต่ในด้านของการใช้กำลังไฟฟ้าจากวิธีเดิมที่ใช้กำลังไฟฟ้า 311.64 W, 371.24 W, 561.40 W ก็จะสูงขึ้นเป็น 932.645 W, 1242.8 W, 1311.1 W ตามลำดับ

คำสำคัญ: การเหนี่ยวนำความร้อน, วงจรอินเวอร์เตอร์, การขยายตลับลูกปืน

Abstract

This bearing expansion machine uses the principle of induction heating. The principle is to use a full-bridge inverter circuit to generate a voltage signal at the resonant frequency, supplying it to the coil to create a magnetic field that runs along the steel shaft. When the bearing is placed on the steel shaft, an induced voltage occurs in the bearing, generating heat until the bearing expands. This allows it to be easily fitted onto the shaft, and when the bearing cools down, it contracts, fitting tightly onto the shaft.

The results of the bearing heater performance test by inducing heat into bearings of sizes 25mm, 40mm, and 55mm, respectively, until reaching a temperature of 120°C. Compared to the traditional heating method using a single-phase 220V 50Hz electric coil, which took 57.81 sec, 67.73 sec, and 85.28 sec respectively, the proposed bearing heater using a resonant frequency-controlled inverter circuit can reduce the heating time to 13.98 sec, 22.01 sec, and 46.69 sec respectively. However, in terms of power consumption, the traditional method used 311.64 W, 371.24 W, and 561.40 W, while the new method used 932.645 W, 1242.8 W, and 1311.1 W respectively.

Keywords: Induction heating, inverter circuit, bearing expansion

1. บทนำ

ตลับลูกปืน (Bearing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนของเพลา โดยตลับลูกปืนมีหน้าที่ถ่ายทอดแรงที่เกิดขึ้นจากเพลาลงไปสู่ฐานเครื่องยนต์ และลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลต่างๆ และช่วยลดการสึกหรอ มีความแข็งแรงค่อนข้างสูง โดยจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน หากได้รับการประกอบและบำรุงรักษาที่ถูกต้อง ส่วนใหญ่ตลับลูกปืนต้องสวมอัดแน่นบนเพลาและในห้องเครื่องเสมอ ดังนั้น การประกอบจึงจำเป็นต้องใช้แรงกดในแนวแกนค่อนข้างสูง เพื่อขับให้ตลับลูกปืนเข้าไปนั่งบนเพลาหรือในห้องเครื่อง การใช้แรงกดหรือแรงดึงที่ไม่ถูกต้องในการประกอบหรือการถอดตลับลูกปืน จะมีผลทำให้ตลับลูกปืนชำรุดได้ ผลที่ตามมาคือ อายุการใช้งานจะสั้นลง

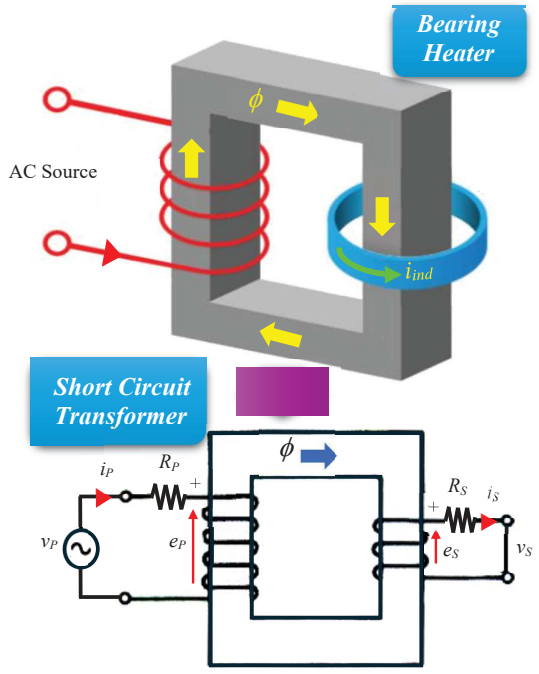
การติดตั้ง ถือเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญมาก หากตลับลูกปืนไม่ได้รับการติดตั้งอย่างเหมาะสม อายุการใช้งานของตลับลูกปืนจะสั้นลง ปกติเครื่องมือติดตั้งประกอบด้วย อุปกรณ์ตอกใส่ เครื่องทำความร้อน และอุปกรณ์ไฮดรอลิก แต่วิธีการตอกใส่ตลับลูกปืน เป็นวิธีที่ง่าย แต่มีความเสี่ยงที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตลับลูกปืน และอาจจะส่งผลต่ออายุการใช้งานในระยะยาว ส่วนวิธีการใช้ไฮดรอลิก ก็เป็นอีกวิธีที่ใช้กันในการประกอบตลับลูกปืนขนาดใหญ่ แต่ด้วยตัวเครื่องอัดไฮดรอลิกมีขนาดใหญ่ จึงไม่สะดวกในการขนย้าย

ส่วนวิธีการให้ความร้อนกับตลับลูกปืนนั้น ก็เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้กัน ไม่ว่าเป็นการใช้แก๊สจุดไฟเผา หรือใช้ขดลวดไฟฟ้าไปเหนี่ยวนำสร้างความร้อนขึ้นที่ตัวตลับลูกปืนก็ตาม แต่ความร้อนที่ให้ ควรอยู่ในช่วง 70-130^{o}C หากร้อนมากไปหรือใช้เวลาให้ความร้อนนานเกินไป จะมีผลทำให้ชิ้นส่วนภายในตลับลูกปืนเสียหายได้ ซึ่งเครื่องที่มีขายในท้องตลาดส่วนใหญ่จะเป็นแบบใช้ขดลวดรับแรงดันจากระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220V 50Hz โดยทั่วไป จึงทำให้มีราคาถูก แต่ใช้เวลาในการทำความร้อนที่ตัวตลับลูกปืนนาน

สำหรับงานวิจัยนี้ นำเสนอเครื่องขยายตลับลูกปืนแบบใช้ความร้อนเป็นหลัก โดยนำเทคนิคการเหนี่ยวนำความร้อนมาประยุกต์ใช้ในการสร้างความร้อนให้แก่ตลับลูกปืน ด้วยการใช้วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge Inverter) มาสร้างสัญญาณแรงดันที่ความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อจ่ายให้ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวตลับลูกปืน สำหรับหลักการทำงานในส่วนต่างๆ จะอธิบายโดยละเอียดในแต่ละหัวข้อต่อไป

1. หลักการเหนี่ยวนำความร้อน (Induction Heating)

เป็นหลักการอาศัยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ซึ่งคล้ายกับการทำงานของหม้อแปลงที่มีขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary winding) `และถูกพันวางไว้บนแกนเหล็กหม้อแปลง แต่เครื่องขยายตลับลูกปืนจะใช้ตัวตลับลูกปืนเป็นเสมือนขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบเพียง 1 รอบ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ดังนั้นจึงสามารถนำสมการหม้อแปลง มาเขียนเป็นสมการเพื่อใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของหลักการเหนี่ยวนำความร้อน

$$v_P = i_P.R_P + e_P = i_P.R_P + N_P\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$v_S = i_S.R_S + e_S = i_S.R_S + N_S\frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$a \approx \frac{v_P}{v_S} \approx \frac{N_P}{N_S} \approx \frac{i_S}{i_P} \quad (3)$$

$$v_P.i_P \approx v_S.i_S \Rightarrow S_P \approx S_S \quad (4)$$

เมื่อ v คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว (V), e คือ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้า (V), i คือ กระแสไฟฟ้า (A), S คือ กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (VA), R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω), N คือ ขดลวด (รอบ), ตัวห้อย P, S คือค่าของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิตามลำดับ, ϕ คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็ก (Wb), t คือ เวลา (Second),

แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องขยายตลับลูกปืนต่างกับหม้อแปลงไฟฟ้าตรงที่จะมีการลัดวงจรที่ขั้วของขดลวดทุติยภูมิ เพื่อให้เกิดกระแสไหลในขดลวดทุติยภูมิ i_S และนำไปสู่การสร้างความร้อนขึ้นนั่นเอง สมการ (2) จึงเขียนได้เป็น

$$v_S = i_S.R_S + e_S = i_S.R_S + N_S\frac{d\phi}{dt} = 0$$

หรือ $$e_S = N_S\frac{d\phi}{dt} = i_S.R_S \quad (5)$$

ดังนั้นสมการกำลังไฟฟ้าจริงในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นโดยประมาณในขดลวดทุติยภูมิ, P_S (ซึ่งคือที่ตลับลูกปืนนั่นเอง) จึงเขียนได้เป็น

$$P_S = i_S^2.R_S \quad (6)$$

แต่อย่างไรก็ตาม สมการที่ใช้ในการหากำลังที่เหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนขึ้น ที่สอดคล้องกับโครงสร้างของตลับลูกปืน จะมีสมการเป็น

$$P_S = \frac{\pi^2 d^2 B_{max}^2 f^2}{6k\rho D} = K_e B_{max}^2 f^2 \quad (7)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของแผ่นขดลวด (หน่วย m), k คือ ค่าคงที่ โดยเมื่อเหล็กแผ่นบาง (Thin sheet) จะให้เท่ากับ 1 และเท่ากับ 2 เมื่อเป็นสายไฟแบน (Thin wire), ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุ (หน่วย Ω-m), D คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (หน่วย kg/m^3) ซึ่งตัวแปรที่กล่าวมานี้สามารถรวมเป็นค่าคงที่ K_e ได้, B_{max} คือ ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กสูงสุด (T), f คือ ความถี่ไฟฟ้า (Hz) ซึ่งพบว่า ในการเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อนลึกลงไปในชั้นผิวโลหะได้มากนั้น ค่าความถี่ที่เหมาะสม ควรจะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำประมาณไม่เกิน 200Hz

ส่วนสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ มีดังนี้

$$L = \frac{\mu A N^2}{l} \quad (8)$$

และเพื่อให้เกิดการสร้างกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด จึงต้องใช้เทคนิคการสร้างสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวดด้วยค่าความถี่ที่ทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ (resonance) ซึ่งคำนวณได้ด้วยสมการดังนี้

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

เมื่อ L คือค่าความเหนี่ยวนำ (H), N = จำนวนของขดลวด (รอบ), A คือพื้นที่ของแกนเหล็ก (m^2), μ คือ ค่าความซึมซาบ (Permeability), l คือความยาวเฉลี่ยของวัสดุที่นำมาทำแกน (m), C คือค่าความจุ (F)

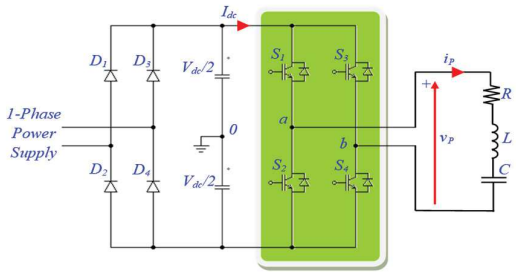
2. วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ (Full-bridge Inverter)

รูปที่ 2 แสดงหลักการทำงานของวงจร โดยจะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส มาแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) จากนั้น วงจรอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สวิตช์กำลัง S_1-S_4 จำนวน 4 ตัว จะทำการสับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งเพื่อป้อนให้วงจรเรโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยขดลวดและตัวคาปาซิเตอร์ ประกอบเป็นวงจรอนุกรม ดังแสดงในรูปที่ 2 ก)

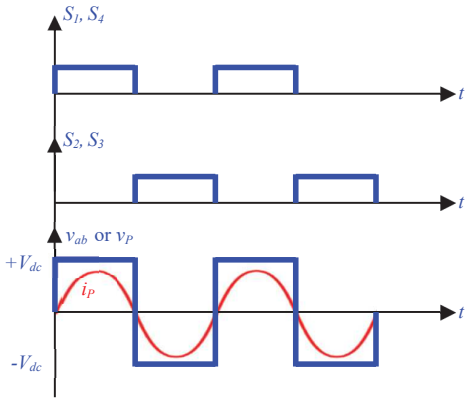
รูปที่ 2 ข) แสดงรูปแบบการสับสวิตช์กำลัง S_1-S_4 ทั้ง 4 ตัว ซึ่งทำให้ได้แรงดันระหว่างขั้ว v_{ab} ที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมและมีค่าสูงสุดเป็น $\pm V_{dc}$ ซึ่งหากปรับความถี่ที่ค่าเรโซแนนซ์พอดี ก็จะทำให้ค่ารูปคลื่นกระแส i_P ที่เกิดขึ้นมีรูปร่างเป็นสัญญาณไซน์

3. การออกแบบและสร้าง

รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องขยายตลับลูกปืนต้นแบบ โดยใช้แผงไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Fio2 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณควบคุม PWM แล้วขับผ่านวงจรขับ (Driver Circuit) เพื่อควบคุมสวิตช์กำลังทั้ง 4 ตัว ของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ แล้วป้อนสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ให้วงจรขดลวดเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำ และเกิดความร้อนขึ้นที่ตัวตลับลูกปืนต่อไป



ก) วงจรกำลัง

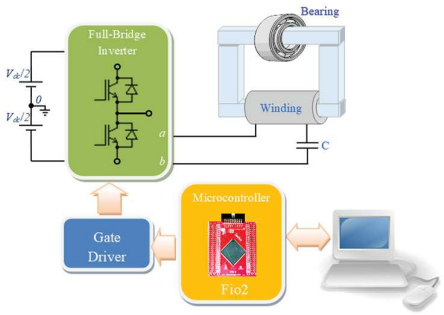


ข) รูปแบบการสร้างสัญญาณแรงดัน

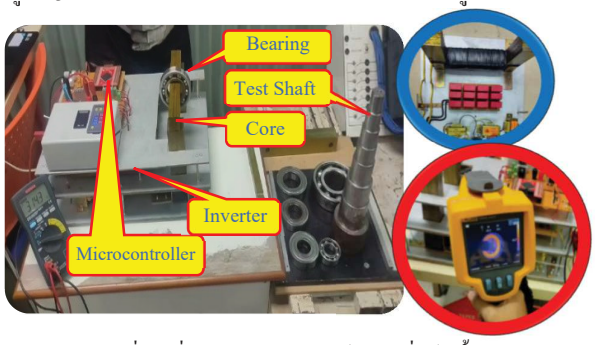
รูปที่ 2 วงจรสมมูลย์อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ ขณะจ่ายชุดขดลวดเรโซแนนซ์

ทั้งนี้ฮาร์ดแวร์ต้นแบบที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 โดยส่วนขดลวดออกแบบพิกัดกำลังไว้ที่ 4kVA โดยใช้ลวดเบอร์ 18 พัน พันไว้บนแกนเหล็กหม้อแปลงตัว E ขนาด 3.8 x 22.7 ซม. โดยตัดขากลางออกให้เป็นตัว U เป็นจำนวน 420รอบ และเมื่อใช้เครื่องวัด RLC พบว่าค่าความเหนี่ยวนำเป็น 83mH และจากการคำนวณค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ 131.6Hz จะต้องใช้ตัวเก็บประจุขนาด 13.3μF

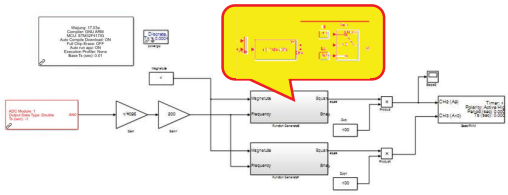
รูปที่ 5 ก) เป็นโปรแกรมสร้างสัญญาณควบคุมความถี่ที่ตั้งค่าดิวตี้ไซเคิลไว้ที่ 50% พร้อมจัดสัญญาณสำหรับสวิตช์กำลังทั้ง 4 ตัว ส่วนรูปที่ 5 ข) สัญญาณเส้นบนเป็นสัญญาณไซน์อ้างอิงที่สร้างขึ้น แล้วนำไปตรวจจับค่าแรงดันบวก เพื่อสร้างเป็นสัญญาณควบคุมสวิตช์ดังสัญญาณเส้นล่าง



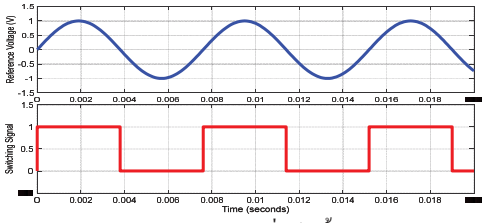
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องขยายตลับลูกปืนต้นแบบ



รูปที่ 4 เครื่องขยายตลับลูกปืนต้นแบบที่สร้างขึ้น

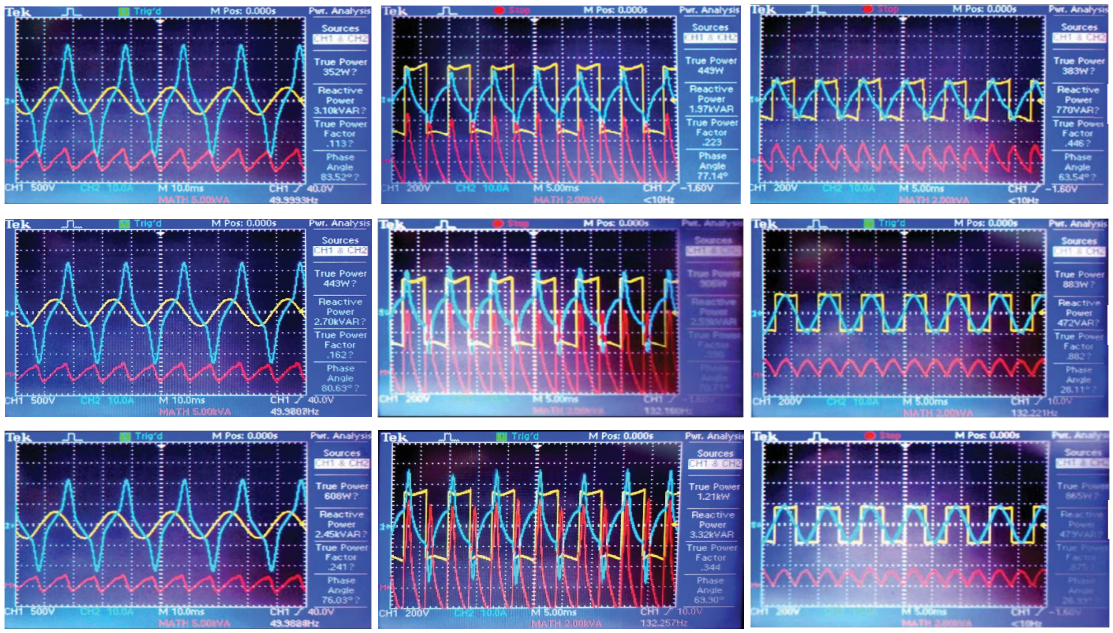


ก) โปรแกรมควบคุมความถี่



ข) สัญญาณควบคุมที่สร้างขึ้น

รูปที่ 5 ส่วนโปรแกรมควบคุมความถี่



ก) 25มม.

ข) 40มม.

ค) 55มม.

ง)

ขนาดลับลูกปืน(mm)	V(V)	I(A)	P(W)	Pf	T(sec)
25	220	12.95	311.64	0.109	57.81
40	220	11.07	371.24	0.157	67.73
55	220	9.90	561.40	0.257	85.28

การทดสอบแบบที่ 1

ขนาดลับลูกปืน(mm)	input			output				T(sec)
	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	Pf	
25	311	3.13	973.43	344	9.25	932.65	0.302	13.98
40	311	4.53	1408.8	329	9.53	1242.8	0.397	22.01
55	311	4.62	1435.7	340	8.97	1311.1	0.403	46.68

การทดสอบแบบที่ 2

ขนาดลับลูกปืน(mm)	input			output				T(sec)
	V(V)	I(A)	P(W)	V(V)	I(A)	P(W)	Pf	
25	170	3.53	599.53	175	6.87	568.12	0.474	14.91
40	170	4.12	699.83	182	4.69	763.49	0.897	22.67
55	170	4.97	845.47	177	4.67	722.28	0.874	57.71

การทดสอบแบบที่ 3

รูปที่ 6 ผลการทดสอบแบบต่างๆ (CH1: แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวด, CH2: กระแสไฟฟ้าที่ขดลวด, CH3 (MATH): กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ขดลวด)

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบจะแบ่งเป็น 3 แบบ คือ

1) การทดสอบแบบจ่ายแรงดันไฟสลับ 220V, 50Hz ให้ขดลวดโดยตรง โดยไม่มีอินเวอร์เตอร์

2) การทดสอบแบบใช้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันไฟสลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ จากแรงดันในบัสไฟตรง 311V แล้วจ่ายให้ขดลวด

3) การทดสอบแบบใช้อินเวอร์เตอร์สร้างแรงดันไฟสลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ จากแรงดันในบัสไฟตรง 170V แล้วจ่ายให้ขดลวด

โดยทำการทดสอบกับตลับลูกปืนในท้องตลาด จำนวน 3 ขนาด คือ 25มม., 40มม. และ 55มม. โดยจะสร้างความร้อนที่ตลับลูกปืนจนมีอุณหภูมิเดียวกันที่ 120^{o}C ซึ่งจากรูปที่ 6 พบว่า ในการทดสอบแบบที่ 1 เมื่อจ่ายแรงดันไฟสลับให้ขดลวดโดยตรง จะใช้กำลังไฟฟ้าสร้างความร้อนไม่สูงมาก แต่ใช้เวลานานกว่าจะทำอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด สัญญาณกระแสมียอดแหลมและมีมุมล้าหลังกับแรงดัน แสดงว่า ค่า $X_C < X_L$ เกิดสภาวะอันเดอร์แดมป์ (Underdamped) และมีค่า P.f. ที่ต่ำมาก

การทดสอบแบบที่ 2 พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงกว่าแบบที่ 1 ถึง 3 เท่า จึงใช้เวลาทำอุณหภูมิได้เร็วกว่า แต่ค่า P.f. พบว่าเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบที่ 1 เล็กน้อยเท่านั้น และสัญญาณกระแสมีมุมนำหน้าแรงดัน แสดงว่า ค่า $X_C > X_L$ เกิดสภาวะโอเวอร์แดมป์ (Overdamped) ประกอบกับสัญญาณกระแสมียอดแหลมสูงมาก สาเหตุเป็นเพราะเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็กนั่นเอง

การทดสอบแบบที่ 3 เมื่อลดแรงดันไฟตรงลงเหลือ 170V พบว่าสัญญาณกระแสมีมุมทับเฟสกับแรงดัน และยอดคลื่นที่แหลม ถูกลดลงจนกลับมาเป็นรูปคลื่นไซน์ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าลดลงไป แต่ระยะเวลาในการทำอุณหภูมิยังใกล้เคียงกับแบบที่ 2 แต่ค่า P.f. เข้าใกล้ 1 มากขึ้น

5. สรุปผลการทดสอบ

เครื่องขยายตลับลูกปืนต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่าเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์จ่ายแรงดันไฟสลับที่ความถี่เรโซแนนซ์ สามารถนำไปใช้งานขยายตลับลูกปืนได้จริง ใช้พลังงานไฟฟ้าไม่สูงมาก และใช้ระยะเวลาทำความร้อนสั้นกว่าเครื่องที่ใช้ขดลวดรับแรงดันไฟสลับอย่างเดียว 2-3 เท่า แต่ยังต้องปรับปรุงเรื่องโครงสร้างให้เล็กลงและน้ำหนักเบา เพื่อใช้ในงานนอกสถานที่ได้ นอกจากนี้แม้ว่าจะใช้เทคนิคการเรโซแนนซ์มาช่วยในการดึงกำลังไฟฟ้าออกมาได้มากก็ตาม กลับพบว่า ผลของการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก มีผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเปล่าขึ้น จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบ

เอกสารอ้างอิง

[1] L. Guofa, R. Xiaoli and Y. Shuxiang, "Development and research on a new bearing replacer based on induction heating technology," 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), Xianning, China, 2011, pp. 264-267, doi: 10.1109/CECNET.2011.5768516.

Computer and Information Technology

(CP)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

การประเมินประสิทธิภาพของ Teachable Machine และเครือข่ายประสาทเทียมในงานจำแนกขยะ: การใช้แนวทาง Semi-Supervised Learning

Evaluating the Performance of Teachable Machine and Neural Network in Waste Classification: A Semi-Supervised Learning Approach

ฤชานนท์ ศรีราวงค์[1] บพิตร ไชยนอก[1] เดชรัชต์ ใจฉิว[2] และ ปิยะมาศ ไชยนอก[3*]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[3*]สาขาวิชาสหวิทยาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
E-mail: piyamas.ch@pit.ac.th*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Teachable Machine และเครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network) ในการจำแนกประเภทขยะภายใต้แนวทางการเรียนรู้แบบ Semi-Supervised โดยใช้ชุดข้อมูลจริงที่รวบรวมจากหลายสถานที่ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลที่มีและไม่มีป้ายกำกับ เป้าหมายของการวิจัยคือการทดสอบและประเมินความสามารถในการจำแนกขยะที่แม่นยำของแต่ละแบบจำลอง ผลการวิจัยได้เผยให้เห็นว่า Teachable Machine มีความเร็วในการฝึกอบรมและการทำนายผลที่เร็วกว่า ในขณะที่เครือข่ายประสาทเทียมแสดงความแม่นยำสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญในการจำแนกขยะภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลายและมีความซับซ้อน นอกจากนี้การวิจัยนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคใหม่ๆ ในการประมวลผลข้อมูลที่ไม่มีป้ายกำกับ ซึ่งอาจนำไปสู่การปรับปรุงวิธีการจัดการขยะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: Teachable Machine, เครือข่ายประสาทเทียม, การเรียนรู้แบบ Semi-Supervised, การจำแนกขยะ, นวัตกรรมการจัดการขยะ

Abstract

This research conducts a comparative study on the effectiveness of the Teachable Machine and Neural Network models in classifying waste under a semi-supervised learning approach. Utilizing a real-world waste dataset collected from various locations, which includes both labeled and unlabeled data, this study aims to evaluate the precision of each model in accurate waste categorization. The findings reveal that while the Teachable Machine excels in training and prediction speed, the Neural Network demonstrates significantly higher accuracy in classifying complex and diverse environmental waste. Additionally, this research introduces innovative approaches and techniques for processing unlabeled data, potentially leading to enhanced waste management methods in the future.

Keywords: Teachable Machine, Neural Network, Semi-Supervised Learning, Waste Classification, Waste Management Innovation

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการจัดการขยะได้กลายเป็นหนึ่งในความท้าทายสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม ตั้งแต่การปนเปื้อนของดินและแหล่งน้ำ ไปจนถึงการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจก การเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกและจัดการขยะอย่างยั่งยืนจึงเป็นเรื่องจำเป็น เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยเฉพาะเทคนิคการเรียนรู้แบบกึ่งกำกับ (Semi-Supervised Learning) ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลที่มีป้ายกำกับและไม่มีป้ายกำกับร่วมกันในการฝึกแบบจำลอง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดต้นทุนการจัดทำข้อมูล

การวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบคัดแยกขยะอัตโนมัติโดยใช้แพลตฟอร์ม Teachable Machine ของ Google ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างและฝึกแบบจำลองได้อย่างง่ายดาย และได้นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการจำแนกประเภทขยะภายใต้สภาวะจริง โดยข้อมูลที่ใช้ในการฝึกประกอบด้วยขยะประเภทขวดพลาสติก ขวดแก้ว กระป๋องอลูมิเนียม และกล่องกระดาษ ขนาดไม่เกิน 1.5 ลิตร

การประเมินผลจะพิจารณาความแม่นยำ (Accuracy) ความเร็วในการทำนาย (Prediction Speed) และความสามารถในการจำแนกขยะในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า Teachable Machine มีข้อได้เปรียบด้านความเร็วในการฝึกและทำนายผล ขณะที่เครือข่ายประสาทเทียมมีความแม่นยำสูงกว่าในสภาวะข้อมูลที่หลากหลาย การเรียนรู้แบบ Semi-Supervised มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเมื่อต้องทำงานกับข้อมูลที่มีป้ายกำกับน้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้โครงสร้างข้อมูลที่ไม่มีป้ายกำกับช่วยในการเรียนรู้เพิ่มเติม สมการพื้นฐานของการเรียนรู้กึ่งกำกับสามารถนิยามได้ดังนี้

$$L=L_{labeled} +\lambda L_{unlabeled} \quad (1)$$

โดยที่ **L** คือฟังก์ชันการสูญเสียรวม, $\mathbf{L}_{labeled}$ คือฟังก์ชันการสูญเสียสำหรับข้อมูลที่มีป้ายกำกับ, $\mathbf{L}_{unlabeled}$ คือฟังก์ชันการสูญเสียสำหรับข้อมูลที่ไม่มีป้ายกำกับ และ λ เป็นค่าน้ำหนักสำหรับการปรับสมดุลระหว่างข้อมูลสองกลุ่ม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเรียนรู้แบบ Semi-Supervised

Semi-supervised learning เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้ทั้งข้อมูลที่มีป้ายกำกับและไม่มีป้ายกำกับในการฝึกอบรมแบบจำลอง การเรียนรู้นี้มีประโยชน์ในสถานการณ์ที่ข้อมูลที่มีป้ายกำกับมีจำนวนจำกัดและมีต้นทุนสูงในการผลิต [1] เสนอว่า semi-supervised learning สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ในสถานการณ์ที่ข้อมูลที่มีป้ายกำกับมีจำนวนน้อย

2.2 เครือข่ายประสาทเทียม (Neural Network)

เครือข่ายประสาทเทียม เป็นอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องที่ได้รับแรงบันดาลใจจากเครือข่ายประสาทในสมองมนุษย์ มันประกอบด้วยหน่วยประมวลผลหลายชั้นที่ทำงานร่วมกันเพื่อจำแนกและทำนายข้อมูล โดยในการศึกษานี้ใช้เครือข่ายประสาทเทียมเพื่อเปรียบเทียบกับ Teachable Machine ซึ่งเป็นเครื่องมือการเรียนรู้เชิงลึก การเปรียบเทียบครอบคลุมถึงความสามารถในการจำแนกประเภทขยะที่แม่นยำภายใต้สถานการณ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมุ่งเน้นที่ความแม่นยำในการจำแนกและความเร็วในการทำนาย

2.3 Teachable Machine

เป็นเครื่องมือพัฒนาโดย Google ที่อนุญาตให้ผู้ใช้สร้างและฝึกแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกโดยไม่ต้องมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรม ด้วยการใช้งานที่ง่ายและสะดวก Teachable Machine ทำให้เข้าถึงการเรียนรู้ของเครื่องได้ง่ายขึ้น และเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการทดสอบและประยุกต์ใช้แบบจำลองสำหรับการจำแนกข้อมูลภาพหรือวิดีโอ

3. การทดลอง

การกำหนดระเบียบวิธีวิจัยตามแผนผังในรูปที่ 1 โดยเริ่มจากการจัดเตรียมชุดข้อมูลภาพขยะ จากนั้นจึงดำเนินการแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มที่มีป้ายกำกับและไม่มีป้ายกำกับ เพื่อสนับสนุนการเรียนรู้แบบกึ่งกำกับ (Semi-Supervised Learning)

ขั้นต่อไปคือการสร้างและฝึกแบบจำลองด้วยสองเทคนิคหลัก ได้แก่ Teachable Machine (TM) ซึ่งเน้นความเร็วในการประมวลผล และ Convolutional Neural Network (CNN) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกภาพ จากนั้นทำการทดสอบโมเดลที่ฝึกแล้วด้วยข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน แล้วจึงวัดผลลัพธ์โดยใช้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างโมเดลเพื่อวิเคราะห์ข้อดีข้อจำกัดในแต่ละวิธี ซึ่งผังงานระเบียบวิธีวิจัยแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผังระเบียบวิธีวิจัย

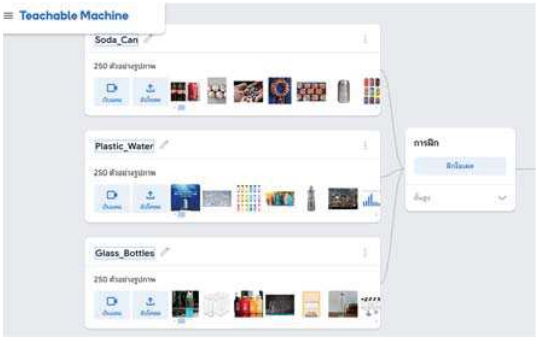
3.1 การเลือกและเตรียมชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลมีทั้งข้อมูลที่มีป้ายกำกับและข้อมูลที่ไม่มีป้ายกำกับ เพื่อสนับสนุนกระบวนการเรียนรู้แบบ semi-supervised ที่เน้นการใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีค่าใช้จ่ายในการติดป้ายกำกับต่ำ นอกจากนี้จำเป็นต้องดำเนินการประมวลผลล่วงหน้าต่อข้อมูลเหล่านี้ ซึ่งรวมถึงการปรับขนาดของภาพให้มีความเหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายและลดความเสี่ยงของความผิดพลาดในการจำแนกประเภทขยะของแบบจำลอง

3.2 การตั้งค่าแบบจำลอง

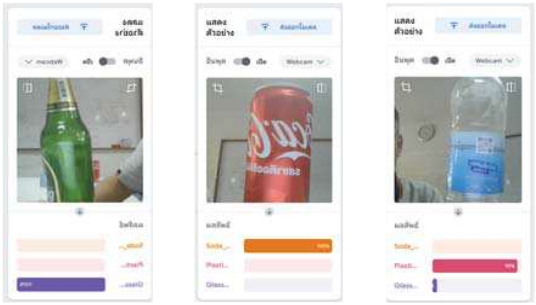
3.2.1 Teachable Machine

การเตรียมข้อมูลสำหรับ Teachable Machine เริ่มต้นด้วยการรวบรวมชุดข้อมูลรูปภาพขยะที่มีป้ายกำกับชัดเจน เช่น ขวดน้ำพลาสติก ขวดแก้ว และกระป๋องโลหะ การรวบรวมข้อมูลนี้จะรวมถึงการถ่ายภาพหรือการเก็บรวบรวมภาพจากแหล่งที่เชื่อถือได้ [2] แต่ละภาพจะถูกแท็กด้วยป้ายกำกับที่ระบุประเภทของขยะ เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการจดจำประเภทของขยะในแบบจำลอง ขั้นตอนการเตรียมชุดข้อมูลที่มีป้ายกำกับ แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การทำ Label ให้กับข้อมูลชุดภาพขวดต่างๆ

การตั้งค่าการฝึกฝนการฝึกฝนแบบจำลอง Teachable Machine ต้องกำหนดค่าการฝึกแบบจำลองอย่างเหมาะสม [4] กำหนดจำนวนชั้นหรือ layers ของโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมกับความซับซ้อนของข้อมูล การเพิ่มชั้นสามารถช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้คุณลักษณะที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น [4] กำหนดจำนวนรอบการฝึก (epochs) อยู่ที่ 50 จำนวน batch size=16 และอัตราการเรียนรู้อยู่ที่ 0.001 แบบจำลองจะทำการเรียนรู้จากชุดข้อมูลเดียวกัน จำนวน epochs ที่มากขึ้นช่วยให้แบบจำลองมีโอกาสปรับปรุงและเรียนรู้ลักษณะเด่นของข้อมูลได้ดีขึ้น แต่ก็ต้องระวังปัญหาการเกินการฝึก (overfitting)



รูปที่ 3 ผลการทดสอบแบบจำลอง

3.2.2 Convolutional Neural Network (CNN)

เป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการจำแนกข้อมูลภาพ ซึ่งมีลักษณะเป็น grid เช่น ภาพถ่ายและวิดีโอ [3] ในงานวิจัยนี้ ได้นำแบบจำลอง CNN มาใช้ในการจำแนกประเภทขยะจากข้อมูลภาพถ่ายที่มีป้ายกำกับ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างด้วย Teachable Machine การสร้างโมเดลใช้ฟังก์ชัน Sequential ของไลบรารี TensorFlow Keras โดยมีโครงสร้างดังนี้

Conv2D (32 filters, kernel size 3×3, activation ReLU)

MaxPooling2D (2×2)

Conv2D (64 filters, activation ReLU)

MaxPooling2D

Dropout (rate 0.3)

Flatten

Dense (128 units, activation ReLU)

Dense (6 units, activation Softmax)

ฟังก์ชันสูญเสียที่ใช้คือ categorical_crossentropy และ optimizer ที่เลือกคือ Adam โดยกำหนดอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ที่ 0.001, ขนาดแบตช์ (batch size) เท่ากับ 16 และฝึกแบบจำลองทั้งหมด 10 รอบการฝึก (epochs)

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกแบบจำลอง ใช้ภาพจำนวน 1,199 ภาพ จาก 6 หมวดหมู่ ได้แก่ ขวดพลาสติก ขวดแก้ว กล่องกระดาษ กระป๋องโลหะ ถุงพลาสติก และเศษอาหาร ภาพทั้งหมดได้รับการปรับขนาดเป็น 256 × 256 พิกเซล ข้อมูลทั้งหมดผ่านกระบวนการเพิ่มความหลากหลาย (Data Augmentation) โดยใช้ ImageDataGenerator เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ เช่น การปรับความสว่าง การหมุนภาพ และการสะท้อนภาพแนวนอน

ผลการฝึกอบรม เริ่มต้นที่ ความแม่นยำ (Accuracy) = 26.27% และ Loss = 1.7635 ใน Epoch ที่ 1 สิ้นสุดที่ Accuracy = 75.09% และ Loss = 0.7382 ใน Epoch ที่ 10

การลดลงของค่า loss และการเพิ่มขึ้นของความแม่นยำอย่างต่อเนื่องสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถเรียนรู้ลักษณะของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีแนวโน้มที่จะให้ผลการจำแนกที่แม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง

นอกจากนี้ ยังพบว่าโครงสร้างของแบบจำลอง CNN ที่ประกอบด้วยชั้น convolutional และ max pooling หลายชั้น มีความสามารถในการสกัดคุณลักษณะที่สำคัญจากภาพอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับการปรับพารามิเตอร์อย่างเหมาะสม เช่น dropout และ learning rate จึงช่วยลดปัญหา overfitting และเพิ่มความสามารถในการ generalize ต่อข้อมูลใหม่

3.3 เปรียบเทียบผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ผลการฝึกแบบจำลอง CNN ในแต่ละ Epoch

Epoch	ความแม่นยำ (Accuracy)	ค่าความสูญเสีย (Loss)
1	26.27	1.7635
2	38.45	1.4321
3	49.92	1.2110
4	56.04	1.0486
5	61.82	0.9365
6	65.73	0.8550
7	69.91	0.7984
8	72.14	0.7651
9	74.32	0.7459
10	75.09	0.7382

จากตารางที่ 1 พบว่า ความแม่นยำของแบบจำลอง CNN เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก Epoch โดยเริ่มต้นจาก 26.27% และเพิ่มขึ้นจนถึง 75.09% ใน Epoch ที่ 10 ขณะเดียวกัน ค่า Loss ลดลงจาก 1.7635 เหลือเพียง 0.7382 แสดงถึงประสิทธิภาพในการเรียนรู้ของแบบจำลองที่มีแนวโน้มดีขึ้นอย่างต่อเนื่อง

4. สรุป

4.1 ประสิทธิภาพของ Teachable Machine

Teachable Machine โดดเด่นในด้านความเร็วในการฝึกอบรมและความสามารถในการทำนายอย่างรวดเร็ว ทำให้เหมาะสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการการตอบสนองที่รวดเร็วและปฏิสัมพันธ์ที่ดีกับผู้ใช้ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้อาจพบข้อจำกัดในการจัดการกับชุดข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูงหรือต้องการการแยกแยะรายละเอียดที่ลึกซึ้งมากขึ้น ดังนั้นการใช้งาน Teachable Machine ในสถานการณ์ที่ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูงอาจต้องพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการเหล่านั้นได้อย่างเหมาะสม

4.2 ประสิทธิภาพของ CNN

Convolutional Neural Network (CNN) ที่พัฒนาขึ้นได้แสดงความสามารถในการเรียนรู้และจำแนกคุณลักษณะของข้อมูลภาพด้วยความแม่นยำสูง ผลลัพธ์จากการฝึกอบรมแสดงให้เห็นการปรับปรุงความแม่นยำอย่างต่อเนื่อง และการลดลงของค่า Loss ที่สำคัญ ซึ่งบ่งบอกถึงการปรับตัวของแบบจำลองที่ดีต่อการแยกแยะภาพตามหมวดหมู่ที่กำหนด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง ที่ได้ให้ความรู้และคำปรึกษาที่สำคัญในการพัฒนาเทคนิคและแนวคิดใหม่ๆ ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ผู้เขียนหวังว่าผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะมีส่วนช่วยในการนำไปสู่การปรับปรุงวิธีการจัดการและรีไซเคิลขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางใหม่ในการพัฒนาทางวิชาการและปฏิบัติการในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Oliver, A. Odena, C. Raffel, E. D. Cubuk, and I. Goodfellow, "Realistic Evaluation of Deep Semi-Supervised Learning Algorithms," in **Advances in Neural Information Processing Systems**, 2018.

[2] A. King, "Recyclable and Household Waste Classification," Kaggle, 2024. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/datasets/alistairking/recyclable-and-household-waste-classification

[3] M. Chen, Y. Zhang, and L. Wang, "A Study on the Capability of Machine Learning Algorithms in Sorting Waste in Urban Environments," **Waste Management Journal**, vol. 95, pp. 510–520, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.012.

[4] B. Chainok and R. Srirawong, "Application of Teachable Machine for Automatic Bottle Sorting," **Journal of Technology and Engineering Progress**, vol. 2, no. 1-2, pp. 13-19, 2024.

การออกแบบและพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม IoT

Design and Development of an IoT-Based Automatic Watering and Fertilizing System

มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1*] วราลี หมื่นจิตร[2] และ ธันยา หมื่นศรี[3]

[1*]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: masawee.ma@spu.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลพืช ลดการใช้แรงงาน และช่วยประหยัดทรัพยากรน้ำและปุ๋ย โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าความชื้นในดิน ความเข้มของแสง อุณหภูมิ และความชื้นในอากาศ เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลผ่าน ESP32 ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการรดน้ำและให้ปุ๋ยให้เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิด ระบบสามารถปรับปริมาณน้ำและปุ๋ยตามระดับแสงที่ได้รับ นอกจากนี้ ผู้ใช้สามารถตั้งค่าการทำงานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนอุปกรณ์พกพา เพื่อควบคุมและตรวจสอบข้อมูลแบบเรียลไทม์ รวมถึงสั่งการเปิด-ปิดระบบจากระยะไกล

ผลการทดลองพบว่าระบบนี้สามารถช่วยลดปริมาณการใช้น้ำและปุ๋ยเกินความจำเป็น เพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลพืช และลดภาระของผู้ดูแล ระบบนี้จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในครัวเรือน ฟาร์มขนาดเล็ก และเกษตรกรรมขนาดใหญ่ เพื่อสนับสนุนแนวทางการเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming)

คำสำคัญ: ระบบรดน้ำอัตโนมัติ, ESP32, เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นและแสง, การควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน, เกษตรกรรมอัจฉริยะ

Abstract

This research aimed to develop an automatic watering and fertilizing system utilizing IoT technology to enhance plant care efficiency, reduce labor dependency, and optimize water and fertilizer usage. The system integrates sensors for soil moisture, light intensity, temperature, and humidity, which provided real-time data processed by ESP32, acting as the central controller. Based on environmental conditions, the system adjusted water and fertilizer distribution according to light levels. Additionally, users can configure system settings via the Blynk mobile application, allowing for real-time monitoring and remote control of irrigation and fertilization operations.

Experimental results indicated that the system effectively reduced excessive water and fertilizer usage, enhanced plant maintenance efficiency, and alleviated the workload for users. With its adaptability, the system presented a viable solution for households, small-scale farms, and large agricultural operations, contributing to the advancement of smart farming by enabling precise and efficient resource management.

Keywords: IoT-Based Irrigation System, ESP32, Soil Moisture and Light Sensors, Remote Monitoring and Control, Smart Farming

1. บทนำ

ในปัจจุบันแนวโน้มการเพิ่มพื้นที่สีเขียวโดยการปลูกต้นไม้ในเขตเมือง รวมถึงภายในบ้านและสำนักงานกำลังได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมและส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชากร [1] หนึ่งในปัญหาสำคัญที่พบในการดูแลต้นไม้คือการขาดเวลาในการให้น้ำและบำรุงรักษาต้นไม้ให้เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะในเขตเมืองที่พื้นที่สีเขียวมีจำกัดและเจ้าของพื้นที่มักไม่มีเวลาดูแลอย่างสม่ำเสมอ

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบอัจฉริยะที่ช่วยบริหารจัดการทรัพยากรและลดภาระของผู้ใช้งาน รวมถึงการดูแลต้นไม้และพืชพรรณ ด้วยความสามารถในการเชื่อมต่อและวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์แบบเรียลไทม์ IoT จึงสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการน้ำและสารอาหารของพืชได้อย่างแม่นยำ [2-3]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติที่ใช้ IoT และระบบควบคุมอัจฉริยะในการช่วยจัดการการให้น้ำและสารอาหารแก่พืชได้อย่างเหมาะสม ระบบนี้ทำงานโดยอาศัยเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน ค่าความเข้มแสง และปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลและกำหนดปริมาณน้ำและปุ๋ยที่เหมาะสมสำหรับพืชแต่ละชนิด นอกจากนี้ ระบบยังสามารถควบคุมและติดตามผลผ่านแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพา ทำให้ผู้ใช้

สามารถตั้งค่าการให้น้ำและปุ๋ยได้ตามความต้องการของพืช พร้อมทั้งแจ้งเตือนเมื่อพืชต้องการการดูแลเพิ่มเติม ฟังก์ชันการควบคุมระยะไกลยังช่วยให้ผู้ใช้สามารถจัดการต้นไม้ได้จากทุกที่ ลดภาระในการดูแลและเพิ่มโอกาสให้พืชเติบโตได้อย่างเหมาะสม

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

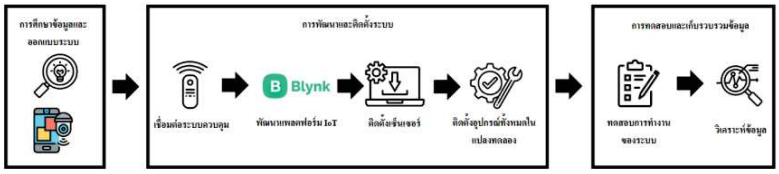
อารยา แนวภูผาและคณะ [4] ได้พัฒนาแบบจำลองระบบรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติที่ควบคุมด้วยเวลาและอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการน้ำสำหรับการเกษตร โดยมีเป้าหมายในการลดการใช้น้ำและแรงงาน พร้อมทั้งช่วยให้พืชได้รับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ระบบใช้เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ความชื้นในอากาศและระดับแสง เพื่อตรวจสอบและประเมินความต้องการน้ำของพืช ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ถูกนำไปประมวลผลโดย Arduino ซึ่งควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำให้ทำงานโดยอัตโนมัติ และหยุดจ่ายน้ำเมื่อปริมาณความชื้นในดินถึงค่าที่กำหนด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถบริหารจัดการน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดปริมาณน้ำที่ใช้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช อีกทั้งยังช่วยลดภาระด้านแรงงานและค่าใช้จ่ายของเกษตรกร

Geetikaa S และคณะ [5] ได้นำเสนอการพัฒนา Smart Plant Watering System ซึ่งใช้ Arduino UNO เป็นตัวควบคุมหลักของระบบ พร้อมติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินและปั๊มน้ำขนาด 6V ระบบถูกออกแบบให้สามารถตรวจสอบค่าความชื้นในดินแบบเรียลไทม์ โดยเมื่อค่าความชื้นลดลงต่ำกว่าระดับที่กำหนดระบบจะสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานโดยอัตโนมัติ และส่งการแจ้งเตือนไปยังอุปกรณ์ของผู้ใช้ผ่านแพลตฟอร์ม Adafruit IO

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติที่สามารถควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน โดยใช้ ESP32 ซึ่งมีคุณสมบัติด้าน Wi-Fi และ Bluetooth ในตัว ทำให้สามารถควบคุมและติดตามผลการทำงานได้จากระยะไกล รองรับการตั้งค่าตามชนิดของพืชและสามารถแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ได้ นอกจากนี้ ระบบยังสามารถตรวจวัดปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความชื้นในดิน อุณหภูมิ ความเข้มแสง และระดับน้ำในถัง โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันแบบเรียลไทม์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสภาพแวดล้อมของพืชได้อย่างแม่นยำ พร้อมทั้งปรับการดูแลให้เหมาะสมกับความต้องการของพืชแต่ละชนิด

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

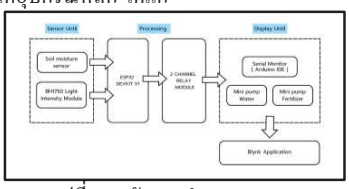
ผู้วิจัยได้ดำเนินการดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติในครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังรูปที่ 1 โดยอธิบายรายละเอียด ในหัวข้อ 3.1 – 3.3



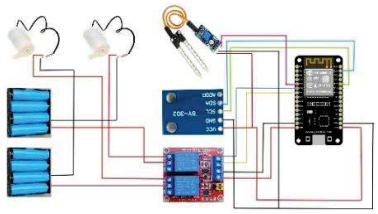
รูปที่ 1 วิธีการดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยอัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม IoT

3.1 การศึกษาข้อมูลและออกแบบระบบ

ในการพัฒนาระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาหลักการทำงานของระบบ รวมถึงแนวทางการใช้ ESP32 เป็นตัวประมวลผลและควบคุมกระบวนการทำงาน โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น ปริมาณน้ำ ปริมาณปุ๋ย ความเข้มของแสง และสภาพแวดล้อมโดยรอบ ในพื้นที่แปลงทดลองขนาดประมาณ 2 x 3 ตารางเมตร ซึ่งเหมาะสำหรับการปลูกพืชในครัวเรือนหรือฟาร์มขนาดเล็ก โดยพืชที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยพืชหลากหลายชนิด เช่น กระบองเพชร ผักสลัด ต้นไม้ใบร่ม และไม้ดอก ดังรูปที่ 2 และ 3 โดยกำหนดอุปกรณ์หลัก ได้แก่



รูปที่ 2 หลักการทำงานของระบบ



รูปที่ 3 วงจรภายในของระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยอัตโนมัติ

1. เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ใช้สำหรับตรวจสอบระดับความชื้นและสั่งการให้น้ำอัตโนมัติ

2. เซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง ใช้เพื่อประเมินปริมาณแสงที่พืชได้รับ

3. ESP32 ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลักที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด

4. ปั๊มน้ำ ใช้ในการจ่ายน้ำและปุ๋ยโดยอัตโนมัติ

3.2 การพัฒนาและติดตั้งระบบ

หลังจากออกแบบระบบแล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งและทดสอบระบบในแปลงทดลอง โดยเชื่อมต่อ ESP32 เข้ากับแอปพลิเคชัน Blynk ซึ่งทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลและควบคุมระบบผ่านสมาร์ตโฟน จากนั้นได้พัฒนาโปรแกรมควบคุม ESP32 ให้สามารถรับค่าจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ และประมวลผลเพื่อสั่งการระบบรดน้ำอัตโนมัติเมื่อค่าความชื้นในดินต่ำกว่าระดับที่กำหนด และระบบให้ปุ๋ยอัตโนมัติเมื่อถึงช่วงเวลาที่เหมาะสม

จากนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดในแปลงทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของระบบในสภาพแวดล้อมจริง โดยประเมินความสามารถของระบบในการควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยอัตโนมัติ รวมถึงประสิทธิภาพในการติดตามผลและสั่งการจากระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน

3.3 การทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติในสภาพแวดล้อมจริง โดยเปรียบเทียบกับการรดน้ำแบบปกติเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ พร้อมบันทึกค่าจากเซ็นเซอร์ เช่น ความชื้นในดิน ความเข้มแสง และระดับน้ำในถัง ตลอดการทดลอง

การวิเคราะห์มุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับปริมาณน้ำและปุ๋ยที่ใช้ รวมถึงการประเมินความแม่นยำของระบบในการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โดยวิเคราะห์การตอบสนองของระบบต่อคำสั่งจากผู้ใช้และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับกลับมา

4. ผลการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของระบบ พบว่า ESP32 ระบบสามารถรดน้ำและให้ปุ๋ยได้อย่างแม่นยำตามค่าความชื้นในดินและระดับแสงที่ได้รับ รวมถึงการแจ้งเตือนและควบคุมผ่านแอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดของผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งระบุถึงค่าความแม่นยำของการทำงานของระบบในแต่ละฟังก์ชัน และเวลาที่ระบบใช้ในการตอบสนองต่อเงื่อนไขที่กำหนด

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความแม่นยำและเวลาในการทำงาน

การทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ	ความแม่นยำของระบบ (%)	เวลาในการทำงาน (วินาที)
การรดน้ำต้นไม้อัตโนมัติ	ความชื้นในดินต่ำกว่า 30%	95%	10
การให้ปุ๋ยอัตโนมัติ	ทำงานตามค่าที่ตั้งไว้	92%	15
การแจ้งเตือนผ่านแอป	แจ้งเตือนเมื่อค่าความชื้นต่ำ	98%	2
การควบคุมระยะไกล	สั่งรดน้ำผ่านแอป	96%	3

จากตารางที่ 1 ระบบสามารถรดน้ำได้อย่างแม่นยำ 95% ภายใน 10 วินาที และ ให้ปุ๋ยได้แม่นยำ 92% ภายใน 15 วินาที นอกจากนี้ ระบบยังสามารถแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาเพียง 2 วินาที และรองรับการควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ได้แม่นยำ 96% ภายใน 3 วินาที ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและควบคุมระบบได้แบบเรียลไทม์ ทำให้การดูแลต้นไม้มีความสะดวกและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เพื่อให้พืชแต่ละชนิดได้รับน้ำและปุ๋ยในปริมาณที่เหมาะสม ระบบได้รับการออกแบบให้สามารถตั้งค่าการให้น้ำตามความต้องการของพืชแต่ละประเภท โดยคำนึงถึงค่าความชื้นในดินที่เหมาะสม ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อวัน และระดับการจ่ายน้ำในดิน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูแลพืช รายละเอียดแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบระหว่างความชื้นในดินและปริมาณน้ำที่ใช้ต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ต่างชนิดกัน

ชนิดของพืช	ความชื้นดินที่เหมาะสม (%)	ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อวัน (ml)	การเจริญเติบโตของพืช (cm/สัปดาห์)
กระบองเพชร	20-30%	50	0.5
ผักสลัด	50-60%	200	3
ต้นไม้ในร่ม	40-50%	150	2
ไม้ดอก	45-55%	180	2.5

จากตารางที่ 2 ความชื้นที่เหมาะสม ปริมาณน้ำที่ใช้ต่อวัน และระดับการจ่ายน้ำในดินของพืชแต่ละชนิด โดยพบว่ากระบองเพชรต้องการความชื้นในดินต่ำที่สุดที่ 20-30% และใช้น้ำเพียง 50 ml ต่อวัน โดยให้ซึมลึกลงไป 0.5 cm ขณะที่ผักสลัดต้องการความชื้นสูงถึง 50-60% และใช้น้ำมากที่สุดที่ 200 ml ต่อวัน โดยให้ซึมลึก 3 cm ส่วนต้นไม้ในร่มและไม้ดอกต้องการความชื้นในช่วง 40-55% โดยมีปริมาณน้ำที่ใช้ 150-180 ml ต่อวัน และระดับการจ่ายน้ำอยู่ที่ 2-2.5 cm ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้ช่วยกำหนดแนวทางการตั้งค่าการรดน้ำอัตโนมัติให้เหมาะสมกับความต้องการของพืชแต่ละชนิดเพื่อให้เกิดการเติบโตที่ดีและลดการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์อัตราการใช้พลังงานของอุปกรณ์แต่ละส่วน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบและหาแนวทางปรับปรุงให้สามารถทำงานได้อย่างเสถียรยิ่งขึ้น รวมถึงลดการใช้พลังงานโดยไม่จำเป็น รายละเอียดของการวิเคราะห์แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปการใช้พลังงานของแต่ละองค์ประกอบ

อุปกรณ์	แรงดันไฟฟ้า(V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลาการทำงานต่อวัน (h)	พลังงานที่ใช้ (Wh/วัน)
ESP32	5	0.15	0.75	24	18
ปั๊มน้ำตัวที่ 1	12	1.5	18	0.5	9
ปั๊มน้ำตัวที่ 2	12	1.5	18	0.5	9
เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน	3.3	0.02	0.066	24	1.58
เซ็นเซอร์วัดแสง	3.3	0.02	0.066	24	1.58

อุปกรณ์	แรงดันไฟฟ้า(V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	เวลาการทำงานต่อวัน (h)	พลังงานที่ใช้ (Wh/วัน)
รีเลย์ 2 Channel	5	0.1	0.5	0.5	0.25
โมดูล Wi-Fi (ESP32 ใช้)	5	0.08	0.4	24	9.6
แบตเตอรี่ AA (8 ก้อน)	12	~2.5 (max)	~30 (max)	-	พลังงานสำรอง

3.3.1 คำนวณพลังงานที่ใช้ทั้งหมดต่อวัน แสดงได้ดังสมการที่ 1

$$E_{total} = \Sigma P_i \times t_i \quad (1)$$

E_{total} = 18 + 9 + 9 +1.58 + 1.58 +0.125 +9.6

E_{total} = 49.01 Wh ต่อวัน

โดยที่ E_{total} คือ พลังงานรวมที่ใช้ต่อวัน (Wh), P_i คือ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ i (W) และ t คือ เวลาที่อุปกรณ์ที่ i ทำงานต่อวัน (ชั่วโมง)

ดังนั้น ระบบใช้พลังงานทั้งหมด 49.01 Wh ต่อวัน

3.3.2 คำนวณอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อชั่วโมง แสดงได้สมการที่ 2

$$P_{avg} = \frac{E_{total}}{t} \quad (2)$$

$$P_{avg} = \frac{E_{total}}{24}$$

$$P_{avg} = \frac{49.01}{24} = 2.04 \text{ W}$$

โดยที่ P_{avg} คือ อัตราการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อชั่วโมง (W), E_{total} คือ พลังงานที่ใช้ทั้งหมดต่อวัน (Wh), t คือ จำนวนชั่วโมงต่อวัน

ดังนั้น พลังงานเฉลี่ยที่ระบบใช้คือ 2.04 W ต่อชั่วโมง

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบรดน้ำและให้ปุ๋ยต้นไม้อัตโนมัติที่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน, ความเข้มแสง และอุณหภูมิ ทำงานร่วมกับ ESP32 เพื่อควบคุมกระบวนการให้น้ำและปุ๋ยโดยอัตโนมัติ ผู้ใช้สามารถควบคุมและติดตามสถานะของระบบได้ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ซึ่งรองรับการแจ้งเตือนและสั่งการจากระยะไกล ระบบนี้ได้รับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลพืช ลดการใช้แรงงาน และบริหารจัดการทรัพยากรน้ำและปุ๋ยให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถปรับปริมาณน้ำและปุ๋ยได้อัตโนมัติ ตามค่าความชื้นในดินและระดับแสงที่ได้รับ ทำให้พืชได้รับการดูแลอย่างเหมาะสม ระบบสามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ และช่วยให้ผู้ใช้ควบคุมและติดตามผลได้แบบเรียลไทม์ผ่านสมาร์ตโฟน นอกจากนี้ ระบบยังช่วยลดภาระงานของผู้ดูแล ลดการใช้น้ำและปุ๋ยเกินความจำเป็น ช่วยเพิ่มโอกาสให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Y. Irawan และคณะ [6] ซึ่งพัฒนาระบบรดน้ำอัตโนมัติโดยใช้ Arduino Uno และ ESP8266 เพื่อควบคุมการรดน้ำตามความชื้นในดิน พบว่าระบบของงานวิจัยนี้มีความสามารถในการควบคุมจากระยะไกลและการทำงานของ ESP32 ที่ดีกว่า เนื่องจาก ESP32 รองรับทั้ง Wi-Fi และ Bluetooth ทำให้สามารถควบคุมระบบได้จากระยะไกล และรองรับทั้งการรดน้ำและให้ปุ๋ยในระบบเดียวทำให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ทั้งในครัวเรือน ฟาร์มขนาดเล็ก และเกษตรกรรมขนาดใหญ่

อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัด เช่น ยังไม่มี AI สำหรับปรับการรดน้ำและให้ปุ๋ยตามชนิดพืช ซึ่งสามารถพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีสารสนเทศและมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่สนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] BSRU. (2025). *การเพิ่มพื้นที่สีเขียว: แนวทางเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน*. Retrieved from https://bsru.net/การเพิ่มพื้นที่สีเขียว/

[2] Aakunuri, M. (2024). Smart irrigation system using IoT. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 10*(1), 1–7.

[3] Ismaili, S., Idrizi, F., Rustemi, A., Ibraimi, M., & Idrizi, H. (2024, September 17–19). IoT-based irrigation system for smart agriculture. In *Proceedings of the XXXIII International Scientific Conference Electronics (ET2024)*, Sozopol, Bulgaria. IEEE.

[4] Naeophupha, A., Prommee, K., Takaew, W., Noykaew, S., Waipea, K., Nitiyarod, S., & Taweesup, W. (2018). The development of embedded system to control plantation watering system by environment analysis. *International Journal of Agricultural Technology, 1*(1), 2–3.

[5] G. S., V. S., Kavitha, D., & Chinnasamy, A. (2022). Smart plant watering system. In *Proceedings of the International Conference on Smart Technologies*, India.

[6] Irawan, Y., Sabna, E., Azim, A. F., Wahyuni, R., Belarbi, N., & Josephine, M. M. (2022). Automatic chili plant watering based on Internet of Things (IoT). In *International Conference on IoT and Smart Agriculture*, *3*(1), 79–81.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบเรียกรถสไลด์: แพลตฟอร์มกลางสำหรับการเชื่อมโยงผู้ใช้และผู้ให้บริการ

(Development of a Towing Car Booking System: A Central Platform for Connecting Users and Service Providers)

มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1] มาลิวรรณ บุญพลอย[2*] คุณาธิป อู่ทอง[3] และ ประธาน นิลสนธิ์[4]
[1]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
[2*]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
[3]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
[4]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
Email: maliwan.bo@spu.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ผ่านอุปกรณ์พกพา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการ โดยมุ่งเน้นการลดความล่าช้าในการให้บริการและเพิ่มความโปร่งใสผ่านระบบติดตามแบบเรียลไทม์ รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการงานสำหรับผู้ขับรถสไลด์ให้สามารถบริหารงานได้อย่างเป็นระบบ ผลการทดสอบพบว่า การใช้เทคโนโลยีการระบุตำแหน่งผ่าน GPS และการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์สามารถช่วยลดระยะเวลาในการค้นหารถสไลด์และเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้ใช้บริการอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการใช้แบบสอบถามเพื่อวัดความพึงพอใจของผู้ใช้ ซึ่งพบว่าผู้ให้บริการและผู้ใช้บริการมีระดับความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.63, *S.D.* = 0.45) และ ($\bar{X}$ = 4.62, *S.D.* = 0.58) ตามลำดับ โดยเฉพาะในด้านความสามารถในการค้นหารถสไลด์ที่อยู่ใกล้ผู้ใช้งานที่สุดและระบบติดตามสถานะรถสไลด์แบบเรียลไทม์ที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงถึง 4.70 และ 4.65 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแพลตฟอร์มนี้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถช่วยยกระดับมาตรฐานการให้บริการของธุรกิจขนส่งรถสไลด์ได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลในภาคขนส่งต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: แอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์, ระบบขนส่ง, การติดตามสถานะแบบเรียลไทม์, ความพึงพอใจของผู้ใช้

Abstract

This research aimed to design and develop a towing car booking application for mobile devices to enhance the efficiency of connecting service users with providers. The primary objective was to minimize service delays and improve transparency through a real-time tracking system. The study also focused on developing a job management module for tow truck drivers to facilitate systematic workflow management. The experimental results demonstrated that the integration of GPS-based location services and real-time notifications significantly reduced the average time required to locate available tow trucks and improved overall user convenience. Furthermore, a satisfaction survey was conducted to assess the usability of the system. The findings revealed high levels of satisfaction among both service providers ($\bar{X}$ = 4.63, S.D. = 0.45) and service users ($\bar{X}$ = 4.62, S.D. = 0.58). Specifically, features such as locating the nearest available truck and real-time tracking received high average scores of 4.70 and 4.65, respectively. These results indicate that the platform effectively addresses user needs and contributes to raising service standards in the towing service industry. The study provides valuable insights for the future development of digital platforms in the transportation sector.

Keywords: Towing Car Booking Application, Transportation System, Real-time Status Tracking, User Satisfaction

1. บทนำ

เทคโนโลยีดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการดำเนินธุรกิจในหลายอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในภาคบริการและขนส่งที่ต้องปรับตัวเข้าสู่แพลตฟอร์มออนไลน์ ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ แอปพลิเคชันการให้บริการยานพาหนะ [1-3] ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้บริโภค ลดข้อจำกัดด้านเวลา และเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนถึงความต้องการของผู้บริโภคที่มุ่งสู่ความรวดเร็วและความสะดวกสบายมากขึ้น

การให้บริการรถสไลด์เป็นอีกหนึ่งบริการที่มีความสำคัญสำหรับผู้ใช้ยานพาหนะที่ประสบปัญหารถเสีย อุบัติเหตุ หรือเหตุฉุกเฉินที่ต้องมีการเคลื่อนย้ายยานพาหนะ อย่างไรก็ตาม การให้บริการในรูปแบบเดิมที่ต้องติดต่อผ่านศูนย์บริการหรือโทรศัพท์โดยตรงอาจทำให้เกิดความล่าช้าในการค้นหาผู้ให้บริการที่พร้อมให้บริการในบริเวณใกล้เคียง

นอกจากนี้ การขาดระบบติดตามสถานะการให้บริการอาจส่งผลต่อประสบการณ์ของผู้ใช้และประสิทธิภาพของผู้ให้บริการ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันการให้บริการรถสไลด์ผ่านอุปกรณ์พกพา โดยเน้นการเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้บริการและคนขับรถสไลด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการงานที่ช่วยให้คนขับสามารถบริหารจัดการงานของตนเองได้อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งมีระบบติดตามแบบเรียลไทม์และการคำนวณเส้นทางที่ดีที่สุดเพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางและเพิ่มความปลอดภัย ซึ่งผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้จะสามารถยกระดับมาตรฐานการให้บริการรถสไลด์ และเป็นแนวทางในการพัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับภาคขนส่งในอนาคต

ทั้งนี้ การประเมินประสิทธิภาพของระบบได้ดำเนินการผ่านการทดลองใช้งานจริง โดยวัดจากระดับความพึงพอใจของผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการ ซึ่งใช้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ในการยืนยันคุณภาพของแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

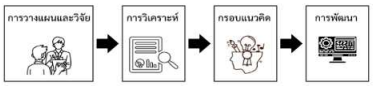
งานวิจัยของ Hadinata และคณะ [4] ได้นำเสนอระบบการจองรถสไลด์ผ่านแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งของลูกค้าและพัฒนาด้วย PHP และ MySQL ในรูปแบบ Client-Server อย่างไรก็ตาม ระบบถูกออกแบบให้รองรับพื้นที่ให้บริการเฉพาะบางพื้นที่ ไม่มีระบบติดตามสถานะการขนส่งแบบเรียลไทม์ ขาดระบบแจ้งเตือนทำให้การสื่อสารระหว่างผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการอาจล่าช้า นอกจากนี้ ระบบยังไม่ได้รองรับการบริหารจัดการงานของคนขับอย่างเป็นระบบ

งานวิจัยของ Saputro และคณะ [5] ได้ศึกษาและพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการให้บริการรถสไลด์ โดยเน้นไปที่กระบวนการสั่งจองบริการขนย้ายยานพาหนะที่เสียหายหรือขัดข้อง ซึ่งแอปพลิเคชันนี้ช่วยให้ผู้ใช้บริการสามารถค้นหาผู้ให้บริการที่อยู่ใกล้ที่สุด ติดตามสถานะ และเข้าถึงข้อมูลเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายและเวลาที่คาดการณ์ ผลการศึกษาสรุปว่าแม้ระบบสามารถใช้งานได้จริง แต่ยังต้องมีการปรับปรุงด้านเทคนิคและการบริหารจัดการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของแอปพลิเคชัน

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ซึ่งออกแบบมาเพื่อเป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้บริการและคนขับรถสไลด์ โดยมีฟังก์ชันหลักที่ครอบคลุมทั้งการค้นหารถสไลด์ที่พร้อมให้บริการ การระบุจุดรับและส่งที่แม่นยำ การติดตามสถานะการขนส่งและการบันทึกภาพก่อนและหลังการขนส่ง เพื่อสร้างความมั่นใจในการให้บริการ นอกจากนี้ยังมีระบบจัดการงานที่ช่วยให้คนขับสามารถจัดการงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการคำนวณเส้นทางที่ดีที่สุดเพื่อให้การบริการเป็นไปอย่างรวดเร็วและปลอดภัย พร้อมวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในแง่ของความสะดวก ความปลอดภัย และความน่าเชื่อถือของข้อมูลในบริบทของประเทศไทย

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินผลแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อเป็นตัวกลางระหว่างผู้ใช้และผู้ให้บริการ โดยแอปพลิเคชันนี้มีฟังก์ชันหลักที่ครอบคลุมการค้นหารถสไลด์ที่พร้อมให้บริการ การติดตามสถานะการขนส่งแบบเรียลไทม์ และการบันทึกข้อมูลสำคัญเพื่อสร้างความมั่นใจในการให้บริการ กระบวนการดำเนินงานของการพัฒนาระบบแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1 และอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 3.1 - 3.4



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาข้อมูลและการวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อทำความเข้าใจปัญหาและความต้องการของผู้ใช้บริการรถสไลด์ โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มเป้าหมายที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมบริการรถสไลด์ ทั้งผู้ใช้บริการและผู้ให้บริการผ่านกระบวนการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) และการสร้าง User Persona เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดและสามารถนำไปวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 การออกแบบ

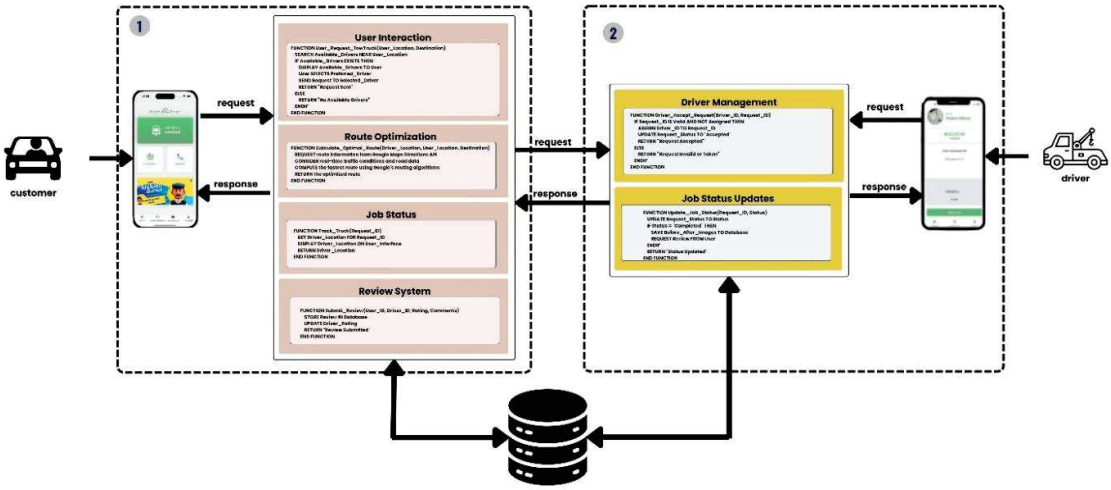
จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาขั้นต้น ผู้วิจัยได้นำมาออกแบบกรอบแนวคิดการทำงานของแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ โดยกำหนดโครงสร้างของระบบออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1. ส่วนของผู้ใช้บริการ ผู้ใช้สามารถเรียกรถสไลด์ผ่านแอปพลิเคชันโดยระบุพิกัดรับ-ส่งผ่านระบบ GPS และสามารถติดตามสถานะการขนส่งแบบเรียลไทม์ อีกทั้งยังมีระบบแจ้งเตือนที่จะแจ้งข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับสถานะของคำขอ เช่น การยืนยันการรับงานจากผู้ให้บริการ การอัปเดตสถานะการขนส่ง และการแจ้งเตือนเมื่อการขนส่งเสร็จสมบูรณ์

2. ส่วนของผู้ให้บริการ ผู้ให้บริการสามารถรับคำขอเรียกรถจากผู้ใช้ผ่านแอปพลิเคชัน โดยมีระบบช่วยจัดลำดับงานและเลือกงานที่ต้องการรับ อีกทั้งผู้ให้บริการสามารถบันทึกและอัปโหลดภาพก่อนและหลังการขนส่งเพื่อใช้เป็นหลักฐานยืนยันการให้บริการ

3. ส่วนของเซิร์ฟเวอร์และฐานข้อมูล ทำหน้าที่จัดการและประมวลผลคำขอเรียกรถ โดยเมื่อมีผู้ใช้ทำการร้องขอระบบจะค้นหารถ

สไลด์ที่อยู่ใกล้เคียง เพื่อให้การจับคู่งานระหว่างผู้ใช้และผู้ให้บริการ นอกจากนี้ เซิร์ฟเวอร์ยังมีหน้าที่จัดเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น พิกัดตำแหน่งของผู้ใช้และผู้ให้บริการ ประวัติการขนส่ง รวมถึงรายละเอียดการชำระเงิน โดยสามารถแสดงกรอบแนวคิดการทำงานของแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการทำงานของแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์

3.3 การพัฒนาและทดสอบ

ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบโดยใช้เทคโนโลยีหลัก เช่น React Native สำหรับการพัฒนาแอปพลิเคชัน Node.js สำหรับการทำงานฝั่ง Backend และ MySQL สำหรับการจัดเก็บข้อมูล นอกจากนี้ แอปพลิเคชันได้รับการทดสอบในหลายด้าน ได้แก่ การทดสอบฟังก์ชันการทำงาน การทดสอบความเสถียร และการทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อให้มั่นใจว่าแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง มีความเสถียรและรองรับการใช้งานในสภาวะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.4 การประเมินผล

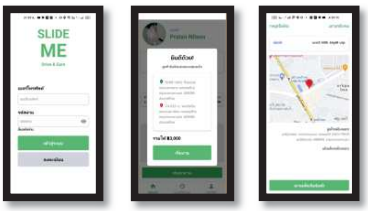
การวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์โดยกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยผู้ให้บริการ 5 ราย และผู้ใช้บริการ 20 ราย เครื่องมือที่ใช้คือแบบสอบถามความพึงพอใจ ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) พร้อมเปรียบเทียบกับเกณฑ์ระดับความพึงพอใจ 5 ระดับ (มากที่สุด - น้อยที่สุด) และการแปลความหมายดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การแปลความหมายระดับความพึงพอใจ

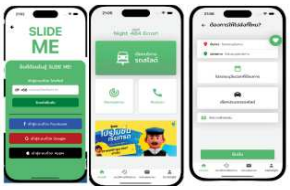
ระดับคะแนนเฉลี่ย	ระดับการวัดความพึงพอใจ
4.51-5.00	ความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก
3.51-4.50	ความพึงพอใจอยู่ในระดับดี
2.51-3.50	ความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง
1.51-2.50	ความพึงพอใจอยู่ในระดับพอใช้
1.00-1.50	ความพึงพอใจอยู่ในระดับปรับปรุง

4. ผลการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ตามขั้นตอนการวิจัย โดยนำข้อมูลจากการศึกษา วิเคราะห์ และพัฒนาแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 แอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ส่วนของผู้ให้บริการ



รูปที่ 4 แอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ส่วนของผู้ใช้บริการ

ผู้วิจัยได้ประเมินผลความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ จากนั้นนำผลการสอบถามมาวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติพื้นฐานเทียบกับเกณฑ์และสรุปผล ดังตารางที่ 2 และ 3

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ส่วนผู้ให้บริการ

รายการ	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ประสิทธิภาพในการทำงาน			
1.1 แอปพลิเคชันสามารถตอบสนองต่อการใช้งานได้รวดเร็ว	4.60	0.55	ระดับดีมาก

รายการ	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1.2 แอปพลิเคชันสามารถค้นหางานที่อยู่ใกล้เคียงทำงานได้อย่างแม่นยำ	5.00	0.00	ระดับดีมาก
1.3 แอปพลิเคชันสามารถประมวลผลเส้นทางได้อย่างถูกต้อง	4.60	0.55	ระดับดีมาก
1.4 แอปพลิเคชันสามารถระบุตำแหน่งของผู้ใช้บริการได้อย่างแม่นยำ	4.80	0.45	ระดับดีมาก
รวม	**4.75**	**0.39**	**ระดับดีมาก**
2. ความสะดวกในการใช้งาน			
2.1 แอปพลิเคชันมีเมนูที่เข้าใจง่ายและใช้งานสะดวก	4.80	0.45	ระดับดีมาก
2.2 มีการใช้ภาษาที่ง่ายต่อความเข้าใจ	4.00	0.71	ระดับดี
2.2 ระบบแจ้งเตือนสถานะงานมีความชัดเจนและตรงเวลา	4.40	0.55	ระดับดี
รวม	**4.76**	**0.40**	**ระดับดีมาก**
โดยรวม	**4.63**	**0.45**	**ระดับดีมาก**

จากตารางที่ 2 ผู้ให้บริการมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.63, *S.D.* = 0.45) เมื่อพิจารณาในแต่ละด้าน พอสรุปได้ดังนี้ ด้านประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.75, *S.D.* = 0.39) และด้านความสะดวกในการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.63, *S.D.* = 0.45)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อแอปพลิเคชันเรียกรถสไลด์ส่วนผู้ใช้บริการ

รายการ	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1. ประสิทธิภาพในการทำงาน			
1.1 แอปพลิเคชันสามารถค้นหารถสไลด์ที่พร้อมให้บริการได้อย่างรวดเร็ว	4.70	0.57	ระดับดีมาก
1.2 แอปพลิเคชันสามารถระบุตำแหน่งของผู้ให้บริการได้อย่างแม่นยำ	4.60	0.60	ระดับดีมาก
1.3 แอปพลิเคชันสามารถอัปเดตสถานะการขนส่งแบบเรียลไทม์ได้อย่างถูกต้อง	4.65	0.59	ระดับดีมาก
1.4 ระยะเวลาตอบสนองของแอปพลิเคชันในการประมวลผลคำขอรวดเร็ว	4.45	0.60	ระดับดี
รวม	**4.60**	**0.59**	**ระดับดีมาก**
2. ความสะดวกในการใช้งาน			
2.1 แอปพลิเคชันมีเมนูที่เข้าใจง่ายและใช้งานสะดวก	4.60	0.60	ระดับดีมาก
2.2 มีการใช้ภาษาที่ง่ายต่อความเข้าใจ	4.80	0.52	ระดับดีมาก
2.2 ระบบแจ้งเตือนสถานะงานมีความชัดเจนและตรงเวลา	4.55	0.60	ระดับดีมาก
รวม	**4.65**	**0.58**	**ระดับดีมาก**
โดยรวม	**4.62**	**0.58**	**ระดับดีมาก**

จากตารางที่ 3 ผู้ใช้บริการมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.62, *S.D.* = 0.58) เมื่อพิจารณาในแต่ละด้าน พอสรุปได้ดังนี้ ด้านประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.60, *S.D.* = 0.59) และด้านความสะดวกในการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.65, *S.D.* = 0.58)

5. สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบการให้บริการรถสไลด์ผ่านอุปกรณ์พกพา โดยเน้นการเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้บริการและคนขับรถสไลด์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการงานที่ช่วยให้คนขับสามารถบริหารจัดการงานของตนเองได้อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งมีระบบติดตามแบบเรียลไทม์และการคำนวณเส้นทางที่ดีที่สุดเพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางและเพิ่มความปลอดภัย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tajne และคณะ [6] ที่พัฒนาแพลตฟอร์มบริการรถลากออนไลน์โดยใช้เทคโนโลยีเว็บเบส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในการให้บริการ ระบบติดตามตำแหน่งแบบเรียลไทม์และการคำนวณเส้นทางที่ดีที่สุดเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ได้รับการยืนยันว่ามีส่วนช่วยลดระยะเวลาการให้บริการและเพิ่มความพึงพอใจของผู้ใช้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างด้านพื้นที่ให้บริการ โครงสร้างพื้นฐานของเครือข่าย และพฤติกรรมการใช้บริการในแต่ละประเทศ อาจมีผลต่อประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันที่พัฒนาในบริบทที่แตกต่างกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีสารสนเทศและมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่สนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Chaganti, S. R., & Savant, P. (2022). A survey on car service slot booking system. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET),* 10(4), 1072–1074.

[2] Pankaen, S., Phiw-on, P., & Sihawong, K. (2024). Development of an online used car booking system. *Chalermkarnchana Academic Journal*, *10*(2), 144–155. Retrieved from https://so19.tci-thaijo.org/index.php/cnujournal/article/view/1147

[3] สุทธิกร กิ่งแก้ว. (2019). อุตสาหกรรมการให้บริการยานพาหนะผ่านทางแอปพลิเคชัน (Ride-hailing service): *บทบาทในการสนับสนุนเศรษฐกิจไทยและความจำเป็นในการพัฒนาหลักเกณฑ์และ กฎหมายให้ตอบโจทย์การพัฒนาที่ยั่งยืน*. กรุงทพมหานคร:ศูนย์ให้คำปรึกษาและพัฒนาผู้บริหารทางธุรกิจแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[4] Hadinata, S., Muhsina, E. A., & Sugiantoro, B. (2015). Towing car booking system using android and web-based application. *International Journal on Informatics for Development*, 4(1), 30-33.

[5] Saputro, R. E., Afisa, T., Hendratno, D. S. P., Reginawati, T., Hilal, A., & Ambarwati, D. (2023). How implementation of roadside towing application to increase interest in using car towing services? *Innovation Business Management and Accounting Journal, 2(4),* 239–247. https://doi.org/10.56070/ibmaj.v2i4.67

[6] Tajne, K., Patil, P., & More, S. (2024). Comprehensive Towing Services Online. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. Retrieved from https://www.ijraset.com/research-paper/comprehensive-towing-services-online

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไ ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประยุกต์ใช้เทคโนโล ีซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์สำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้าอัตโนมัติ

Apply of Robotic Process Automation Technology for Automatically Linking Information between Sales and Logistics Department

พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี[1*] สุเมธ ดาราพิสุทธิ์[1] ศรีชล ภิรมย์ลาภ[1] มนตรี อารีย์[2] นพรุจ เขียวนาค[3] และ นภสร จินนิกร[1]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีโลจิสติกส์และการจัดการระบบขนส่ง คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออ
E-mail: pongpat_si@rmutto.ac.th[*], sumet_da@rmutto.ac.th, srichol_ph@rmutto.ac.th, montri_ar@rmutto.ac.th, nopparut_kh@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์สำหรับเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้าอัตโนมัติ จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและช่วยเหลือการทำงานของระบบภายใน บริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค กรุ๊ป จำกัด โดยการใช้ UiPath Platform ที่มีการทำงานในลักษณะ RPA ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมมนุษย์ทำงานร่วมกับ Infor LN ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำหรับธุรกิจโรงงานและธุรกิจที่มีการผลิต เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการทำงานที่มีลักษณะทำซ้ำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น ผลการพัฒนา พบว่า การทำงานเป็นไปตามที่ผู้ใช้งานต้องการและสามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็วโดยอัตโนมัติ ช่วยลดระยะเวลาในการรับคำร้องขอ สะดวกในการใช้งานและการตรวจสอบ ทั้งยังสามารถช่วยลดความผิดพลาดและการสูญหายของข้อมูลได้ ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก

คำสำคัญ: ซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์, การเชื่อมโยงข้อมูลอัตโนมัติ, ลดระยะเวลาในการทำงาน

Abstract

Apply of Robotic Process Automation Technology for Automatically Linking Information between Sales and Logistics Department was developed to enhance and support the internal operations of Thai Summit P.K.K. Group Co., Ltd. This system utilizes the UiPath Platform, which functions as a Robotic Process Automation (RPA) solution. The RPA software robots, designed to replicate human actions, work in conjunction with Infor LN, an enterprise resource planning (ERP) software tailored for manufacturing and factory-based businesses. The primary objective of this integration is to streamline repetitive tasks, significantly reducing processing time and improving operational efficiency. The development results demonstrate that the system meets user requirements, enabling seamless automation and faster execution. Additionally, it minimizes request processing time, enhances usability and monitoring, and reduces errors and data loss. The evaluation of the overall system efficiency was at a very good level (4.91).

Keywords: Robotic process automation, Automate linking information, Reduces work time

1. บทนำ

การใช้ระบบอัตโนมัติ [1] เช่น Robotic Process Automation (RPA) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในภาคธุรกิจ เนื่องจา สามารถช่วยลดภาระงานที่ต้องทำซ้ำ เพิ่มความแม่นยำ และลดข้อผิดพลาดของมนุษย์ โดยเฉพาะในกระบวนการทำงานระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้า ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการดำเนินธุรกิจที่ต้องการความถูกต้องและรวดเร็วในการจัดการข้อมูลคำสั่งซื้อและการขนส่งสินค้า

การดำเนินงานระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้าขององค์กรส่วนใหญ่ [2] มักต้องใช้ทรัพยากรบุคคลจำนวนมา ในการประมวลผลข้อมูล ตั้งแต่การรับคำสั่งซื้อ การตรวจสอบสถานะสินค้าคงคลัง ไปจนถึงการจัดเตรียมเอกสารขนส่ง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความล่าช้าและข้อผิดพลาดในการประสานงาน การนำ RPA [3] มาใช้ในกระบวนการเหล่านี้สามารถช่วยให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยซอฟต์แวร์ RPA สามารถดึงข้อมูลจากระบบฝ่ายขาย นำมาประมวลผลและเชื่อมโยงกับระบบของฝ่ายจัดส่งโดยอัตโนมัติ ลดขั้นตอนที่ต้องใช้แรงงานคนและเพิ่มความรวดเร็วในการดำเนินการ นอกจากนี้ การนำ

RPA มาประยุกต์ใช้ [4] ในกระบวนการดังกล่าวยังช่วยให้บริษัทสามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงได้ดีขึ้น ลดต้นทุนการดำเนินงาน และเพิ่มความพึงพอใจให้กับลูกค้า เนื่องจากสามารถตอบสนองคำสั่งซื้อได้อย่างแม่นยำและทันเวลา

บริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค กรุ๊ป จำกัด Thai Summit PKK Co.,Ltd. เป็นผู้นำในด้านการผลิต Chassis Frame และ Axle สำหรับรถบรรทุก ขนาด 1 ตัน ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยและอยู่ในแนวหน้าของโลก เริ่มก่อตั้งเมื่อปี 1989 โดยปัจจุบันมีกลุ่มลูกค้าที่สำคัญ ได้แก่ ISUZU, MAZDA, FORD, NISSAN, MITSUBISHI, HINO และ VOLVO

ซึ่งงานในฝ่าย IT (Information Technology) ของบริษัทมีหน้าที่ดำเนินงานเกี่ยวกับข้อมูลภายในระบบและเครือข่ายของบริษัท เช่น การดูแลระบบข้อมูลภายใน การจัดระเบียบข้อมูล และงานอื่นที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น เนื่องจากงานที่จะต้องทำเกี่ยวกับระบบภายในมีค่อนข้างมาก เช่น การสร้างโปรแกรมอัตโนมัติตามที่ผู้ใช้ร้องขอมา และพนักงานที่มีหน้าที่พัฒนาระบบในส่วนนี้มีจำนวนน้อย จึงมีหลายโครงการที่ต้องพัฒนาให้แต่ละโครงการต้องใช้เวลาในการดำเนินการมาก และทำให้งานบางอย่างดำเนินการค่อนข้างล่าช้า

ผู้พัฒนาได้เห็นถึงความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงรับหน้าที่พัฒนาระบบเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างฝ่ายขายและฝ่ายจัดส่งสินค้าอัตโนมัติเพื่อช่วยลดระยะเวลาการทำงานที่เป็นรูปแบบซ้ำ ๆ และต้องทำประจำ เพื่อช่วยลดปริมาณงานและลดระยะเวลาการทำงานให้กับพนักงานที่รับผิดชอบงานในส่วนนี้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

ส่วนประกอบที่ใช้ในการสร้างซอฟต์แวร์โรบอทที่เลียนแบบพฤติกรรมของมนุษย์ (Robotic Process Automation; RPA) เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อัตโนมัติ ประกอบไปด้วย

1. Microsoft Excel ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลของลูกค้า ซึ่งข้อมูลจะถูกดาวน์โหลดมาจัดเก็บในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าต่อไป โดยใช้เพื่อจัดเรียงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ต่อได้

2. UiPath Platform [5-12] เป็นเครื่องมือชั้นนำในระบบ RPA ได้รับการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากคุณสมบัติที่ครอบคลุม ใช้งานง่าย และการสนับสนุนชุมชนที่แข็งแกร่งการใช้งานครอบคลุมหลายภาคส่วน รวมถึงการเงิน การดูแลสุขภาพ การผลิต และการค้าปลีก ซึ่งจะทำงานซ้ำ ๆ โดยอัตโนมัติเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนอย่างไรก็ตามการใช้งาน UiPath และ RPA โดยทั่วไปไม่ได้ปราศจากความท้าทาย เช่น ความซับซ้อนในการบูรณาการและความจำเป็นในการอัปเดตอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งแนวโน้มในอนาคตบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบอัตโนมัติที่มีกระบวนการอัจฉริยะ (IPA) จากการผสานรวม AI เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงาน

3. Infor LN [13-17] คือ ซอฟต์แวร์ ERP ครบวงจรสำหรับธุรกิจโรงงานและธุรกิจที่มีการผลิต โดยเข้ามาช่วยจัดการกับกระบวนการของธุรกิจที่มีการผลิตตั้งแต่ต้นจนจบ โดยมีฟีเจอร์สำหรับจัดการ เช่น การเสนอราคา, การขาย, รับออเดอร์, วางแผนโครงการผลิต, ออกแบบผลิตภัณฑ์, ติดต่อ Supply Chain (Supplier) ซึ่งครอบคลุมทั้งหมดของ Supply Chain ไปจนถึงการส่งสินค้าและการให้บริการหลังการขาย โดย Infor LN มีให้บริการทั้งในรูปแบบ Cloud และ On-Premise

2.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการออกแบบขั้นตอนการทำงานตามกรอบแนวคิดได้ขั้นตอนการทำงานในภาพรวม ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะใช้งานซอฟต์แวร์ทั้ง 3 ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น มาดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้



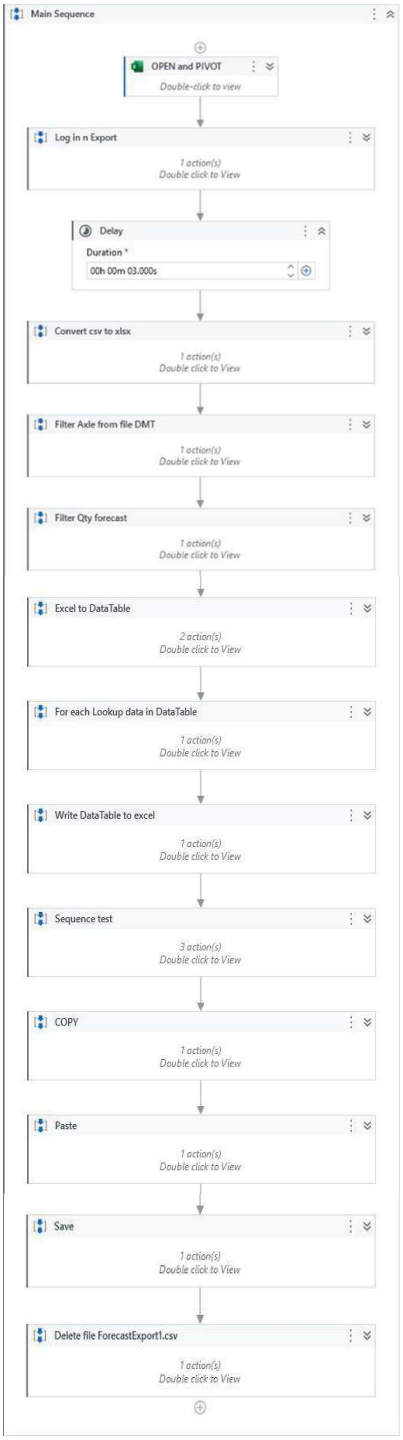
รูปที่ 1 กรอบแนวคิด

1. นำเข้าข้อมูลจากเว็บไซต์ของลูกค้า ในกรณีศึกษานี้ใช้ข้อมูลจาก MITSUBISHI MOTORS โดยทำการดาว์นโหลดข้อมูลมาจัดเก็บในรูปแบบนามสกุล .xlsx

2. ใช้แอปพลิเคชัน UiPath Studio ในการสร้างลำดับการทำงาน (Workflow) ในรูปแบบทำงานทีละขั้นตอน (Process Sequence) ดังรูปที่ 2 พร้อมตั้งค่าการทำงานของแต่ละการทำงาน (Process) ดังต่อไปนี้

2.1. เลือกเครื่องมือ Excel แล้วให้ทำการเลือกไฟล์ที่ต้องการให้ระบบอ่าน ในเครื่องมือ Excel Filer ทำการเลือก Sheet งาน

และ Column ที่ต้องการเรียกใช้ เพื่อให้ระบบทำการอ่านข้อมูลและทำการ Pivot ให้โดยอัตโนมัติผ่าน Excel



รูปที่ 2 ลำดับการทำงานใน UiPath Studio

2.2 ใช้เครื่องมือ Use Application เพื่อทำการเรียกโปรแกรม Infor LN โดยการเลือกผ่าน Target application จากนั้นใส่ Username และ Password สำหรับเข้าสู่ระบบของโปรแกรม Infor LN

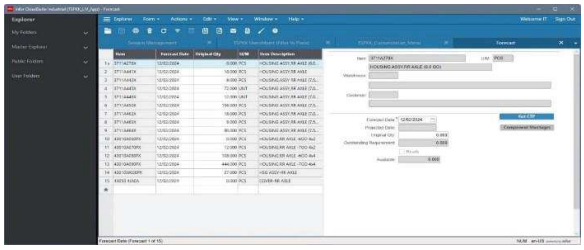
2.3 ทำการตั้งค่าต่าง ๆ เพื่อให้สามารถเข้าถึงฐานข้อมูลของบริษัทได้ และใช้เครื่องมือ Excel Process scope โดยเลือกใช้ Foreach excel row เพื่อเรียกให้ระบบเรียกอ่านข้อมูลเพียงแถวเดียวตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งระบบจะเรียกข้อมูลผลลัพธ์รวมทั้งหมดที่ได้จาก process ก่อนหน้า ที่ได้เลือกส่วนของ Vlookup และ Pivot มาทำการบันทึกข้อมูลเก็บไว้ในส่วนนี้ ข้อมูลที่บันทึกออกมาจะอยู่ในรูปแบบ .csv

2.4 บันทึกผลลัพธ์ที่ได้

3. ใช้แอปพลิเคชัน Infor CloudSuite Industrial ในการดึงข้อมูลจาก UiPath Studio มาทำการจัดเก็บและแสดงผลลัพธ์

3. ผลการทดลอง

เมื่อ Process การทำงานของระบบเสร็จสิ้นทั้งหมดแล้วระบบก็จะทำการแสดงผลลัพธ์ภายในโปรแกรม Infor จากจากนั้นให้ทำการกดปุ่ม Public หรือปุ่ม Run บนตัว UiPath ระบบก็จะสามารถดำเนินงานส่งข้อมูลการสั่งซื้อจากฝ่ายขายไปให้ฝ่ายจัดส่งสินค้าตามที่ได้ตั้งไว้ทั้งหมดอัตโนมัติแบบเวลาจริง (Realtime) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลลัพธ์การทำงานของระบบ

จากการประเมินผลประสิทธิภาพระบบจากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งสิ้น 16 คน พบว่า อยู่ในระดับดีมาก ที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.91

ข้อเสนอแนะจากการพัฒนาระบบ พบว่า การทำงานของ Uipath ยังมีข้อจำกัดการทำงานกับโปรแกรม Infor อยู่บ้าง ทำให้เกิดการทำงานที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณฝ่ายงานเทคโนโลยีสารสนเทศ บริษัท ไทยซัมมิท พีเคเค กรุ๊ป จำกัด (Thai Summit PKK Co.,Ltd.) ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Aguirre and A. Rodriguez. (2017). "Automation of a Business Process Using Robotic Process Automation (RPA): A Case Study," in Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2017. Communications in Computer and Information Science, vol. 742, Springer, Cham, pp. 65-71, doi: 10.1007/978-3-319-66963-2_7.

[2] W. Van der Aalst, M. Bichler, and A. Heinzl. (2018). "Robotic Process Automation," Bus Inf Syst Eng 60, pp. 269–272, doi: 10.1007/s12599-018-0542-4.

[3] M. C. Lacity and L. P. Willcocks. (2017). "Robotic process automation and risk mitigation: The definitive guide," SB Publishing, ISBN-13: 978-0-9956820-3-0.

[4] R. Syed, S. Suriadi, M. Adams, W. Bandara, S. Leemans, C. Ouyang, A. Ter, I. Van de Weerd, M. Wynn, and H. Reijers. (2020). "Robotic process automation: Contemporary themes and challenges," in Journal of Computers in Industry, vol. 115, no. 1, ISSN: 0166-3615, doi: 10.1016/j.compind.2019.103162.

[5] S. M. Potturu. (2023). "Uipath bot framework: accelerating rpa development and innovation," IJRDO-Journal of Computer Science Engineering, doi: 10.53555/cse.v9i4.5853.

[6] S. Sistla. (2024). "RPA in Financial Software: Driving Efficiency; Reducing Costs," Journal of Engineering and Applied Sciences Technology, pp. 1–6, doi: 10.47363/jeast/2024(6)277.

[7] S. S. K. Yadav and G. Mishra. (2024). "Robotic Process Automation Applications Across Industries: An Exploration," pp. 26–32, doi: 10.1109/ic3i61595.2024.10828986.

[8] C. M. R. Picado, L. Latorre, E. R. Rego, L. De Leo, and M. Gutiérrez. (2024). "Tech Report: RPA," Accessed: Mar. 8, 2025. [Online]. Available: https://publications.iadb.org/publications/english/document/Tech-Report-RPA.pdf

[9] S. Treacy, A. Adyanthaya, C. Kearny, J. Anand, K. O'Sullivan, and Y. Xu. (2023). "From Hype to Reality: Navigating the Challenges of RPA Implementation," doi: 10.34190/ecie.18.2.1721.

[10] J. Siderska, L. Aunimo, T. Süße, J. von Stamm, D. Kedziora, and S. N. B. Mohd Aini. (2023). "Towards Intelligent Automation (IA): Literature Review on the Evolution of Robotic Process Automation (RPA), its Challenges, and Future Trends," Engineering Management in Production and Services, vol. 15, pp. 90–103, doi: 10.2478/emj-2023-0030.

[11] A. P. Jyothi, A. Shankar, A. Narayan, H. Maniyar, N. Sr, and S. Ambarkhane. (2024). "Robotic Process Automation: In-Depth Analysis of Advanced Automation Techniques and Technologies," pp. 1–6, doi: 10.1109/inc460750.2024.10649336.

[12] D. Pramod. (2021). "Robotic process automation for industry: adoption status, benefits, challenges and research agenda," Benchmarking: An International Journal, doi: 10.1108/BIJ-01-2021-0033.

[13] D. Eul and U. Rey. (2000). "Einführung von umweltorientierten Funktionalitäten in ERP-Systemen," Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 205–225, doi: 10.1007/978-3-642-59761-9_7.

[14] A. Elyacoubi, H. Attariuas, and N. Aknin. (2017). "An Intelligent Model for Enterprise Resource Planning Selection Based on BP Neural Network," Springer, Cham, pp. 212–222, doi: 10.1007/978-3-319-74500-8_19.

[15] V. Tilokavichai and P. Sophatsathit. (2011). "An Organization-wide Analysis of ERP and Information Systems Interrelationship for Logistics Support," in Journal of System and Management Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 59–68.

[16] T. Hewavitharana, A. Perera, and S. Nanayakkara. (2019). "Prioritizing Enterprise Resource Planning (ERP) Systems for Small and Medium Enterprises," in THE RESEARCH JOURNAL (TRJ), vol. 5, pp. 1-7, ISSN: 2454-4930.

[17] E. Erturk and J. K. Arora. (2017). "An Exploratory Study on the Implementation and Adoption of ERP Solutions for Businesses," in Journal of Computers and Society. https://arxiv.org/pdf/1701.08329


พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก


สุเมธ ดาราพิสุทธิ์
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก


ศรีชล ภิรมย์ลาภ
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพยากรณ์และการวิเคราะห์การลาออกของพนักงานด้วยโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและระบบธุรกิจอัจฉริยะ

Employee Attrition Prediction and Analysis Using a Support Vector Machine Model and Business Intelligence System

สุเมธ ดาราพิสุทธิ์ ศรีชล ภิรมย์ลาภ* และ พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี
สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
43 หมู่ที่ 6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110
E-mail: sumet_da@rmutto.ac.th; *Corresponding author: srichol_ph@rmutto.ac.th; pongpat_si@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

การลาออกของพนักงานเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพขององค์กร โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูง งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพยากรณ์และวิเคราะห์การลาออกของพนักงานโดยใช้โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนร่วมกับระบบธุรกิจอัจฉริยะด้วยโปรแกรม Power BI ในการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการลาออกของพนักงาน จากผลการทดสอบด้วย Precision, Recall และ F1-score แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถพยากรณ์การลาออกได้อย่างแม่นยำ และองค์กรต่าง ๆ สามารถนำขั้นตอนวิธีนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อวางแผนและพัฒนากลยุทธ์ในการรักษาพนักงานให้อยู่ในองค์กรในระยะยาวได้

คำสำคัญ: การลาออกของพนักงาน, ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน, ระบบธุรกิจอัจฉริยะ

Abstract

Employee attrition is a critical issue that affects organizational stability, especially in highly competitive industries. This study presents an employee attrition prediction and analysis model using Support Vector Machine (SVM) combined with a Business Intelligence system through Power BI to analyze factors influencing employee resignation. The evaluation results using Precision, Recall, and F1-score demonstrate that the developed model accurately predicts employee attrition. Organizations can apply the proposed approach to plan and develop strategies for long-term employee retention.

Keywords: Employee Attrition, Support Vector Machine, Business Intelligence

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาการลาออกของพนักงาน [1] กลายเป็นประเด็นที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูง องค์กรต้องเผชิญกับต้นทุนและระยะเวลาในการสรรหาและฝึกอบรมพนักงานใหม่ เพื่อทดแทนตำแหน่งที่ว่างลงและรักษาประสิทธิภาพการทำงานขององค์กรให้อยู่ในระดับที่มั่นคงหรือดีขึ้น นอกจากนี้ อัตราการลาออกของพนักงานยังถือเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่สะท้อนถึงเสถียรภาพขององค์กร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดึงดูดบุคลากรที่มีศักยภาพสูงเข้าสู่องค์กร

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการลาออกของพนักงานมีความหลากหลาย อาทิ ความพึงพอใจในงานที่ได้รับมอบหมาย โอกาสในการพัฒนาทักษะ และค่าตอบแทน การศึกษาปัจจัยเหล่านี้จึงมีความสำคัญในการคาดการณ์พนักงานที่มีแนวโน้มจะลาออกในอนาคต ซึ่งจะช่วยให้องค์กรสามารถลดต้นทุนและเวลาในการสรรหาและฝึกอบรมพนักงานใหม่ รวมถึงพัฒนากลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพในการรักษาพนักงานให้อยู่กับองค์กรในระยะยาว

งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาโมเดลพยากรณ์การลาออกของพนักงานโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง รูปแบบต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้มักไม่ได้รวมการวิเคราะห์ร่วมกับระบบธุรกิจอัจฉริยะ (Business Intelligence) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจผ่านการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงลึก ทั้งสองแนวทางสามารถช่วยให้องค์กรเข้าใจแนวโน้มการลาออกได้อย่างรอบด้านมากขึ้น และนำไปสู่การพัฒนามาตรการที่มีประสิทธิภาพในการบริหารจัดการทรัพยากรบุคคล ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine, SVM) ร่วมกับระบบธุรกิจอัจฉริยะ เพื่อใช้ในการพยากรณ์และวิเคราะห์การลาออกของพนักงาน โดยโมเดลซัพ

พอร์ตเวกเตอร์แมชชีน เป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมในด้านการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีจำนวนคุณลักษณะไม่มากและขนาดข้อมูลอยู่ในระดับปานกลาง ทำให้เหมาะสมกับบริบทของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ ระบบธุรกิจอัจฉริยะได้ถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อการลาออกของพนักงานผ่านโปรแกรม Power BI จากการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมชชีน ด้วยขั้นตอนวิธี Precision, Recall และ F1-score และแบบประเมินความพึงพอใจของระบบธุรกิจอัจฉริยะ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับที่ดี และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในองค์กรต่าง ๆ ได้จริง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

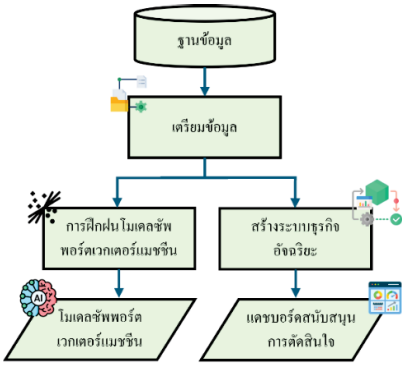
โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine, SVM) [2][3] เป็นขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้สำหรับการจำแนกประเภทและการถดถอย โดยการสร้างเส้นแบ่งข้อมูลหรือ Hyperplane ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อแยกกลุ่มข้อมูลออกจากกัน ขั้นตอนวิธีนี้มุ่งเน้นการเพิ่มระยะห่างระหว่างเส้นแบ่งและข้อมูลที่อยู่ใกล้ที่สุด (Support Vectors) เพื่อให้เกิดความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่แม่นยำ โดย SVM สามารถขยายขีดความสามารถโดยใช้สมการเคอร์เนล (Kernel) เพื่อให้สามารถจำแนกข้อมูลที่ไม่เป็นเส้นตรงได้ดีขึ้น

2.2 ระบบธุรกิจอัจฉริยะ

ระบบธุรกิจอัจฉริยะ [4] เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อรวบรวม วิเคราะห์ และแปลงข้อมูลจากทั้งภายในและภายนอกองค์กรให้เป็นสารสนเทศที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจ โดยการใช้ระบบธุรกิจอัจฉริยะผ่านโปรแกรม Microsoft Power BI ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้วิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลผ่านแดชบอร์ดที่ใช้งานง่าย รองรับการอัปเดตข้อมูลแบบเรียลไทม์ ในงานวิจัยล่าสุด Belghith [5] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการทำนายความต้องการการจัดหายาด้วยวิธี Rolling Forecast ร่วมกับใช้โปรแกรม Power BI ในการแสดงผลผ่านแดชบอร์ดเพื่อช่วยให้การวางแผนการจัดหายาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการผู้ป่วยอย่างแม่นยำ

3. ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอ

จากรูปที่ 1 แสดงขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอ ประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ขั้นตอนการฝึกฝนโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน และการสร้างระบบธุรกิจอัจฉริยะ



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอ

3.1 ฐานข้อมูล

ฐานข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลของพนักงานที่ ประกอบด้วย 34 คุณลักษณะที่ส่งผลต่อการลาออกของพนักงาน เช่น อายุ แผนก เพศ ชั่วโมงการทำงาน ระดับการศึกษา การทำงานล่วงเวลา และระยะห่างจากที่พักอาศัยและที่ทำงาน เป็นต้น สำหรับผลเฉลยของข้อมูล ประกอบด้วย ลาออกและไม่ลาออก ที่ซึ่งทำการรวบรวมทั้งหมด 1470 พนักงาน

3.2 การเตรียมข้อมูล

สำหรับคุณลักษณะที่เป็นข้อความจะถูกแปลงเป็นตัวเลขเพื่อนำเข้าโมเดลในขั้นตอนถัดไป โดยคุณลักษณะที่เป็นหมวดหมู่ มีความสัมพันธ์หรือมีเพียง 2 ค่า จะถูกแปลงเป็นตัวเลขด้วยขั้นตอนวิธี Label encoding สำหรับคุณลักษณะที่เป็นหมวดหมู่ ไม่มีความสัมพันธ์หรือมีมากกว่า 2 ค่า จะถูกแปลงเป็นตัวเลขด้วยขั้นตอนวิธี One-Hot encoding เมื่อคุณลักษณะถูกแปลงเป็นตัวเลขทั้งหมดแล้วจะถูกนำไปปรับขนาดข้อมูลให้เป็นมาตรฐานด้วยขั้นตอนวิธี Z-Score

3.2 การฝึกฝนโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

Support Vector Machine (SVM) เป็นขั้นตอนวิธีการทำนายค่าข้อมูลแบบมีผู้สอน ที่มีเป้าหมายหลักในการหาค่าของเส้น Hyperplane ที่ใช้แบ่งกลุ่มข้อมูล เพื่อใช้ในการจำแนกกลุ่มข้อมูล โดย SVM ใช้หลักการของเคอร์เนล (Kernel) เพื่อช่วยแปลงข้อมูลไปยังมิติที่สูงขึ้น ทำให้สามารถแยกกลุ่มข้อมูลที่ไม่เป็นเส้นตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Polynomial Kernel เนื่องจากการกระจายตัวของคุณลักษณะข้อมูลมีความซับซ้อนของข้อมูลและไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการจำแนกข้อมูลที่มีความซับซ้อนมากขึ้น แสดง Polynomial Kernel ดังสมการที่ 1 โดยที่ $K(X_i,X_j)$ คือ

ฟังก์ชันเคอร์เนลที่ข้อมูล X_i สำหรับ c คือ ค่าคงที่ และ d คือ องศาของพหุนาม

$$K(X_i,X) = (X_i^T,X_j+c)^d \quad (1)$$

ดังนั้นฟังก์ชัน SVM โดยใช้ Polynomial Kernel สามารถแสดงดังสมการที่ 2 ที่ คือ α_i ตัวแปรที่ใช้ถ่วงน้ำหนักของแต่ละข้อมูล y_i คือ ค่าผลลัพธ์ของข้อมูล และ b คือ ค่าไบแอส

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i y_i K(X_i,X)+b \quad (2)$$

3.3 สร้างระบบธุรกิจอัจฉริยะ



รูปที่ 2 แดชบอร์ดระบบธุรกิจอัจฉริยะ

ในการพัฒนาระบบธุรกิจอัจฉริยะสำหรับการวิเคราะห์การลาออกของพนักงานด้วยโปรแกรม Power BI ถูกนำมาใช้ในการสร้างแดชบอร์ดแสดงดังรูปที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลาออกของพนักงานอย่างเป็นระบบ แดชบอร์ดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจสอบแนวโน้มและรูปแบบของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพและนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจขององค์กรหรือผู้บริหาร ที่ซึ่งประกอบด้วย

1. การวิเคราะห์อัตราเงินเดือนเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบเงินเดือนของพนักงานที่ลาออกกับพนักงานที่ยังทำงานอยู่ เพื่อระบุความสัมพันธ์ระหว่างระดับเงินเดือนและอัตราการลาออก
2. การวิเคราะห์อัตราการลาออกตามเพศ เพื่อตรวจสอบแนวโน้มการลาออกของพนักงานชายและหญิง เพื่อประเมินว่าเพศที่ต่างกันส่งผลต่อการลาออกหรือไม่
3. การวิเคราะห์จำนวนพนักงานที่ทำงานล่วงเวลา เพื่อวิเคราะห์ว่าการทำงานล่วงเวลามีผลต่อการลาออกหรือไม่
4. การวิเคราะห์การลาออกตามกลุ่มอายุ เพื่อค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงอายุของพนักงานกับอัตราการลาออก เพื่อดูว่าอายุมีผลต่อการตัดสินใจลาออกของพนักงานหรือไม่
5. การวิเคราะห์การลาออกเปรียบเทียบกับเงินเดือนและระยะทางการเดินทาง เพื่อตรวจสอบว่าพนักงานที่มีเงินเดือนต่ำกว่าค่าเฉลี่ยหรือมีระยะทางการเดินทางไกลกว่าปกติ มีแนวโน้มลาออกมากขึ้นหรือไม่

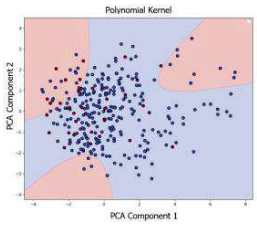
4. ผลการทดลอง

4.1 วิธีการประเมินผลความถูกต้องและการตั้งค่าการทดลอง

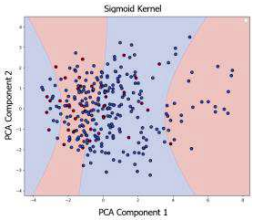
ในส่วนของการทดลองที่นำเสนอได้ใช้ขั้นตอนวิธีการประเมินผลประสิทธิภาพความถูกต้อง คือ Precision, Recall และ F1-score ที่ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมโดยการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ทำนายได้และผลเฉลยของข้อมูล การตั้งค่าการทดลองได้ใช้การแบ่งชุดข้อมูลแบบสุ่มที่จำนวนชุดข้อมูลฝึกฝนที่ 80% และจำนวนชุดข้อมูลทดสอบที่ 20% โดยเปรียบเทียบกับโมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบ Linear Kernel และ Sigmoid Kernel

4.2 ผลการทดลอง

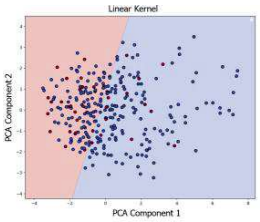
จากรูปที่ 3-5 แสดงภาพการใช้ SVM เพื่อจำแนกข้อมูลสองกลุ่มหลังจากลดมิติด้วย PCA และใช้การแบ่งข้อมูลด้วย Polynomial Kernel, Sigmoid Kernel และ Linear Kernel ตามลำดับ โดยแกน X แสดงถึง ค่าของข้อมูลที่ถูกแปลงเป็นองค์ประกอบหลักที่ 1 โดย PCA และแกน Y แสดงถึง ค่าของข้อมูลที่ถูกแปลงเป็นองค์ประกอบหลักที่ 2 โดย PCA โดยพื้นที่สีแดงแสดงถึงการลาออกงาน และพื้นที่สีน้ำเงินแสดงถึงการไม่ลาออกจากงาน สำหรับจุดข้อมูลสีแดงแสดงถึงข้อมูลพนักงานที่ลาออกจากงาน และจุดข้อมูลสีน้ำเงินแสดงถึงข้อมูลพนักงานที่ไม่ลาออกจากงาน จากรูปแสดงให้เห็นว่าการใช้ขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอ และแสดงค่าความถูกต้องในการประเมินผลด้วยวิธีการ Precision, Recall และ F1-score ดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 ผลลัพธ์โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบ Polynomial Kernel



รูปที่ 4 ผลลัพธ์โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบ Sigmoid Kernel



รูปที่ 5 ผลลัพธ์โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนแบบ Linear Kernel

ตารางที่ 1 ค่าความถูกต้องในการประเมินผลด้วยวิธีการต่าง ๆ

	Precision	**Recall**	**F1-score**
Polynomial	**0.74**	**0.67**	**0.70**
Sigmoid	0.59	0.69	0.58
Linear	0.61	0.70	0.61

สำหรับการประเมินผลระบบธุรกิจอัจฉริยะจากโปรแกรม Power BI ได้ทดสอบความพึงพอใจจากผู้ใช้จำนวน 30 ท่าน ด้วยแบบประเมิน 5 ข้อ โดยมีค่าคะแนนมากที่สุดแสดงถึงมีความพึงพอใจมาก คือ 5 คะแนน และมีค่าคะแนนน้อยที่สุด แสดงถึงความพึงพอใจน้อย คือ 1 คะแนน โดยผลประเมินความพึงพอใจ ด้วยคะแนนเฉลี่ย ($\bar{x}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลประเมินความพึงพอใจระบบธุรกิจอัจฉริยะ

หัวข้อแบบประเมิน	$\bar{x}$	**S.D.**
ความถูกต้องของคุณลักษณะที่พิจารณา	4.50	0.86
ความถูกต้องในการนำเสนอภาพข้อมูล	4.21	0.42
ความเข้าใจง่ายในรูปแบบการวิเคราะห์	4.75	0.54
ความง่ายต่อการใช้งานระบบธุรกิจอัจฉริยะ	4.10	0.51
ระบบสามารถช่วยสนับสนุนการตัดสินใจได้	4.65	0.35

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโมเดลการพยากรณ์และวิเคราะห์การลาออกของพนักงานโดยใช้โมเดลซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนร่วมกับระบบธุรกิจอัจฉริยะ จากภาพที่ 3-5 แสดงให้เห็นว่าการใช้ Polynomial Kernel สามารถแบ่งข้อมูลได้ดีกว่า ที่ซึ่งสอดคล้องกับผลความถูกต้อง ดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าค่า Precision ขั้นตอนวิธีการ Polynomial มีความถูกต้องที่มากกว่า Sigmoid และ Linear Kernel แต่ค่า Recall ขั้นตอนวิธีการ Polynomial มีความถูกต้องที่น้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าความถูกต้องเฉลี่ยตามสัดส่วน Precision และ Recall ด้วย F1-score แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีการที่นำเสนอมีความถูกต้องที่มากที่สุด สำหรับผลประเมินความพึงพอใจระบบธุรกิจอัจฉริยะ แสดงดังตารางที่ 2 มีค่าเฉลี่ยที่ 4.10-4.75 และ S.D. ที่ 0.35-0.86 แสดงให้เห็นว่าระบบธุรกิจอัจฉริยะอยู่ในระดับที่ดีมากสามารถช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Ozakca, N. S., Bulus, A., & Cetin, A. (2024, March). Artificial Intelligence Based Employee Attrition Analysis and Prediction. In *2024 6th International Conference on Computing and Informatics (ICCI)* (pp. 512-517). IEEE.

[2] Suthaharan, S., & Suthaharan, S. (2016). Support vector machine. *Machine learning models and algorithms for big data classification: thinking with examples for effective learning*, 207-235

[3] Guido, R., Ferrisi, S., Lofaro, D., & Conforti, D. (2024). An overview on the advancements of support vector machine models in healthcare applications: a review. *Information*, *15*(4), 235.

[4] Adewusi, A. O., Okoli, U. I., Adaga, E., Olorunsogo, T., Asuzu, O. F., & Daraojimba, D. O. (2024). Business intelligence in the era of big data: A review of analytical tools and competitive advantage. *Computer Science & IT Research Journal*, 415-431.

[5] Belghith, M., Ammar, H. B., Elloumi, A., & Hachicha, W. (2024, May). A new rolling forecasting framework using Microsoft Power BI for data visualization: A case study in a pharmaceutical industry. In *Annales Pharmaceutiques Françaises* (Vol. 82, No. 3, pp. 493-506). Elsevier Masson.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบติดตามเด็กเล็กด้วยเทคโนโลยีสมาร์ทวอทช์

Child Tracking System with Technology on Smart Watch

ญาณภัทร ชองทอง[1*] วชิรนันท์ ปุ้มุ[2] และวีระ รัตนงาม[3]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม
[3]สาขาวิชาไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
E-mail: yanapat.s@npu.ac.th*, childtracking@npu.ac.th, weera@npu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการติดตามเด็กเล็ก ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันอันตรายจากการลักพาตัวหรือการสูญหาย เสี่ยงต่อการเกิดอันตรายและการเสียชีวิต ทั้งหมดเป็นสาเหตุทำให้ผู้ปกครองมีความกังวลใจในความปลอดภัยของเด็ก ซึ่งจากสถิติของมูลนิธิกระจกเงามีเด็กหายออกจากบ้านเพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นถึงปัญหาดังกล่าว และได้พัฒนาระบบติดตามและแจ้งเตือนเด็ก ที่ทำให้ผู้ปกครองสามารถกำหนดขอบเขตของพื้นที่ที่ปลอดภัย และให้ทราบว่าเด็กอยู่ในตำแหน่งใด โดยระบบจะออกแบบเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งออกแบบบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อให้ผู้ปกครองกำหนดพื้นที่ปลอดภัย และมีการแจ้งเตือน ถ้าเด็กออกจากพื้นที่นั้นโดยทันที สามารถบอกตำแหน่งข้อมูลบนแผนที่ ส่วนที่สองออกแบบบนนาฬิกาสมาร์ทวอชที่ใช้สวมติดตัวเด็ก ในการระบุพิกัดตำแหน่งที่เด็กเคลื่อนที่ และสามารถนำทางให้เด็กสามารถกลับไปหาผู้ปกครองได้ในกรณีสูญหายหรือพลัดหลงกับผู้ปกครอง

การวิจัยนี้เป็นลักษณะวิจัยเชิงคุณภาพ โดยใช้การสัมภาษณ์เชิงลึก และเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงวิเคราะห์ ความคิดเห็นเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการแจ้งเตือน และติดตามเด็กหาย เพื่อการติดตามค้นหาช่วยเหลือได้โดยเร็ว และใช้งานได้จริง โดยผู้ปกครองสามารถมากำหนดตำแหน่งพื้นที่ปลอดภัยได้ และนาฬิกาที่เด็กสวมใส่ สามารถนำทางไปหาผู้ปกครองได้ ซึ่งแตกจากงานอื่นที่แสดงระบบพิกัดตำแหน่งได้เพียงส่วนเดียว

คำสำคัญ: ติดตาม สมาร์ทวอทช์แอพพลิเคชั่น จีพีเอส

Abstract

This article presents the development of a child tracking system aimed at preventing dangers such as abduction or disappearance, which pose risks of harm or even death. These concerns have caused parents to become increasingly worried about their children's safety. According to statistics from The Mirror Foundation, the number of missing children reported each year continues to rise. Recognizing this issue, the researchers developed a child tracking and alert system that allows parents to define safe zones and monitor the location of their children. The system is designed in two parts. The first part is a mobile phone application for parents to define safe zones. It sends immediate alerts if the child leaves the designated area and displays their location on a map. The second part is a smartwatch worn by the child, which continuously tracks their movements and can guide the child back to the parent in case they get lost or separated.

This research is a qualitative study that employs in-depth interviews and purposive sampling to analyze opinions on the effectiveness of alert and tracking systems for missing children. The goal is to enable rapid search and rescue operations and ensure practical usability. The system allows parents to define safe zones, and the smartwatch worn by the child can navigate the way back to the parent. This distinguishes it from other works that only display location coordinates without navigation capability.

Keywords: tracking, smartphone, applecation, gps

1. บทนำ

ปัจจุบัน เทคโนโลยีดิจิทัลเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในยุคไทยแลนด์ 4.0 ที่เน้นการขับเคลื่อนประเทศด้วยนวัตกรรม อย่างไรก็ตาม ปัญหาเด็กสูญหายยังคงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข

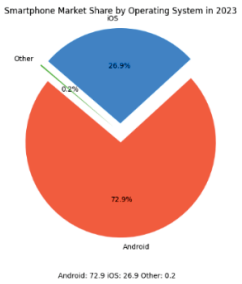
จากสถิติของ มูลนิธิกระจกเงา (2563-2565) มีรายงานเด็กสูญหาย 1,631 ราย ติดตามคืนได้ 1,030 ราย โดยเฉพาะปี 2567 มีผู้สูญหาย 314 ราย เพิ่มขึ้น 6% จากปีที่ผ่านมา สาเหตุหลัก ได้แก่ เด็กสมัครใจหนีออกจากบ้าน (72%) เด็กที่มีพัฒนาการช้าหรือป่วยทางจิตเวช (9%) และถูกลักพาตัว ปัจจัยสำคัญมาจาก การล่อลวงผ่านโทรศัพท์-อินเทอร์เน็ต

การติดเกม และภาวะสมองเสื่อม นอกจากนี้ ครอบครัวของผู้สูญหายมักไม่ทราบกระบวนการติดตาม ส่งผลให้การค้นหาล่าช้า

ทีมวิจัยพัฒนาระบบติดตามเด็กผ่าน สมาร์ทวอทช์อัจฉริยะ ที่ใช้ GPS แสดงตำแหน่งเรียลไทม์บน Google Maps ผ่านมือถือ ผู้ปกครองตั้งค่าพื้นที่ปลอดภัย (Safe Zone) และรับแจ้งเตือนเมื่อเด็กออกนอกพื้นที่ ระบบนี้ช่วยติดตามเด็กจากระยะไกล ลดโอกาสสูญหาย และเพิ่มความปลอดภัยในยุคดิจิทัล

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

งานวิจัยนี้อ้างอิงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการพัฒนาระบบติดตามเด็กเล็กด้วยสมาร์ทวอทช์และ GPS ซึ่งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android OS) เป็นระบบปฏิบัติการสำหรับอุปกรณ์พกพาที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากรองรับการพัฒนาแอปพลิเคชันที่สามารถใช้งานกับสมาร์ทวอทช์และสมาร์ทโฟนได้อย่างสะดวก สมาร์ทโฟน (Smartphone) สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับสมาร์ทวอทช์ในระบบติดตามเด็ก

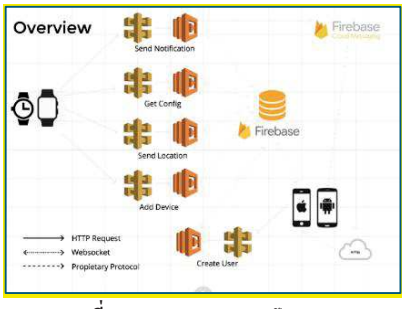


ภาพที่ 1 สัดส่วนตลาดสมาร์ตโฟนในปี 2563 ตามระบบปฏิบัติการ

โดยทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับข้อมูลและแสดงตำแหน่งผ่านแอปพลิเคชันส่วนเทคโนโลยี Firebaseเป็นแพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาแอปพลิเคชันที่ช่วยให้สามารถจัดเก็บและซิงค์ข้อมูลแบบเรียลไทม์ รองรับการแจ้งเตือนผ่านระบบคลาวด์ Google Maps API เป็น API ของ Google Maps ช่วยให้สามารถแสดงตำแหน่ง GPS ของเด็กบนแผนที่แบบเรียลไทม์ และสามารถกำหนดพื้นที่ปลอดภัย (Safe Zone) ได้ Amazon Web Services (AWS) AWS เป็นแพลตฟอร์มคลาวด์ที่ใช้เก็บข้อมูลการติดตามและช่วยให้สามารถเรียกดูข้อมูลตำแหน่งย้อนหลังได้ MongoDB เป็นฐานข้อมูลแบบ NoSQL ที่ใช้เก็บข้อมูลพิกัด GPS และข้อมูลการเดินทางของเด็ก รองรับการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทฤษฎีเหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาระบบติดตามเด็กเล็กด้วยสมาร์ทวอทช์ โดยผสมผสานเทคโนโลยี Android, Firebase, Google Maps API, AWS และ MongoDB เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

3.การดำเนินงาน

การวิเคราะห์และออกแบบการวิเคราะห์เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลความต้องการของผู้ใช้ผ่านการสัมภาษณ์ การออกแบบสอบถามและการสังเกตการณ์ในสภาพแวดล้อมการทำงานจริง จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์และพัฒนาเป็นแบบจำลอง เช่น แบบจำลองกระบวนการ (Data Flow Diagram) และแบบจำลองข้อมูล (Data Model) เพื่อให้ได้ข้อกำหนดที่ชัดเจนสำหรับการพัฒนาระบบ การออกแบบระบบประกอบด้วยการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบที่เกี่ยวข้องกับฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ และเครือข่าย การออกแบบรายงาน การออกแบบหน้าจออินพุตข้อมูล การออกแบบผังงานระบบ การออกแบบฐานข้อมูล และการออกแบบโปรแกรม ระยะการพัฒนาระบบจะเกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมตามที่นักวิเคราะห์ระบบออกแบบไว้ โดยใช้เครื่องมือช่วยในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อให้ระบบงานพัฒนาได้เร็วขึ้นและมีคุณภาพ การทดสอบระบบจะทำการตรวจสอบการทำงานของระบบด้วยข้อมูลจำลอง หากพบข้อผิดพลาดก็ปรับปรุงแก้ไข



ภาพที่ 2 การออกแบบ สถาปัตยกรรม

ระบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อสร้างการทำงานที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนสำคัญ ดังนี้:

3.1 การวิเคราะห์และออกแบบ

ใช้กระบวนการ SDLC (System Development Life Cycle) เพื่อวิเคราะห์และออกแบบระบบ ซึ่งมี 7 ระยะสำคัญ ได้แก่ การกำหนดปัญหา การวิเคราะห์ การออกแบบ การพัฒนา การทดสอบ การนำระบบไปใช้งาน และการบำรุงรักษา

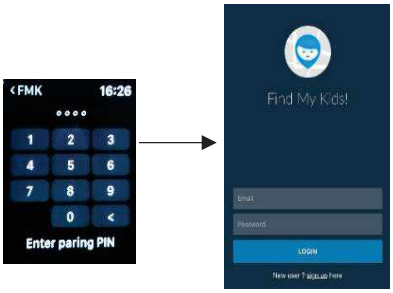
ระยะการออกแบบนั้นเน้นการเปลี่ยนแบบจำลองเชิงตรรกะเป็นแบบจำลองเชิงกายภาพ ซึ่งเป็นการผสมผสานการออกแบบฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ ฐานข้อมูล และรายงาน

3.2 การออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบใช้ Firebase และ AWS สำหรับฐานข้อมูลและการประมวลผลบน Cloudการทำงานแบ่งเป็นสองส่วนหลัก ผู้ใช้งาน (User): เริ่มต้นระบบผ่านนาฬิกาสมาร์ทวอทช์ โดยกดปุ่ม Start Service ซึ่งเรียกใช้งาน Lambda Function (Get Config) สำหรับดึงข้อมูลการตั้งค่า (Configuration) จาก Firebase และส่วนของผู้ดูแลระบบ (Admin): สามารถเพิ่มอุปกรณ์โดยสร้าง Pin Code ผ่าน Lambda Function (Add Device) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจสอบ Pin กับฐานข้อมูล Firebase

3.3 กระบวนการออกแบบส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI)

การออกแบบ GUI เน้นความง่ายและสะดวกในการใช้งาน เช่น หน้าจอเข้าสู่ระบบ: สำหรับกรอกข้อมูล Email และ Password หน้าจอเพิ่มอุปกรณ์: สำหรับเชื่อมต่อสมาร์ทวอทช์กับแอปพลิเคชัน หน้าจอเริ่มต้นและสิ้นสุดการใช้งาน: กดปุ่ม Start Service เพื่อเริ่มต้น และ Stop Service เพื่อสิ้นสุด



ภาพที่ 3 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์นาฬิกาสมาร์ทวอทช์กับแอพพลิเคชั่นบนมือถือ

3.4 การประยุกต์ใช้ระบบและการเชื่อมโยงข้อมูล

ระบบใช้ Lambda Functions สำหรับการทำงาน เช่น การส่งตำแหน่ง การแจ้งเตือน และการตรวจสอบ Pin รองรับการแจ้งเตือนเมื่อมีการเข้า/ออกพื้นที่ ผ่าน Firebase Cloud Messaging สำหรับ Android และ APNs สำหรับ iOS และสามารถแสดงข้อมูลย้อนหลัง รวมถึงการตั้งค่าของอุปกรณ์ได้



ภาพที่ 4 แสดงการเพิ่มอุปกรณ์กับมือถือสำเร็จแล้ว

ระบบนี้เน้นการทำงานที่ครอบคลุมตั้งแต่การลงทะเบียน การเพิ่มอุปกรณ์ การส่งข้อมูล และการแจ้งเตือน โดยมีการออกแบบ GUI ที่เป็นมิตรกับผู้ใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกในทุกขั้นตอนของการใช้งาน

4.ผลการดำเนินการวิจัย

4.1 ผลการทดสอบการใช้งานแอพพลิเคชั่นบนมือถือ

การเข้าใช้งานระบบ:ผู้ใช้ต้องล็อคอินและเชื่อมต่ออุปกรณ์มือถือกับนาฬิกาสมาร์ทวอทช์การเชื่อมต่อนาฬิกาสมาร์ทวอทช์กับแอพพลิเคชั่นบนมือถือ: ผู้ใช้สามารถเพิ่มหรือลบอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อได้ตามต้องการการตั้งค่าและการใช้งาน: แอพพลิเคชั่นมีการจัดหมวดหมู่เมนูที่เหมาะสม ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย และมีความสวยงาม

4.2 ผลการทดสอบส่วนการใช้งานบนนาฬิกาสมาร์ทวอทช์

การเริ่มต้นใช้งาน:ผู้ใช้ต้องเปิดระบบ (Start Service) บนนาฬิกาสมาร์ทวอทช์.การค้นหาบ้าน: ระบบสามารถนำทางกลับบ้านได้โดยการกดปุ่ม "Find Home".การแจ้งเตือน: ระบบจะแจ้งเตือนเมื่อผู้ใช้เข้าและออกจากพื้นที่ที่กำหนดไว้.การเพิ่มอุปกรณ์: ผู้ใช้สามารถเพิ่มอุปกรณ์นาฬิกาสมาร์ทวอทช์กับแอพพลิเคชั่นบนมือถือได้มากกว่า 1 ตัว.

4.3 ผลการทดสอบระบบติดตาม

การแจ้งเตือน: ระบบจะแจ้งเตือนเมื่อผู้ใช้เข้าและออกจากพื้นที่ที่กำหนดไว้การติดตามตำแหน่ง: ระบบสามารถติดตามตำแหน่งของผู้ใช้ได้อย่างแม่นยำการนำทางกลับบ้าน: ระบบสามารถนำทางกลับบ้านได้โดยการกดปุ่ม "Find Home"การหยุดการใช้งาน: ผู้ใช้สามารถหยุดการใช้งานระบบติดตามได้โดยการปิดระบบ (Service is Stopped).

4.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบและใช้งานแอพพลิเคชั่น

การออกแบบการใช้งาน แอพพลิเคชั่นมีการจัดหมวดหมู่เมนูที่เหมาะสม ขนาดและรูปแบบตัวอักษรอ่านง่าย และมีความสวยงาม ประสิทธิภาพในการประมวลผลแอพพลิเคชั่นตอบสนองรวดเร็วและมีความเสถียรการใช้งานแอพพลิเคชั่นแอพพลิเคชั่นใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อนและมีความสะดวกในการเรียกดูข้อมูลต่าง ๆ ความพึงพอใจของผู้ใช้: จากการทดสอบกับกลุ่มตัวอย่าง 100 คน พบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับสูง

4.4.1 การออกแบบการใช้งาน

ค่าเฉลี่ย 4.7: ผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับสูงมากเกี่ยวกับการออกแบบการใช้งานของแอพพลิเคชั่น ซึ่งรวมถึงการจัดหมวดหมู่เมนู ขนาดและรูปแบบตัวอักษรที่อ่านง่าย และความสวยงามของแอพพลิเคชั่น.

4.4.2 ประสิทธิภาพในการประมวลผล

ค่าเฉลี่ย 4.6: ผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับสูงเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประมวลผลของแอพพลิเคชั่น ซึ่งรวมถึงความ

รวดเร็วในการตอบสนอง ความเสถียรของระบบ และความถูกต้องของข้อมูลที่แสดง.

4.4.3 การใช้งานแอพพลิเคชั่น

ค่าเฉลี่ย 4.8: ผู้ใช้มีความพึงพอใจในระดับสูงมากเกี่ยวกับการใช้งานแอพพลิเคชั่น ซึ่งรวมถึงความง่ายในการใช้งาน ความสะดวกในการเรียกดูข้อมูล และความรวดเร็วในการใช้งาน.

กราฟนี้ช่วยให้เห็นภาพรวมของความพึงพอใจของผู้ใช้ในแต่ละด้าน โดยค่าเฉลี่ยที่สูงแสดงถึงความพึงพอใจในระดับมากที่สุด ซึ่งเป็นผลดีต่อการพัฒนาและปรับปรุงแอพพลิเคชั่นในอนาคต.

5.สรุปผล

การพัฒนาระบบติดตามเด็กเล็กด้วยเทคโนโลยีสมาร์ทวอทช์ที่ใช้ระบบจีพีเอสสามารถเชื่อมต่อกับแอพพลิเคชั่นบนมือถือเพื่อแสดงตำแหน่งของเด็กผ่านแผนที่กูเกิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดสอบกับผู้ใช้งานจำนวน 100 คน พบว่าผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ ระบบสามารถระบุตำแหน่งของเด็กและแนะนำเส้นทางกลับบ้านได้เมื่อเด็กหลงทาง ทำให้สามารถติดตามความปลอดภัยของเด็กได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ การเก็บรวบรวมข้อมูลได้แก่แหล่งข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งช่วยให้การพัฒนาเป็นไปตามแนวทางวิจัยที่กำหนด นอกจากนี้ ผู้วิจัยเสนอแนะให้มีการพัฒนาในด้านการปักหมุดตำแหน่งที่ต้องการติดตามได้เอง และควรใช้นาฬิกาสมาร์ทวอทช์ที่มีระบบเซลลูล่า เพื่อให้สามารถใช้งานได้แม้ในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณ Wi-Fi การวิจัยในเชิงปริมาณในพื้นที่ห่างไกลจะช่วยให้ข้อมูลที่ได้มีความสมบูรณ์และมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นในการใช้งานจริง

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ให้การสนับสนุนเอื้อเฟื้อสถานที่ทำงานวิจัย ซึ่งได้รับความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย โครงการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และขอบคุณผู้เชียวชาญที่ท่านกรุณาให้ข้อเสนอแนะทั้งยังมีส่วนร่วมในการดำเนินงานให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

เอกสารอ้างอิง

[1] มูลนิธิกระจกเงา. (2565). สถิติการแจ้งคนหาย. ศูนย์ข้อมูลคนหายเพื่อการต่อต้านการค้ามนุษย์. https://www.mirror.or.th/missing-statistics

[2] Stauffer C, Grimson W. “Learning patterns of activity using real-time tracking” In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, issue 8 (2000) pp. 747-757 Published by IEEE

[3] Maurya K, Singh M, Jain N. “Real Time Vehicle Tracking System using GSM and GPS Technology-An Anti-theft Tracking System” International Journal of Electronics and Computer Science Engineering, vol. 2, issue 3 (2012) pp. 1103-1107

[4] Rycroft M. “Understanding GPS. Principles and applications” Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 59, issue 5 (1997) pp. 598-599

[5] Shen L, Stopher P. “Review of GPS Travel Survey and GPS Data-Processing Methods” Transport Reviews, vol. 34, issue 3 (2014) pp. 316-334 Published by Routledge

[6] Zheng Y, Li Q, Chen Y, Xie X, Ma W. “Understanding mobility based on GPS data” Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing - UbiComp '08 (2008) p. 312 Published by ACM Press

[7] El-rabbany A. “Introduction to GPS: The Global Position System” NavtechGPS Part 1221 (2006) p. 230

[8] Tracy K. “Mobile application development experiences on Apples iOS and Android OS” IEEE Potentials, vol. 31, issue 4 (2012) pp. 30-34

[9] Mohamed I, “Patel D. Android vs iOS security: A comparative study” Proceedings - 12th International Conference on Information Technology: New Generations, ITNG 2015 (2015) pp. 725-730 Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

[10] Holsten F. “Beginning Google Maps API 3”Lakartidningen, vol. 95, issue 44 (1998) pp. 4869-4872

[11] Yoo J, Jeon K, Lee Y, Kim S, Kim J. “A study of in-vehicle infotainment system based on HTML5 using Tizen IVI” International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, vol. 11, issue 7 (2016) pp. 373-384 Published by Science and Engineering Research Support Society



ประวัติผู้เขียนบทความ
นายญาณภัทร ซองทอ อาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม สนใจงานวิจัย ทางด้านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง(IoT) Data Mining

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัย: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

University Restroom Search System: An In-depth Study at Rajamangala University of Technology Isan

สุภัทรา เกิดเมฆ[1*] จิรันธนิน พุกสี[1] สิรวิชญ์ ธรรมรสเดชา[1] วิทยา ศรีกุล[1] และ พรภัสสร อ่อนเกิด[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
E-mail: supattra@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน โดยใช้ PHP, MySQL และ API ของ GPS เพื่อระบุตำแหน่งและนำทาง ระบบสามารถค้นหาห้องน้ำตามพิกัดและประเภท รวมถึงรองรับผู้พิการ ทั้งยังรองรับการรีวิวและให้คะแนน ระบบโฮสต์บน Microsoft Azure เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและความปลอดภัย พร้อมทั้งใช้ Regular Expressions (Regex) คัดกรองถ้อยคำไม่เหมาะสม และใช้เครื่องมือประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) เพื่อวิเคราะห์อารมณ์เชิงลบ การทดสอบด้วย Black-box Testing พบว่าระบบมีความถูกต้องและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่กำหนด

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, การค้นหาห้องน้ำ, นำทาง

Abstract

This research presents the development of a web application for locating restrooms within Rajamangala University of Technology Isan. The system was developed using PHP and MySQL, integrated with GPS APIs for positioning and navigation. It enables users to search for restrooms based on coordinates and categories, with features supporting accessibility for individuals with disabilities. The system also includes review and rating functionalities. Hosted on Microsoft Azure, it ensures system stability and security. Inappropriate language filtering is implemented using Regular Expressions (Regex), while sentiment analysis of user comments is performed using Natural Language Processing (NLP) techniques to detect negative expressions. System performance evaluation using black-box testing indicates that the application functions correctly and aligns with the intended objectives.

Keywords: web application, restroom search, navigation

1. บทนำ

ห้องน้ำเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับผู้ใช้ภายในมหาวิทยาลัย ไม่ว่าจะเป็นนักศึกษา บุคลากร หรือผู้มาเยือน อย่างไรก็ตาม การเข้าถึงห้องน้ำในบางพื้นที่อาจเป็นปัญหา เนื่องจากขาดข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับตำแหน่ง สภาพความสะอาด หรือประเภทของห้องน้ำที่เหมาะสมกับผู้ใช้บางกลุ่ม โดยเฉพาะห้องน้ำสำหรับผู้พิการที่มักมีจำนวนจำกัดและหายาก ปัจจุบัน ระบบสารสนเทศและระบบนำทางถูกนำมาใช้ในการค้นหาห้องน้ำ โดยระบบที่มีประสิทธิภาพสามารถช่วยให้ผู้ใช้ค้นหาห้องน้ำที่ใกล้ที่สุด ดูรีวิวเกี่ยวกับคุณภาพ และใช้ GPS ในการนำทางได้อย่างเหมาะสม

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการออกแบบและพัฒนาระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัย โดยใช้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานเป็นกรณีศึกษา เป้าหมายคือการสร้างระบบเพื่อสนับสนุนการใช้งานของผู้ใช้ในการค้นหาห้องน้ำตามเกณฑ์ที่ต้องการ เช่น ระยะทาง รีวิว หรือประเภทของห้องน้ำ รวมถึงสามารถระบุห้องน้ำสำหรับผู้พิการได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ระบบยังรองรับให้ผู้ใช้สามารถแสดงความคิดเห็นและให้คะแนนห้องน้ำได้ อีกทั้งสมาชิกสามารถใช้ GPS เพื่อระบุเส้นทางไปยังห้องน้ำเป้าหมาย ขณะที่ผู้ดูแลระบบสามารถจัดการข้อมูลห้องน้ำและความคิดเห็นของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบนี้มีแนวโน้มจะช่วยเพิ่มความสะดวกในการค้นหาห้องน้ำ ลดปัญหาการใช้งาน โดยเฉพาะในกลุ่มของผู้พิการ และสนับสนุนการพัฒนาสภาพแวดล้อมภายในมหาวิทยาลัยให้ดียิ่งขึ้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาได้เน้นการพัฒนาระบบค้นหาและแนะนำสถานที่ ตลอดจนการจัดการสุขอนามัยในพื้นที่สาธารณะ ซึ่งสามารถปรับใช้กับระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัยได้

2.1 ระบบค้นหาสถานที่และห้องน้ำในมหาวิทยาลัย

แม้หลายมหาวิทยาลัยพัฒนาแผนที่ดิจิทัลช่วยนำทาง แต่ข้อมูลห้องน้ำมักขาดรายละเอียด เช่น ความสะอาดหรือการรองรับผู้พิการ

งานวิจัย [1] ปรับปรุงความแม่นยำผ่านแอป Android แต่ไม่รองรับ iOS งานวิจัย [2] ใช้ภูมิสารสนเทศเสมือนจริงแต่มีความซับซ้อนสูง งานวิจัย [4] วิเคราะห์สิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืนแต่ใช้เวลาสูงในการเก็บข้อมูล

2.2 ระบบแนะนำสถานที่โดยใช้ AI และ Machine Learning

AI และ Machine Learning ถูกใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ใช้เพื่อแนะนำสถานที่ได้แม่นยำขึ้น งานวิจัย [5] ใช้ Big Data และ AI ในระบบแนะนำการท่องเที่ยว แต่ต้องใช้ทรัพยากรสูงและข้อมูลที่สมบูรณ์ งานวิจัย [7] ใช้ AI พยากรณ์ตลาดและกลุ่มเป้าหมาย แต่มีอัลกอริทึมซับซ้อนและต้องใช้ข้อมูลคุณภาพสูง

2.3 ประเด็นด้านสุขอนามัยในสถานที่สาธารณะ

งานวิจัยด้านสุขอนามัยแนะนำให้ใช้ระบบแจ้งเตือนและให้คะแนนห้องน้ำเพื่อพัฒนาความสะอาด งานวิจัย [3] การมีส่วนร่วมของผู้ใช้จริงช่วยยกระดับคุณภาพห้องน้ำสาธารณะ แม้ต้องใช้ทรัพยากรและการดูแลต่อเนื่อง งานวิจัย [6] สุขอนามัยห้องน้ำและแนวทางป้องกันเชื้อโรค แต่ยังต้องศึกษาต่อยอดและคำนึงถึงความแตกต่างของสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง แนวทางการพัฒนาควรรองรับการค้นหาห้องน้ำอย่างแม่นยำ พร้อมระบบกรองข้อความไม่เหมาะสมและประมวลผลภาษาธรรมชาติบน PHP โดยคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดภายในมหาวิทยาลัย

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

การออกแบบและพัฒนาระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัยดำเนินตามแนวทางการพัฒนาอย่างเป็นระบบ โดยมีขั้นตอนหลักที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์

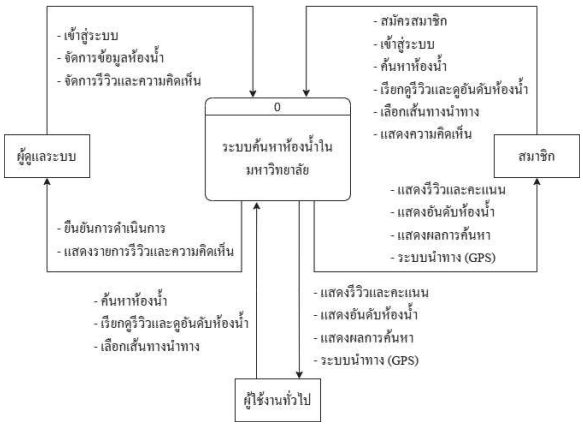
3.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นและการวิเคราะห์ความต้องการ

สำรวจและบันทึกพิกัด GPS ของห้องน้ำภายในมหาวิทยาลัย พร้อมจัดหมวดหมู่ตามประเภทเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหา ตรวจสอบอุปกรณ์ภายในห้องน้ำ ความสะอาด และการดูแลรักษา โดยเฉพาะห้องน้ำสำหรับผู้พิการ ข้อมูลนี้ใช้เป็นฐานในการพัฒนาระบบให้เหมาะสมกับทุกกลุ่มผู้ใช้

3.2 การออกแบบระบบค้นหาห้องน้ำ

การออกแบบระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัยมุ่งเน้นให้สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และรองรับทุกกลุ่มผู้ใช้ โดยเฉพาะผู้พิการ ระบบได้รับการออกแบบให้รองรับฟังก์ชันหลัก เช่น การค้นหาห้องน้ำตามประเภท ระบบรีวิวและให้คะแนน การนำทางผ่าน GPS และการจัดการข้อมูลโดยผู้ดูแลระบบ ซึ่งโครงสร้างและองค์ประกอบสำคัญของระบบประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

(1) แผนภาพแสดงบริบทของระบบ (Context diagram) แสดงขอบเขตของระบบค้นหาห้องน้ำ และการเชื่อมโยงระหว่างระบบกับผู้ใช้ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ผู้ใช้งานทั่วไป สมาชิก และผู้ดูแลระบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงบริบทของระบบ

จากรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบ ซึ่งแบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ สมาชิก และผู้ใช้งานทั่วไป โดยผู้ดูแลระบบสามารถจัดการข้อมูลห้องน้ำและรีวิว ขณะที่สมาชิกมีฟังก์ชันเพิ่มเติม เช่น การสมัครสมาชิก เข้าสู่ระบบ และแสดงความคิดเห็น ส่วนผู้ใช้งานทั่วไปสามารถค้นหาห้องน้ำ ดูรีวิว อันดับห้องน้ำ และใช้ระบบนำทาง ทั้งนี้ระบบตอบสนองต่อผู้ใช้แต่ละกลุ่มตามบทบาท เช่น การแสดงผลการค้นหา การนำทาง และการจัดการข้อมูล

(2) การออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล จะรองรับการใช้งานที่ครอบคลุมทั้งการค้นหา รีวิว และการนำทางไปยังห้องน้ำภายในมหาวิทยาลัย โดยตารางห้องน้ำซึ่งทำหน้าที่เป็นตารางหลัก จะจัดเก็บข้อมูลสำคัญ เช่น รหัสอาคาร ชั้น ความสะอาด พิกัดละติจูด-ลองจิจูด เพศประเภทของห้องน้ำ และจำนวนห้องน้ำ นอกจากนี้ตารางห้องน้ำยังเชื่อมโยงกับตารางอื่น ๆ เช่น ตารางรูปภาพห้องน้ำ, คอมเมนต์, ไลก์/ดิสไลก์ และรีวิว เพื่อให้ระบบสามารถจัดการข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและมีประสิทธิภาพ

(3) การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ มุ่งเน้นให้ใช้งานง่าย สะดวก และรองรับทุกอุปกรณ์ โดยมีองค์ประกอบหลักดังนี้ หน้าค้นหาห้องน้ำให้ผู้ใช้เลือกประเภทห้องน้ำและเรียงตามคะแนนรีวิว, หน้ารายละเอียดห้องน้ำ แสดงข้อมูลตำแหน่ง อุปกรณ์ภายในห้องน้ำ และความคิดเห็น, หน้าการนำทาง แสดงเส้นทางไปยังห้องน้ำผ่าน GPS, หน้ารีวิวและให้

คะแนน สำหรับแสดงความคิดเห็น ระบบออกแบบให้มีรูปแบบการออกแบบที่เรียบง่าย พร้อมรองรับผู้ใช้งานทุกกลุ่ม รวมถึงผู้พิการด้วย

(4) องค์ประกอบหลักของระบบ ได้แก่ การค้นหาห้องน้ำตามประเภท พิกัด และคะแนนรีวิว, การรีวิวและให้คะแนน เพื่อประเมินคุณภาพ และการนำทางผ่าน GPS ผู้ดูแลระบบสามารถดูแลและปรับปรุงข้อมูลห้องน้ำ จัดการหมุดแผนที่ รวมหมุดห้องน้ำในอาคารเดียวกันเพื่อลดความซ้ำซ้อน ระบบถูกออกแบบให้ใช้งานง่าย สะดวก และรองรับผู้ใช้ทุกกลุ่ม รวมถึงผู้พิการ

3.3 การพัฒนาและทดสอบระบบ

1. ระบบพัฒนาด้วย PHP สำหรับระบบหลังบ้าน (Back-end) ในการประมวลผลข้อมูลฝั่งเซิร์ฟเวอร์ ร่วมกับ MySQL สำหรับจัดเก็บข้อมูลห้องน้ำ รายละเอียดสถานที่ พิกัด GPS คะแนน และความคิดเห็น โดยพิกัดเก็บในรูปแบบละติจูด-ลองจิจูด พร้อมทำดัชนีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาและคำนวณระยะทาง ระบบนำทางใช้ Google Maps API แสดงเส้นทางจากตำแหน่งผู้ใช้ไปยังห้องน้ำที่เลือกผ่านแผนที่แบบโต้ตอบ ฟังก์ชันกรองคำไม่เหมาะสมใช้ Regular Expressions (Regex) ตรวจจับภาษาหยาบจากรายการคำต้องห้ามที่สามารถปรับปรุงได้ ส่วนการวิเคราะห์ความคิดเห็นใช้เครื่องมือประมวลผลภาษาธรรมชาติ (PHP-NLP-Tools) ประมวลผลข้อความด้วยเทคนิค TF-IDF หลังตัดคำและลบคำที่ไม่มีความหมาย เพื่อประเมินอารมณ์เชิงลบ ระบบทั้งหมดโฮสต์บน Microsoft Azure เพื่อความเสถียร ความปลอดภัย และรองรับการเข้าถึงจากอุปกรณ์หลากหลายผ่านเว็บเบราว์เซอร์

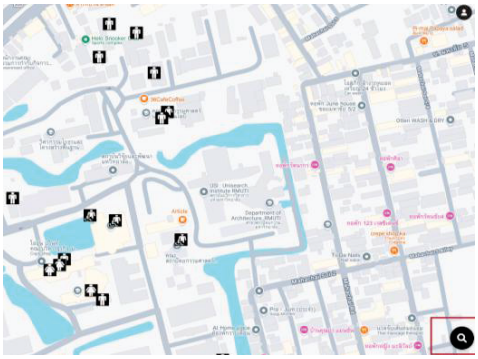
2. แนวทางการพัฒนา ระบบพัฒนาโดยใช้ Waterfall Model ซึ่งดำเนินการตามลำดับขั้นตอน ได้แก่ การวิเคราะห์ความต้องการ ออกแบบ พัฒนา ทดสอบ และติดตั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าทุกขั้นตอนเสร็จสมบูรณ์ก่อนดำเนินการขั้นถัดไป

3. การทดสอบระบบ การทดสอบ Black-box Testing ประเมิน 6 ด้าน ได้แก่ ฟังก์ชันการทำงาน ตรวจสอบความถูกต้องของการค้นหา รีวิว และนำทาง, ประสิทธิภาพ วัดความเร็วในการตอบสนองของระบบ, การใช้งาน ทดสอบความง่ายและประสบการณ์ผู้ใช้, ความปลอดภัย ตรวจสอบการเข้ารหัสและการจำกัดสิทธิ์, ความเข้ากันได้ รองรับอุปกรณ์และเบราว์เซอร์ต่าง ๆ และการออกแบบ วิเคราะห์ UI/UX ให้ใช้งานสะดวกตามแนวทางที่กำหนด และประเมินความพึงพอใจระบบ

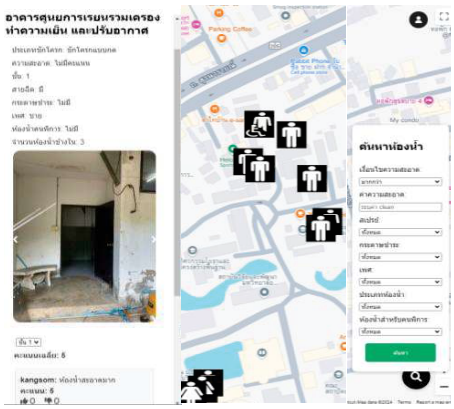
3.4 การนำเสนอผลลัพธ์และการประเมินระบบ

การนำเสนอผลลัพธ์และการประเมินระบบมุ่งเน้นการทดสอบสมรรถนะของระบบ และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

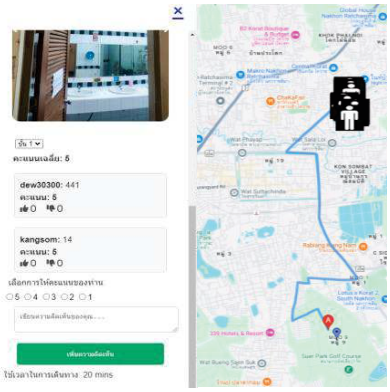
(1) ตัวอย่างหน้าจอระบบ นำเสนอภาพหน้าจอของระบบที่พัฒนาสำหรับแต่ละประเภทผู้ใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2-5



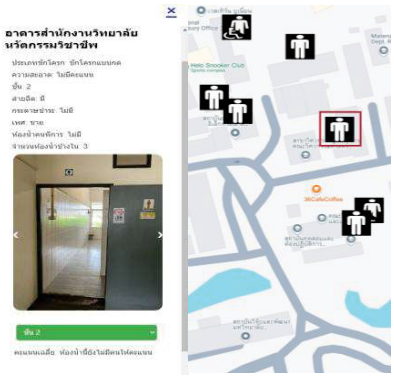
รูปที่ 2 หน้าต่างแสดงข้อมูลหมุดต่าง ๆ ในแผนที่



รูปที่ 3 หน้าต่างตรวจสอบตำแหน่งห้องน้ำ



รูปที่ 4 หน้าต่างแสดงเส้นทางสำหรับการเดินทางไปยังห้องน้ำ



รูปที่ 5 หน้าต่างการรวมหมุดอยู่จุดเดียวกัน

(2) การนำเสนอผลลัพธ์: ระบบสามารถทำงานได้ตามที่วางไว้ แต่เมื่อมีผู้ใช้จำนวนมากเข้าระบบพร้อมกัน อาจเกิดความล่าช้า จึงควรเพิ่มประสิทธิภาพในการรองรับภาระงาน ระบบใช้งานง่าย อย่างไรก็ตาม บางฟังก์ชันการค้นหายังต้องปรับปรุงให้ใช้งานได้ราบรื่นยิ่งขึ้น ด้านความปลอดภัยสามารถปกป้องข้อมูลได้ดี แต่ยังจำเป็นต้องเสริมมาตรการเพิ่มเติม ส่วนความเข้ากันได้ พบปัญหาในการแสดงผลบนอุปกรณ์ Android บางรุ่น ซึ่งควรได้รับการแก้ไข ฟังก์ชันหลักของระบบทำงานได้ดี แต่อาจต้องปรับบางส่วนเพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพ ในด้านการออกแบบ มีความเรียบง่าย แต่ควรปรับการจัดวางองค์ประกอบให้ชัดเจนยิ่งขึ้นและรองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย

(3) การประเมินระบบ จากการสำรวจกลุ่มตัวอย่าง 30 คน พบว่าผู้ใช้ทั่วไปและสมาชิก (เช่น บุคลากรและนักศึกษา) ให้คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ย 4.58 (SD = 0.43) โดยเห็นว่าระบบมีการนำทางและเข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ ได้สะดวก ไม่ซับซ้อน ตอบสนองรวดเร็ว ประมวลผลแม่นยำ ขณะที่ผู้ดูแลระบบให้คะแนนเฉลี่ย 4.89 (SD = 0.41) โดยพึงพอใจในประสิทธิภาพด้านการจัดการข้อมูลและความคิดเห็น ไม่มีปัญหาการทำงานล้มเหลว อีกทั้งยังมีระบบรักษาความปลอดภัยที่ครอบคลุมและเชื่อถือได้ โดยสรุป ระบบได้รับการตอบรับที่ดีจากผู้ใช้งานทุกกลุ่ม และมีศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดในอนาคต

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

ระบบค้นหาห้องน้ำในมหาวิทยาลัยถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบโจทย์การใช้งานของนักศึกษา บุคลากร และผู้มาติดต่อ โดยสามารถแสดงตำแหน่งห้องน้ำบนแผนที่ พร้อมข้อมูลอุปกรณ์ภายในห้องน้ำ และการรองรับการใช้งานของผู้พิการ นอกจากนี้ ยังเปิดให้ผู้ใช้งานรีวิวและให้คะแนน เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพห้องน้ำ จากการสำรวจความพึงพอใจของกลุ่มผู้ใช้งาน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพ ใช้งานง่าย และช่วยให้ค้นหาห้องน้ำได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ข้อเสนอแนะในการพัฒนา ควรเพิ่มฟีเจอร์เพิ่มเติม เช่น ระบบแจ้งเตือนห้องน้ำที่อยู่ใกล้ที่สุด การรายงานปัญหาห้องน้ำแบบเรียลไทม์ และการเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันแผนที่ภายนอก เพื่อเพิ่มความสะดวกในการนำทาง นอกจากนี้ควรมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้สามารถให้บริการผู้ใช้จำนวนมากพร้อมกัน รวมถึงอาจพิจารณาการจัดทำดัชนีสำหรับพิกัด GPS ภายในฐานข้อมูล เพื่อเพิ่มความเร็วในการค้นหาตำแหน่งและคำนวณระยะทางได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] พรทิพา กรุณานนท์, ศศิชา พึ่งเงิน และหทัยรัตน์ เกตุมณีชัยรัตน์. (2561). ระบบแนะนำเส้นทางภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์. *Research Journal-RajamangalaUniversity of Technology Thanyaburi*, 17(1). 45-54.

[2] อภินันทิชัย โจมสติ. (2563). การออกแบบระบบภูมิสารสนเทศเสมือนจริงนำทางการค้นหาตำแหน่งส่วนราชการ ภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์. *วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี*, 1(2), 86-95.

[3] พิชญาภา ธัมมิกกุล. (2566). แนวทางการปรับปรุงห้องน้ำสาธารณะเมืองแพร่โดยใช้กระบวนการมีส่วนร่วม กรณีศึกษา ห้องน้ำสาธารณะวัดพระธาตุช่อแฮ จังหวัดแพร่. *วารสารวิชาการรับใช้สังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 7(1).

[4] S. Chadee and R. Maharaj, "An environmental gap analysis at a university campus," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 525, Jul. 2020. doi: 10.1007/s10661-020-08478-w

[5] K. AL Fararni, F. Nafis, B. Aghoutane, A. Yahyaouy, J. Riffi, and A. Sabr, "Hybrid recommender system for tourism based on big data and AI: A conceptual framework," *Big Data Mining and Analytics*, vol. 4, no. 1, pp. 47–55, Mar. 2021. doi: 10.26599/BDMA.2020.9020015.

[6] S. E. Abney, K. R. Bright, J. McKinney, M. K. Ijaz, and C. P. Gerba, "Toilet hygiene—review and research needs," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 131, no. 6, pp. 2705–2714, Dec. 2021. doi: 10.1111/jam.15121.

[7] S. Habil, S. El-Deeb, and N. El-Bass, "AI-based recommendation systems: The ultimate solution for market prediction and targeting," in *The Palgrave Handbook of Interactive Marketing*, 2023, pp. 683–704. doi: 10.1007/978-3-031-14961-0_30.

การเปรียบเทียบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ

Comparison of Environmental Sound Classification Using Recurrent Neural Networks

มาสวีร์ มาศดิศรโชติ[1*], นิมิตร ทักษวิทยาพงศ์[2] และ นนทกร เลิศวชิรไพบูลย์[3]

[1*]สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และนวัตกรรมการพัฒนาซอฟต์แวร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: masawee.ma@spu.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ (Recurrent Neural Networks: RNNs) ในการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาโครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุม (Gated Recurrent Units: GRU) ซึ่งเป็นโครงข่ายที่ออกแบบมาเพื่อจัดการกับข้อมูลเชิงลำดับเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยได้ใช้ชุดข้อมูล ESC-50 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเสียงสิ่งแวดล้อมมาตรฐานที่ครอบคลุมเสียงจาก 5 หมวดหมู่หลัก ได้แก่ เสียงสัตว์, สภาพอากาศ, กิจกรรมของมนุษย์, เสียงภายในบ้าน และเสียงกลางแจ้ง ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วย 2,000 ตัวอย่างเสียง แต่ละตัวอย่างมีความยาว 5 วินาที และถูกแบ่งเป็น 50 ป้ายกำกับ (labels) ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการทดสอบความสามารถของตัวแบบในการจำแนกเสียงจากบริบทที่หลากหลาย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแบบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในด้านความเร็วในการเรียนรู้และค่าความแม่นยำในการจำแนกเสียง

คำสำคัญ: การจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม, โครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ, หน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว, โครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุม, ประสิทธิภาพ

Abstract

This research aims to compare the performance of Recurrent Neural Networks (RNNs) in environmental sound classification, focusing on Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Units (GRU). These architectures are specifically designed to efficiently process sequential data by retaining contextual information across time steps. The ESC-50 dataset was used in this study, which is a standard environmental sound dataset consisting of five major categories: animal sounds, weather/environmental sounds, human activities, household sounds, and outdoor sounds. The dataset includes 2,000 audio samples, each with a duration of 5 seconds, and is labeled into 50 distinct classes, making it suitable for evaluating model performance in diverse contexts. Experimental results indicate that GRU-based models outperform LSTM and RNN models in terms of both learning speed and classification accuracy. The GRU model achieved the highest performance in both learning speed and classification accuracy.

Keywords: Environmental sound classification, Recurrent Neural Networks – RNNs, Long Short-Term Memory – LSTM, Gated Recurrent Units – GRU, performance

1. บทนำ

การจำแนกเสียงเป็นหนึ่งในหัวข้อที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในงานวิจัยด้านการเรียนรู้ของเครื่อง [1] เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น การตรวจจับเสียงกิจกรรมของมนุษย์ การระบุเสียงสัตว์ การวิเคราะห์สภาพอากาศหรือการตรวจสอบเสียงจากเครื่องจักร ซึ่งการประยุกต์ใช้เหล่านี้สามารถนำไปสู่การพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพชีวิตของมนุษย์และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอัตโนมัติ

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยนำเสนอการเปรียบเทียบโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ (Recurrent Neural Networks: RNNs) [2] สำหรับการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาโครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุม (Gated Recurrent Units: GRU) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกพัฒนามาเพื่อจัดการกับข้อมูลที่เป็นลำดับเวลา โดยใช้กลไกการจดจำบริบทของข้อมูลก่อนหน้าเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าถัดไป ทำให้สามารถเรียนรู้โครงสร้างเชิงลำดับของสัญญาณเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแต่ละตัวแบบ ผู้วิจัยใช้ชุดข้อมูล ESC-50 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเสียงสิ่งแวดล้อมที่ครอบคลุมหมวดหมู่เสียงที่หลากหลาย [3] งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อเปรียบเทียบความสามารถของ LSTM และ GRU ในการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม

และวิเคราะห์ว่าตัวแบบใดมีประสิทธิภาพสูงสุดในการเรียนรู้ลำดับเสียง

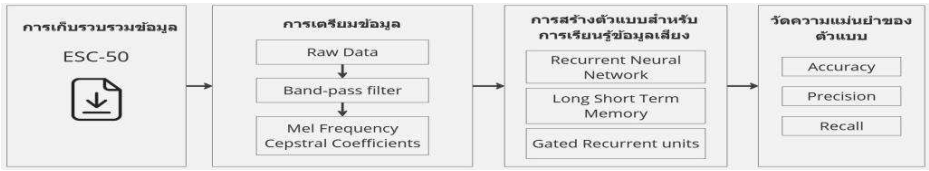
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Boddapati และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบผสม ซึ่งเป็นการผสานจุดแข็งของโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับเข้าด้วยกัน โดยพัฒนาเป็นตัวแบบ Convolutional Recurrent Neural Network (CRNN) และใช้ชุดข้อมูล ESC-50 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลเสียงสิ่งแวดล้อมมาตรฐาน พบว่าตัวแบบ CRNN ให้ค่าความแม่นยำ 60.3% เมื่อใช้สเปกโตรแกรมเป็นคุณลักษณะนำเข้า และให้ค่าความแม่นยำ 60.0% เมื่อใช้คุณลักษณะแบบรวม ได้แก่ สเปกโตรแกรม, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), และ Cross Recurrence Plot (CRP) ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า CRNN มีศักยภาพในการเรียนรู้ทั้งข้อมูลเชิงพื้นที่และลำดับเวลาได้ดี แต่ยังมีพื้นที่สำหรับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแม่นยำให้สูงขึ้น

Freitag และคณะ [5] ได้เสนอแนวทางการจำแนกเสียงโดยใช้ auDeep ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้การเรียนรู้แบบไม่มีผู้สอนโดยอาศัยโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับร่วมกับตัวเข้ารหัส-ถอดรหัสแบบลำดับต่อลำดับ เพื่อค้นหาคุณลักษณะเฉพาะของเสียง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า auDeep สามารถจำแนกเสียงได้แม่นยำถึง 64.3% ซึ่งเป็นค่าความแม่นยำที่สูงกว่าผลลัพธ์ของ Boddapati และคณะ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมชุดข้อมูล ESC-50 โดยผ่านกระบวนการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ หน่วยความจำระยะสั้นแบบยาวและโครงข่ายประสาทเทียมวนกลับแบบมีประตูควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผล (CPU) AMD Ryzen9 5900x หน่วยความจำการเข้าถึงแบบสุ่ม(RAM) 48GB และหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) Nvidia Geforce RTX 4070 super และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบ ดังรูปที่ 1 โดยอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 3.1- 3.4



รูปที่ 1 ขั้นตอนในการสร้างตัวแบบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ใช้ชุดข้อมูล ESC-50 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลมาตรฐานที่นิยมใช้ในงานวิจัยด้านการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม ชุดข้อมูลนี้ประกอบด้วย 2,000 ตัวอย่างเสียง แต่ละตัวอย่างมีความยาว 5 วินาที และถูกจัดหมวดหมู่เป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่ เสียงสัตว์, สภาพอากาศ/สิ่งแวดล้อม, กิจกรรมของมนุษย์, เสียงภายในบ้าน และเสียงนอกบ้าน ซึ่งชุดข้อมูล ESC-50 มีทั้งหมด 50 ป้ายกำกับ โดยแต่ละป้ายกำกับมี 40 ตัวอย่างเสียง

3.2 การเตรียมข้อมูล (Data Preparation)

ก่อนนำชุดข้อมูลเสียงมาใช้ในการฝึกฝนตัวแบบ ผู้วิจัยได้ดำเนินการกรองเสียงรบกวนโดยใช้ตัวกรองความถี่แบบผ่านย่าน (Band-Pass Filter) เพื่อแยกสัญญาณเสียงที่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต้องการ จากนั้นทำการประมวลผลด้วยค่าสัมประสิทธิ์เซปสตรัมบนสเกลเมล (Mel Frequency Cepstral Coefficients; MFCCs) เพื่อสกัดคุณลักษณะสำคัญของเสียงในสภาพแวดล้อม ก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการฝึกตัวแบบเรียนรู้ต่อไป

3.3 การสร้างตัวแบบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม (Modeling)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้เทคนิค 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ เทคนิคหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว และเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมวนกลับแบบมีประตูควบคุม ในการสร้างตัวแบบสำหรับการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม โดยทั้งสามตัวแบบถูกออกแบบให้มีโครงสร้างแบบเดียวกัน ซึ่งโครงสร้างของตัวแบบประกอบด้วยชั้นที่ใช้เทคนิคเฉพาะของตัวแบบได้แก่ ชั้นแรกมี 128 หน่วย ชั้นที่ 2 มี 64 หน่วย และชั้นเชื่อมต่อเต็มรูปแบบ 1 ชั้น ที่มี 5 หน่วย และชั้นสุดท้ายสำหรับการจำแนกประเภทมี 5 หน่วยตามจำนวนป้ายกำกับข้อมูล และมีการปรับแต่งตัวแบบโดยได้กำหนดจำนวนรอบการเรียนรู้ (Epochs) 1000 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบของการเรียนรู้ได้กำหนดขนาดของชุดข้อมูลเท่ากับ 5 ตัวอย่าง และใช้อัลกอริทึมสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ Adam โดยใช้อัตราการเรียนรู้ที่ 0.001

3.4 การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ (Validation)

โดยทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับสร้างตัวแบบ 70% และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบตัวแบบ 30% นอกจากนี้ ได้มีการใช้ Early Stopping ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ช่วยหยุดการฝึกฝนโดยอัตโนมัติหากตัวแบบไม่สามารถเพิ่มค่าความแม่นยำได้อีกต่อไป เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิด Overfitting หลังจากการฝึกฝนเสร็จสิ้น จากนั้นประเมินประสิทธิภาพการจำแนกของตัวแบบโดยใช้เกณฑ์ดังนี้

3.4.1 ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ดังสมการที่ 1

$$\textbf{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

3.4.2 ค่าความแม่นยำของการทำนายผลบวก (Precision) ดังสมการที่ 2

$$\textbf{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

3.4.3 ค่าความสามารถในการตรวจจับค่าบวก (Recall) ดังสมการที่ 3

$$\textbf{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

โดยที่

True Positive (TP): ตัวอย่างที่เป็นคลาสบวกและทำนายถูกต้อง

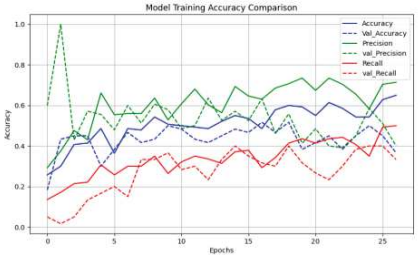
True Negative (TN): ตัวอย่างที่เป็นคลาสลบและทำนายถูกต้อง

False Positive (FP): ตัวอย่างที่เป็นคลาสลบแต่ทำนายผิดว่าเป็นคลาสบวก

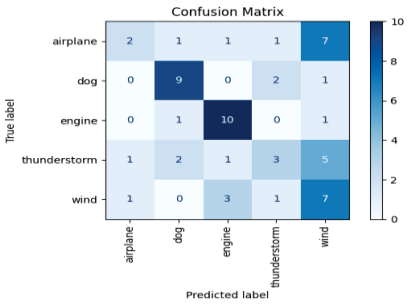
False Negative (FN): ตัวอย่างที่เป็นคลาสบวกแต่ทำนายผิดว่าเป็นคลาสลบ

4. ผลการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมด้วยเทคนิค 3 เทคนิค ได้แก่ เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ เทคนิคหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว และเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมวนกลับแบบมีประตูควบคุม โดยใช้เกณฑ์ในการพิจารณา แสดงได้ดังรูปที่ 2-7

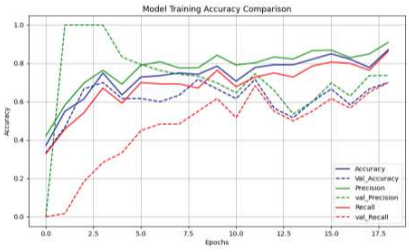


รูปที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ RNNs

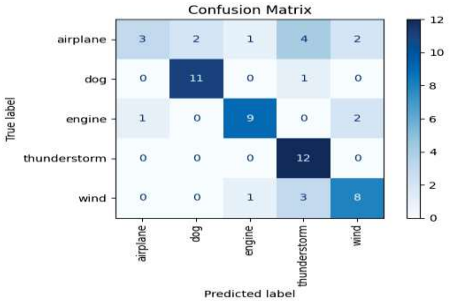


รูปที่ 3 Confusion Matrix ของตัวแบบ RNNs

จากรูปที่ 2 ค่า Accuracy ของ RNNs อยู่ที่ 51.67% ขณะที่ Precision เท่ากับ 63.33% และ Recall อยู่ที่ 31.67% หลังจากการฝึกฝน 17 Epochs จากรูปที่ 3 RNNs สามารถจำแนกคลาส “dog” และ “engine” ได้ดี แต่มีปัญหาในการจำแนกคลาส “wind”, “airplane” และ “thunderstorm” ที่ทำนายผิดค่อนข้างมาก

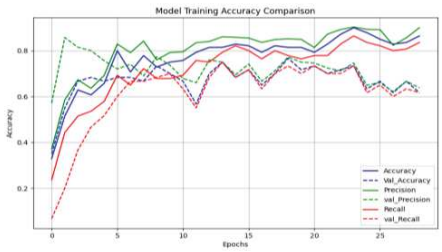


รูปที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ LSTM

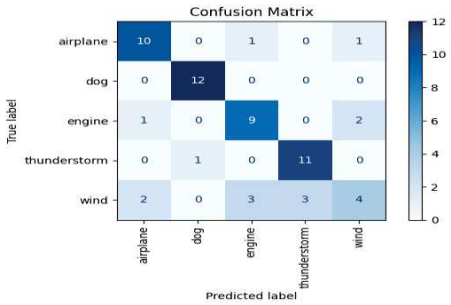


รูปที่ 5 Confusion Matrix ของตัวแบบ LSTM

จากรูปที่ 4 ค่า Accuracy ของ LSTM อยู่ที่ 71.67% ขณะที่ Precision อยู่ที่ 73.33% และ Recall อยู่ที่ 55% หลังจากการฝึกฝน 9 Epoch จากรูปที่ 5 LSTM สามารถจำแนกคลาส “dog”, “thunderstorm”, “engine” และ “wind” ได้ดี แต่มีปัญหาในการจำแนกคลาส “airplane” ที่ทำนายผิดค่อนข้างมาก



รูปที่ 6 ผลการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ GRU



รูปที่ 7 Confusion Matrix ของตัวแบบ GRU

จากรูปที่ 6 ค่า Accuracy ของ GRU อยู่ที่ 76.67% ขณะที่ Precision อยู่ที่ 77.19% และ Recall อยู่ที่ 73.33% หลังจากการฝึกฝน 19 Epoch จากรูปที่ 7 GRU สามารถจำแนกคลาส “dog”, “thunderstorm”, “engine” และ “airplane” ได้ดี แต่มีปัญหาในการจำแนกคลาส “wind” ที่ทำนายผิดค่อนข้างมาก

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอตัวแบบการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุมมีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับและหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาว ผลการทดลองพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุมมีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับและหน่วยความจำระยะสั้นแบบยาวในแง่ของความเร็วในการเรียนรู้และความแม่นยำของการจำแนกเสียงสิ่งแวดล้อม โดยตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับที่มีประตูควบคุมสามารถเพิ่มค่าความแม่นยำได้อย่างรวดเร็วระหว่างกระบวนการฝึกฝน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโครงสร้างประตูควบคุม (Gating Mechanism) ในการจัดการข้อมูลลำดับเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yi-Fei, Xiaoning และ Poh [6] ที่ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ RNNs, LSTM และ GRU ในการจำแนกพฤติกรรมของมนุษย์โดยใช้ชุดข้อมูล AReM โดยพบว่า GRU ให้ค่าความแม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับ RNNs และ LSTM อีกทั้งยังมีจำนวนพารามิเตอร์น้อยกว่า LSTM ทำให้สามารถเรียนรู้ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวกรองความถี่แบบผ่านย่าน (Band-Pass Filter) อาจส่งผลให้คุณลักษณะบางประการของข้อมูลเสียงเกิดการบิดเบือนหรือสูญหาย ซึ่งอาจจำกัดความสามารถของตัวแบบในการเรียนรู้และแยกแยะคุณลักษณะสำคัญของสัญญาณเสียงได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยสังเกตได้จาก Confusion Matrix ของทั้ง 3 ตัวแบบที่จำแนกข้อมูลเสียงผิดไม่ตรงกัน นอกจากนี้ การใช้ชุดข้อมูลที่มีเพียง 5 ป้ายกำกับอาจไม่เพียงพอในการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบในบริบทที่หลากหลาย ดังนั้น ในการศึกษาครั้งถัดไปจะมีการพิจารณาเพิ่มจำนวนป้ายกำกับเป็น 50 รายการ เพื่อให้การประเมินผลมีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งจะพิจารณาปรับเปลี่ยนกระบวนการประมวลผลเสียงก่อนนำเข้าสู่ตัวแบบใหม่ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการดึงคุณลักษณะสำคัญของข้อมูลเสียงมาใช้ในการฝึกตัวแบบให้ได้มากที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะเทคโนโลยีสารสนเทศและมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่สนับสนุนการนำเสนอบทความในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Bansal, A., & Garg, N. K. (2022). Environment sound classification: A descriptive review of the literature. *Intelligent Systems with Applications, 200115*. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200115

[2] Mienye, I. D., Swart, T. G., & Obaido, G. (2024). Recurrent neural networks: A comprehensive review of architectures, variants and applications. *Information, 15*(9) , 517. https://doi.org/10.3390/info15090517

[3] Piczak, J. (2015). Environmental sound classification with convolutional neural networks. *2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*, 1–6.

[4] Boddapati, V., Petef, A., Rasmusson, J., & Lundberg, L. (2017) . Classifying environmental sound using image recognition network. *Proceedings of the IEEE International Conference on Machine Learning for Signal Processing (MLSP)*.

[5] Freitag, M., Amiriparian, S., Pugachevskiy, S., Cummins, N., & Schuller, B. (2017). auDeep: Unsupervised learning of representations from audio with deep recurrent neural networks. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association (INTERSPEECH)*.

[6] Yi-Fei, T., Xiaoning, G., & Poh, S. (2021). Time series activity classification using gated recurrent units. *International Journal of Electrical and Computer Engineering,11*(4), 3551–3558.

การพยากรณ์ความเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเฟสเดียวด้วยปัญญาประดิษฐ์จากข้อมูลแรงสั่นสะเทือนโดยใช้ WTVB01-485

Single phase Motor Damage Prediction Using AI from Vibration Data using WTVB01-485

จิโรจน์ จริตควร[1] และ กฤษฎากร นวลละออง[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
E-mail: Chirot.Ch@spu.ac.th *

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบสำหรับการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว โดยใช้เซ็นเซอร์ WTVB01-485 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32S3 เป็นอุปกรณ์หลักในการรวบรวมข้อมูล ข้อมูลการสั่นสะเทือนถูกสุ่มตัวอย่างทุกวินาทีและนำไปประมวลผลผ่านโมเดลปัญญาประดิษฐ์

โมเดลที่ใช้ประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) และหน่วยความจำระยะยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) โดย CNN ทำหน้าที่สกัดคุณลักษณะที่สำคัญจากสัญญาณสั่นสะเทือน ขณะที่ LSTM เรียนรู้รูปแบบความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลตามเวลา ส่งผลให้โมเดลสามารถตรวจจับความผิดปกติและพยากรณ์แนวโน้มของความเสียหายได้อย่างแม่นยำจาก ค่าความเร่ง และ เวลาประทับ

ผลการทดลองแสดงว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยค่าความแม่นยำสูงกว่า 90% ระบบนี้สามารถนำไปใช้ในการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความล้มเหลวของมอเตอร์

คำสำคัญ: ESP32S3, WTVB01-485, การสั่นสะเทือน, CNN, LSTM, มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว, การพยากรณ์ความผิดปกติ, การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

Abstract

This research presents a system for collecting and analyzing vibration data from a single-phase electric motor using the WTVB01-485 sensor and ESP32S3 microcontroller as the primary data acquisition devices. Vibration data is sampled every second and processed using an artificial intelligence model.

The model consists of a Convolutional Neural Network (CNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) network. CNN extracts key features from the vibration signals, while the LSTM learns temporal patterns in the data. This enables the model to accurately detect anomalies and predict potential damage trends based on acceleration and timestamp data.

Experimental results show that the trained model effectively detects abnormalities in single-phase electric motors, achieving an accuracy of over 90%. This system can apply to predictive maintenance, reducing maintenance costs and preventing failures that could lead to severe motor damage.

Keywords: ESP32S3, WTVB01-485, vibration, CNN, LSTM, single-phase electric motor, anomaly prediction, predictive maintenance

บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและเครื่องจักรกลต่างๆ ความผิดปกติของมอเตอร์ เช่น การเสื่อมสภาพของตลับลูกปืน (Bearing), ความไม่สมดุลของ โรเตอร์ (Rotor Imbalance) และปัญหากลไกภายใน อาจทำให้ประสิทธิภาพลดลงและนำไปสู่ความเสียหายร้ายแรงหากไม่ได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างเหมาะสม

ระบบบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ตรวจจับการสั่นสะเทือนเป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมใช้เพื่อตรวจจับความผิดปกติและพยากรณ์แนวโน้มของความเสียหายของมอเตอร์

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวโดยใช้เซ็นเซอร์ WTVB01-485 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32S3 ข้อมูลการสั่นสะเทือนจะถูกสุ่มตัวอย่างทุกวินาที โดยเก็บข้อมูลแต่ละเคสนาน 5 นาที (สามารถใช้กับมอเตอร์สามเฟสได้) และนำไปประมวลผลผ่านโมเดลปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) สำหรับสกัดคุณลักษณะสำคัญของสัญญาณสั่นสะเทือน และหน่วยความจำระยะยาว (LSTM) สำหรับเรียนรู้รูปแบบความเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ทำให้สามารถตรวจจับความผิดปกติและพยากรณ์แนวโน้มของความเสียหายได้อย่างแม่นยำ

เป้าหมายหลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบที่สามารถตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ และสามารถนำไปใช้ในระบบบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ เพื่อลดความเสี่ยงของความเสียหายที่ไม่คาดคิด และเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลรักษาอุปกรณ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

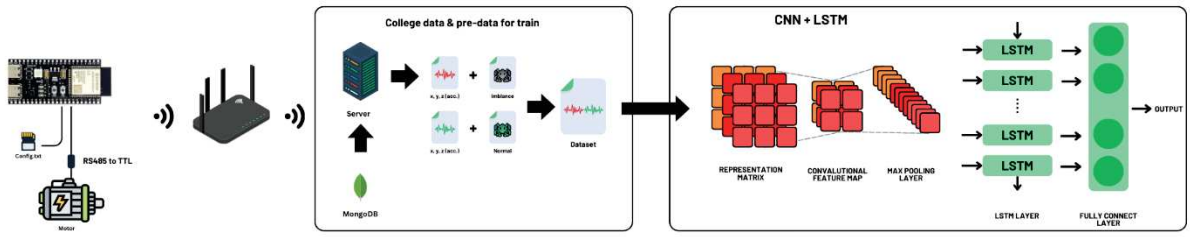
1. **การเฝ้าติดตามมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวผ่าน IoT โดยใช้โมดูล ESP32**งานวิจัยของ **Shukla et al. (2022)** นำเสนอแนวทางการใช้ **Internet of Things (IoT)** ในการตรวจสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบเรียลไทม์ โดยใช้ **ESP32** เป็นหน่วยประมวลผล และเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น เซ็นเซอร์วัดกระแส (ACS 712), เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT 11) และเซ็นเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (ADXL 345) ข้อมูลที่รวบรวมได้ถูกส่งไปยัง **แพลตฟอร์ม ThingSpeak** เพื่อให้สามารถตรวจสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์จากระยะไกล นอกจากนี้ยังสามารถตั้งค่าการแจ้งเตือนเมื่อค่าพารามิเตอร์ผิดปกติ ซึ่งช่วยให้สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้
2. **การใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ ในการตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้า** งานวิจัยหลายฉบับกล่าวถึงการใช้เซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ เช่น
   2.1. **เซ็นเซอร์ ADXL 345** สำหรับตรวจจับแรงสั่นสะเทือนของมอเตอร์
   2.2. **เซ็นเซอร์ ACS 712** สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า
   2.3. **เซ็นเซอร์ DHT 11** สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น ข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์เหล่านี้ถูกนำไปใช้เพื่อระบุแนวโน้มความผิดปกติของมอเตอร์ และช่วยให้สามารถดำเนินมาตรการซ่อมบำรุงได้อย่างทันท่วงที

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว โดยใช้เซ็นเซอร์ WTVB01-485 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32S3 ในการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ทุกๆ 1 วินาที
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ในการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว และตรวจสอบความแม่นยำของการทำนายความเสียหายจากการใช้โมเดล AI
3. เพื่อเสนอแนะการประยุกต์ใช้งานระบบนี้ในภาคอุตสาหกรรมสำหรับการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความล้มเหลวของมอเตอร์

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้แนวทางเชิงทดลองเพื่อพัฒนาและทดสอบระบบการพยากรณ์ความเสียหายของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวที่ไม่สมดุล โดยแบ่งกระบวนการออกเป็นสามขั้นตอนหลัก ได้แก่ การออกแบบและพัฒนาโครงสร้างระบบ, การเก็บรวบรวมข้อมูล, และการพัฒนาและทดสอบโมเดลปัญญาประดิษฐ์



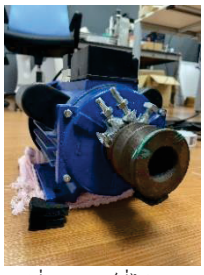
รูปที่ 1 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล และสร้างโมเดล ปัญญาประดิษฐ์ โดยใช้ CNN + LSTM

1. **การเตรียมอุปกรณ์**

1.1. **มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว** ที่มีการทำให้ไม่สมดุล โดยการเพิ่มน้ำหนักที่ไม่สมดุลให้กับโรเตอร์ของมอเตอร์ เพื่อจำลองสถานการณ์ที่มอเตอร์มีการหมุนที่ไม่สมดุล (Unbalance Condition)



รูปที่ 2 มอเตอร์ที่ปกติ



รูปที่ 3 มอเตอร์ที่ไม่สมดุล

1.2. **เซ็นเซอร์ WTVB01-485** ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์

1.3. **ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3** ที่ใช้สำหรับอ่านข้อมูลจาก sensor และสื่อสารกับ server

1.4. **โมดูลเชื่อมต่อ RS485 (RS485 to TTL) ใช้สื่อสารกับ sensor**

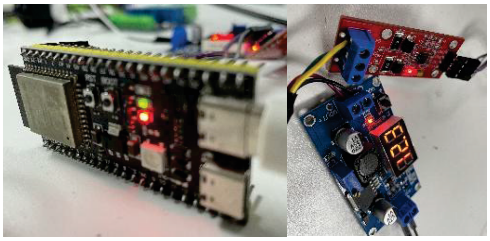
1.5. **เร้าเตอร์ (Router/Access point) ใช้สำหรับเชื่อมต่อเน็ทเวิร์ค เพื่อเชื่อมต่อกับ server**

1.6. **SD Card ใช้สำหรับการตั้งค่าต่างๆในตัว ESP32S3**

2. **การเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือน**

2.1. เซ็นเซอร์ WTVB01-485 จะทำการเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ทุกๆ 0.01 วินาที โดยการจับข้อมูลความเร่ง (acceleration) โดยแยกเก็บเคสละ 5 นาที

2.2. ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 จะเก็บข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ผ่านทาง RS485 to TLL ทุกๆ 0.1 วินาที ก่อนจะทำการส่งข้อมูลดังกล่าวไปยัง เซิร์ฟเวอร์ ด้วยโปรโตคอล **MQTT**



รูปที่ 4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 และ RS485 to TTL

2.3. ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ได้จะถูกส่งไปยัง **MQTT Broker** ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งข้อมูลไปยัง **MongoDB** เพื่อเก็บข้อมูล

3. **การวิเคราะห์ข้อมูล**

3.1. ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่เก็บไว้ใน MongoDB จะถูกนำมาประมวลผล โดยจะใส่คำตอบตามชุดข้อมูลที่เก็บแล้วแบ่งข้อมูลออกเป็นเฟรม โดยแต่เคสผิดปกติจะมีความเร่งที่ไม่สม่ำเสมอ และสูงผิดปกติ นอกจากนี้ระยะเวลาการทำงานของมอเตอร์ก็มีการแสดงผลความเสียหายได้เช่นกัน ดังนั้นจึงใส่ เวลาประทับ มาวิเคราะห์ด้วย



รูปที่ 5 ภาพตัวอย่างการแบ่งข้อมูล

3.2. ข้อมูล ความเร่ง และ เวลาประทับ ที่ถูกแบ่งเป็นเฟรมจะถูกใช้ในการฝึกโมเดล โดยแบ่งชุดข้อมูลเป็น 70:30 และใช้ โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) เพื่อสกัดคุณลักษณะที่สำคัญจากสัญญาณการสั่นสะเทือน และหน่วยความจำระยะยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) เพื่อเรียนรู้รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลตามเวลา

3.3. โมเดลที่ได้รับการฝึกจะสามารถตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ และพยากรณ์แนวโน้มของความเสียหายได้อย่างแม่นยำ

4. การทดสอบและประเมินผล

4.1. การทดสอบระบบ AI จะทำการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในการตรวจจับความผิดปกติ โดยการทดสอบกับข้อมูลการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ที่ไม่สมดุล และผลของการวิเคราะห์ ดังนี้

Class	Precision	Recall	F1-Score
Normal	100%	93%	97%
Imbalance	98%	100%	99%

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบตรวจสอบความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียวโดยใช้เซ็นเซอร์ WTVB01-485 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 เพื่อเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนและส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ผ่านโปรโตคอล MQTT ข้อมูลที่ได้รับถูกแบ่งเป็นเฟรมก่อนนำไปฝึกโมเดลปัญญาประดิษฐ์ โมเดลที่ใช้ประกอบด้วย **Convolutional Neural Network (CNN)** เพื่อสกัดคุณลักษณะจากข้อมูล และ **Long Short-Term Memory (LSTM)** โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความแม่นยำ 97.74%

จากผลการวิจัย ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน **Predictive Maintenance** เพื่อเฝ้าระวังและป้องกันความเสียหายของมอเตอร์ ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานของอุตสาหกรรมที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเฟสเดียว นอกจากนี้ก็ยังสามารถประยุกต์ใช้กับ มอเตอร์สามเฟส ได้ด้วยกระบวนการเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1]. M. Markiewicz, M. Wielgosz, M. Bocheński, W. Tabaczyński, T. Konieczny, and L. Kowalczyk, Predictive maintenance of induction motors using ultra-low power wireless sensors and compressed recurrent neural networks, *IEEE Access, vol. 7*, pp. 178891-178902, Dec. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953019.

[2]. Abhinab Shukla ,1S. P. Shukla and Kinde Anlay Fante 5 ,2S. T. Chacko ,3Md. Khaja Mohiddin, (2022). Monitoring of single-phase induction motor through IoT using ESP32 module. *Journal of Sensors, 2022*, Article ID 8933442, 8 pages. https://doi.org/10.1155/2022/8933442

[3]. Ali Rastegari, Andreas Archenti, Mohammadsadegh Mobin, (2017). Condition based maintenance of machine tools: Vibration monitoring of spindle units. *Proceedings of the 2017 Reliability and Maintainability Symposium (RAMS®)*, Florida, USA. https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889683

[4]. Barthélemy, J., Verstaevel, N., Forehead, H., & Perez, P. (2019). Edge-computing video analytics for real-time traffic monitoring in a smart city. *Sensors, 19*(9), 2048. https://doi.org/10.3390/s19092048

[5]. Hakim, M., Borhan, A. A., Ahmed, A. N., Al-Waily, M., & Abdellatif, A. (2023). A systematic review of rolling bearing fault diagnoses based on deep learning and transfer learning: Taxonomy, overview, application, open challenges, weaknesses, and recommendations. *Ain Shams Engineering Journal, 14*, 101945. https://www.sciencedirect.com

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบตรวจจับ ควัน, LPG, และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง

A Development of a Smoke, LPG, and Carbon Monoxide Detection System Using Internet of Things Technology

ภูมินทร์ ฮงมา[1] ระวิวร ฮงมา[2] และ ธราธิป ภู่ระหงษ์[3]

[1,2]คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม E-mail: phumin_h@npu.ac.th
[3]คณะเทคโนโลยีอุสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม E-mail: Tharathip_ph@npu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพระบบตรวจจับก๊าซหลายชนิด เช่น ควัน, LPG, และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้เซ็นเซอร์ MQ-2 และใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง เชื่อมต่อผ่านบอร์ด NodeMCU 12E ESP8266 เพื่อส่งข้อมูลรายงานผลไปยังแอปพลิเคชัน Blynk และจากการทดสอบระบบ เมื่อมีการนำไฟแช็คเปิดบริเวณเซ็นเซอร์ ระบบสามารถตรวจจับก๊าซได้อย่าง ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซเกิน 30 ppm ระบบจะแจ้งเตือนทันที ทั้งในแอปพลิเคชันและผ่านอีเมล พร้อมเปิดใช้งาน Buzzer และไฟ LED โดยการประเมินผลประสิทธิภาพของระบบอยู่ในระดับดี

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง, เซ็นเซอร์ MQ-2, NodeMCU 12E ESP8266, แอปพลิเคชันBlynk

Abstract

This research aims to develop and study the efficiency of a multi-gas detection system for gases such as smoke, LPG, and carbon monoxide, utilizing the MQ-2 sensor and IoT technology connected via a NodeMCU 12E ESP8266 board to transmit data and reports to the Blynk application. Testing results demonstrate that the system can accurately and efficiently detect gas when a lighter is ignited near the sensor. When the gas concentration exceeds 30 ppm, the system immediately generates alerts both within the application and via email, while also activating the buzzer and LED. The overall performance evaluation of the system is considered to be good.

Keywords: Internet of Things, MQ-2 sensor, NodeMCU 12E ESP8266, Blynk Application

1. บทนำ

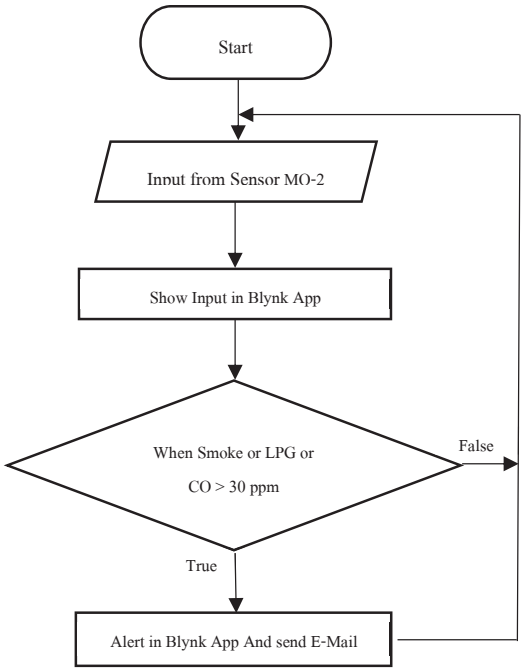
อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) สามารถทำให้วัตถุสามารถรับรู้สภาพแวดล้อมและถูกควบคุมได้จากระยะไกลผ่านโครงสร้างพื้นฐานเครือข่ายที่มีอยู่ โดยมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซอฟต์แวร์ เซ็นเซอร์ และการเชื่อมต่อกับเครือข่าย อาทิ เช่น บ้านอัจฉริยะ ระบบขนส่งอัจฉริยะ และเมืองอัจฉริยะ โดยวัตถุแต่ละชิ้นสามารถถูกระบุได้โดยไม่ซ้ำกันผ่านระบบคอมพิวเตอร์ฝังตัว และสามารถทำงานร่วมกันได้บนโครงสร้างพื้นฐานอินเทอร์เน็ตที่มีอยู่แล้วในปัจจุบัน [1] MQ-2 เป็นเซ็นเซอร์ก๊ซตัวนำ ที่มีความไวต่อก๊าซหลายชนิด เช่น ควัน แก๊ส LPG และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) โดยมีไลบรารีช่วยให้นักพัฒนาสามารถอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ MQ-2 ได้ง่ายขึ้น [2][3] โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมและประมวลผลข้อมูลในระบบ IoT โดยทั่วไปแล้ว บอร์ดที่ใช้ในชุดนี้คือ NodeMCU หรือ ESP8266 ซึ่งมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ อาทิ ขนาดที่เล็กกะทัดรัด เหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่จำกัด ราคาประหยัด ทำให้สามารถเข้าถึงเทคโนโลยี IoT ได้ง่ายขึ้น มี Wi-Fi ในตัว [4] และ Blynk เป็นแพลตฟอร์มที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการพัฒนาและใช้งานระบบ IoT โดยเน้นความง่ายในการใช้งาน ผู้ใช้สามารถสร้างแอปพลิเคชันบนมือถือเพื่อควบคุมอุปกรณ์ IoT ต่างๆ ได้อย่างง่ายดาย เช่น การเปิด-ปิดไฟ การปรับอุณหภูมิ หรือการตรวจสอบค่าเซ็นเซอร์ต่างๆ นอกจากนี้ Blynk ยังรองรับการสร้าง Web Dashboard เพื่อแสดงผลข้อมูลและควบคุมอุปกรณ์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อีกด้วย [5]

จากปัญหาความปลอดภัยในบ้านเรือนเป็นสิ่งที่ทุกคนให้ความสำคัญ การเกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่น ไฟไหม้จากแก๊สรั่ว หรือการรั่วไหลของก๊าซพิษต่างๆ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อทรัพย์สินจนถึงชีวิตได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบตรวจจับก๊าซหลายชนิด เช่น ควัน, LPG, และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้เซ็นเซอร์ MQ-2 โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อสร้างระบบเตือนภัยที่สามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้ทันทีเมื่อตรวจพบก๊าซอันตราย ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ถึงอันตรายที่เกิดขึ้นและดำเนินการแก้ไขได้อย่างทันท่วงที

2. การดำเนินการวิจัย

2.1 รูปแบบการทำงานของระบบ (Flowchart)

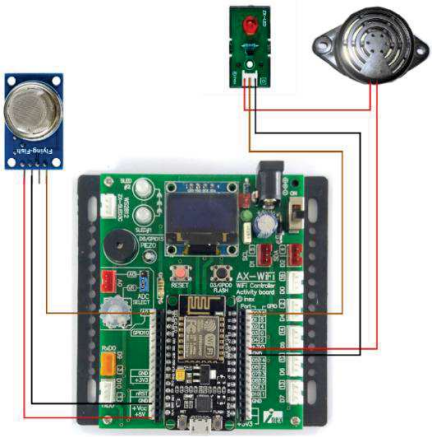
ระบบเริ่มจากระบบรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ MQ-2 โดยระบบจะอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ MQ-2 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจจับก๊าซต่างๆ เช่น ควัน, แก๊ส LPG และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ MQ-2 จะถูกนำไปแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าได้แบบเรียลไทม์ โดยระบบจะมีเงื่อนไขการทำงาน เมื่อระบบจะทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ หากค่าของควัน, แก๊ส LPG และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สูงเกินกว่าค่าที่กำหนด (True) คือ 30 ppm จะถือว่ามีระดับแก๊สเป็นอันตรายระบบจะส่งสัญญาณเตือนไปยังแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งาน และส่งอีเมลไปยังที่อยู่อีเมลที่กำหนดไว้ เพื่อแจ้งเตือนผู้เกี่ยวข้อง แต่หากค่าก๊าซที่ตรวจจับได้ ไม่เกินค่าที่กำหนด (False) ระบบจะวนกลับไปเพื่อทำการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ซ้ำอีกครั้ง



รูปที่ 1 รูปแบบการทำงานของระบบ (Flowchart)

2.2 ออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบ

ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆดังนี้ 1.บอร์ด AX-WiFi ติดตั้งโมดูล NodeMCU-12E พร้อม WiFi, 2.ZX-LED บอร์ดขับ LED 8 มม., 3.Analog Smoke LPG CO Gas Sensor MQ-2, 4.Active Buzzer SFM-27 โดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีบอร์ด AX-WiFi ติดตั้งโมดูล NodeMCU-12E พร้อม WiFi เป็นส่วนประกอบหลัก ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์และสั่งการไปยังอุปกรณ์อื่นๆ โดยมีเซ็นเซอร์ตรวจจับแก๊ส MQ-2 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจจับแก๊สประเภทต่างๆ เช่น ควัน, แก๊ส LPG และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และมีโมดูลเสียง (Active Buzzer SFM-27) และ ZX-LED บอร์ดขับ LED 8 มม. เพื่อแจ้งเตือน

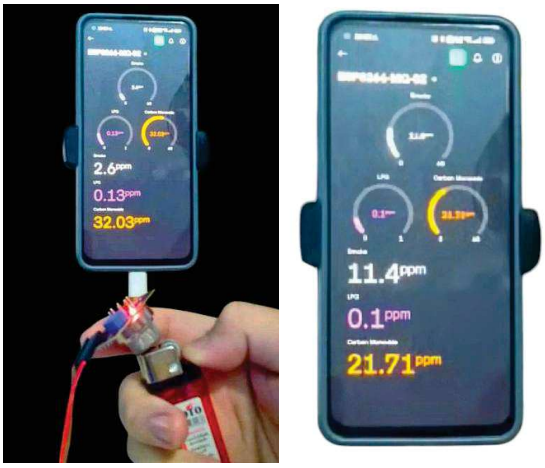


รูปที่ 2 ออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบ

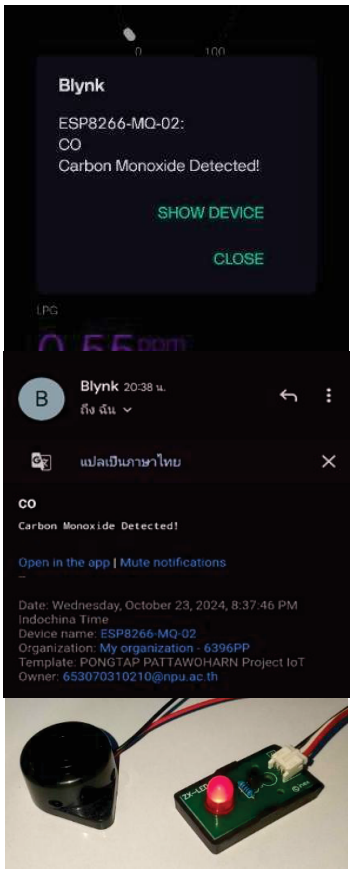
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบการทำงานระบบ

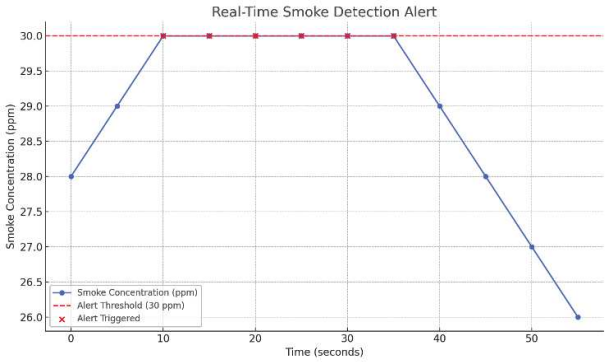
จากการทดสอบการทำงานของระบบ เมื่อมีการนำไฟแช็คที่บรรจุก๊าซบิวเทนอยู่ ทดสอบเปิดไฟแช็คบริเวณเซ็นเซอร์ MQ-2 พบว่าเซ็นเซอร์ MQ-2 สามารถตรวจจับก๊าซได้ โดยเซ็นเซอร์ MQ-2 จะไม่ระบุ "ระยะทาง" ในการตรวจจับ แต่จะเน้นการตรวจจับเรื่องของ “ความเข้มข้นของก๊าซ” และใช้เวลาในการตอบสนอง (Response Time) ในการตรวจจับประมาณ 1 – 30 วินาที โดยสังเกตได้จากตัวเลขที่หน้าจอ Smart Phone ดังรูปที่ 3 และเมื่อตัวเลขของก๊าซ CO มีค่ามากกว่า 30 ppm ตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ใน Smart Phone จะมี Alert Pop-up ขึ้นมาแจ้งเตือนว่า Carbon Monoxide Detected! และจะมีการส่ง E-mail แจ้งเตือนจาก Blynk และที่วงจรของบอร์ด Buzzer และ ไฟ LED จะถูกเปิดใช้งาน และระบบจะแจ้งเตือน ณ ที่อุปกรณ์ระบบติดตั้งด้วยไฟ LED แสดง พร้อมกับส่งสัญญาณเสียงแจ้งเตือน ดังรูปที่ 4 และเมื่อนำผลการทดสอบการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซเทียบกับเวลาในการตอบสนองนำมาสร้างเป็นกราฟได้ผล ดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 ค่าตัวเลขที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ MQ-2



รูปที่ 4 แจ้งเตือนไปยัง E-mail และไฟ LED พร้อมกับส่งสัญญาณเสียงแจ้งเตือน ณ ที่อุปกรณ์ระบบติดตั้ง



รูปที่ 5 ผลการตรวจจับความเข้มข้นของก๊าซเทียบกับเวลาในการตอบสนอง

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการนำระบบให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ได้พิจารณาและประเมินประสิทธิภาพ โดยใช้แบบประเมินคุณภาพ และนำมาวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติพื้นฐานโดยเป็นไปตามเกณฑ์ [6] ซึ่งกำหนดผลการประเมินและแปลความหมายไว้ ดังนี้

ค่าเฉลี่ย 5.00 - 4.50 คือ มีประสิทธิภาพระดับดีมาก
ค่าเฉลี่ย 4.49 - 3.50 คือ มีประสิทธิภาพระดับดี
ค่าเฉลี่ย 3.49 - 2.50 คือ มีประสิทธิภาพระดับปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 2.49 - 1.50 คือ มีประสิทธิภาพระดับน้อย
ค่าเฉลี่ย 1.49 - 1.00 คือ มีประสิทธิภาพระดับน้อยที่สุด

และสรุปผล ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ

รายการ	$\bar{x}$	S.D.	ระดับ
ด้านอุปกรณ์/ฮาร์ดแวร์	**4.00**	**0.46**	**ดี**
1. การเลือกใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ได้อย่างเหมาะสม	3.67	0.58	ดี
2. อุปกรณ์มีประสิทธิภาพการทำงานได้คงทนยาวนาน	4.00	0.00	ดี
3. สามารถนำอุปกรณ์ไปติดตั้งได้ง่าย	4.33	0.58	ดี
4. สามารถซ่อมบำรุงอุปกรณ์ได้ง่าย	3.67	0.58	ดี
5. อุปกรณ์มีความปลอดภัยในการใช้งาน	4.33	0.58	ดี
ด้านฟังก์ชันทำงาน	**4.50**	**0.68**	**ดีมาก**
1. ระบบมีความรวดเร็วในการทำงาน	4.67	0.58	ดีมาก

2. การวิเคราะห์ค่าของเซนเซอร์ต่าง ๆ มีประสิทธิภาพ	4.00	1.00	ดี
3. ฟังก์ชันทำงานของระบบทำงานได้อย่างถูกต้องครบถ้วน	4.67	0.58	ดีมาก
4. การประมวลผลของแอปพลิเคชันและการส่งค่ามีความรวดเร็ว	4.67	0.58	ดีมาก
ค่าเฉลี่ยโดยรวมทุกด้าน	**4.25**	**0.57**	**ดี**

จากตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบจากผู้เชี่ยวชาญ โดยเฉลี่ยโดยรวมทุกด้านเท่ากับ 4.25 อยู่ในระดับดี ซึ่งมีด้านฟังก์ชันการทำงาน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 อยู่ในระดับดีมาก และด้านอุปกรณ์/ฮาร์ดแวร์ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 อยู่ในระดับดี ตามลำดับ

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบตรวจจับก๊าซอันตราย เช่น ควัน, LPG, และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยใช้เซ็นเซอร์ MQ-2 เชื่อมต่อกับบอร์ด ESP8266 หรือ NodeMCU 12E ซึ่งสามารถรายงานผลและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และแสดงค่าต่างๆไปยังสมาร์ทโฟนของผู้ใช้งาน โดยเมื่อเซ็นเซอร์ MQ-2 ตรวจพบความเข้มข้นของก๊าซเกินค่าที่กำหนด ระบบจะส่งข้อมูลผ่านระบบ Wi-Fi ที่เชื่อมต่อไปยังระบบคลาวด์ของแอปพลิเคชัน Blynk และระบบจะทำการส่งสัญญาณการแจ้งเตือนทั้งผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และอีเมล รวมถึงเปิดใช้งานเสียง Buzzer และไฟ LED เพื่อเตือนภัยทันที ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ถึงสถานการณ์และดำเนินการแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว และจากการทดสอบระบบ เมื่อมีการนำไฟแช็คที่บรรจุก๊าซบิวเทนอยู่ ทดสอบเปิดไฟแช็คใส่ที่เซ็นเซอร์ ระบบสามารถตรวจจับก๊าซได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซเกิน 30 ppm ระบบจะแจ้งเตือนทันที ทั้งในแอปพลิเคชันและผ่านอีเมล พร้อมเปิดใช้งาน Buzzer และไฟ LED แสดงถึงความพร้อมใช้งานและความน่าเชื่อถือของระบบในการตรวจจับก๊าซอันตราย ทั้งนี้ ระบบยังสามารถพัฒนาให้รองรับการใช้งานในสถานการณ์จริงได้ โดยการประเมินผลประสิทธิภาพของระบบจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่าโดยรวมระบบมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับดี และมีด้านฟังก์ชันการทำงานอยู่ในระดับดีมาก และด้านอุปกรณ์/ฮาร์ดแวร์ อยู่ในระดับดี ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนมซึ่งสนับสนุนงบประมาณ ขอขอบคุณนักวิจัยและบุคลากรทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ตลอดจนขอบคุณชุมชนที่ได้ร่วมพัฒนางานวิจัยจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] ดนัย เจษฎาฐิติกุล และจารุต บุศราทิจ. การใช้งานและการทดลอง ESP32 Arduino และ IoT.กรุงเทพฯ: บริษัท อีทีที จำกัด. 2567.

[2] CyberTice. สอนใช้งาน NodeMCU ESP8266 เซ็นเซอร์ตรวจจับควัน LPG CO MQ2 Smoke Gas Sensor. [ออนไลน์] 2567. [สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2567].จาก https://www.cybertice.com/article/197/สอนใช้งาน-nodemcu-esp8266-เซ็นเซอร์ตรวจจับควัน-lpg-co-mq2-smoke-gas-sensor

[3] Alsan Parajuli. IoT Smoke & Gas Detector using ESP8266 & Blynk. [ออนไลน์] 2567. [สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2567].จาก https://iotprojectsideas.com/

[4] inex. IoT Activity Kit Netpie version. [ออนไลน์] 2567. [สืบค้นวันที่ 20 กันยายน 2567].จาก https://inex.co.th/home/product/iot-activity-kit-netpie-version/

[5] สุวิทย์ กิระวิทยา และคณะ. การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์และเซ็นเซอร์ในการสร้างนวัตกรรม. กรุงเทพฯ: บริษัท ไทยบริดจสโตน จำกัด, 2562.

[6] บุญชม ศรีสะอาด. การวิจัยเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสารส์น. 2543.

ประวัติผู้เขียน



ภูมินทร์ ฮงมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครบุรี ปี พ.ศ.2550 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์



ระวิวร ฮงมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครบุรี ปี พ.ศ.2550 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์



ธราธิป ภู่ระหงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ.2549 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่

The Development of Mobile Dust Monitoring and Warring System

มารุต รักษา[1*] สัญญา ผาสุข[1] ชยานิษฐ์ บุญสนิท [1] และ พรชัย แคล้วอ้อม[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

E-mail: marut.r@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยการพัฒนาระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดค่าฝุ่นละอองในอากาศสามารถรายงานผลได้แบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเซ็นเซอร์ PMS3003 สำหรับตรวจวัดค่าฝุ่น PM1.0, PM2.5 และ PM10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 สำหรับประมวลผลและเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi เพื่อส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชัน Blynk IoT และจอ LCD Iสำหรับแสดงผลข้อมูล เมื่อค่าฝุ่นเกินกว่าระดับที่กำหนดระบบจะส่งสัญญาณเตือนผ่านลำโพงโดยอัตโนมัติ เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งานให้สามารถหลีกเลี่ยงหรือเตรียมการป้องกันตนเองได้อย่างทันท่วงที อุปกรณ์นี้ช่วยเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลคุณภาพอากาศ และสามารถใช้งานได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระดับครัวเรือน ชุมชน เป็นต้นแบบของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อเสริมสร้างความปลอดภัยด้านสุขภาพและคุณภาพชีวิตของประชาชน

คำสำคัญ: อุปกรณ์ตรวจวัดฝุ่น, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ค่าฝุ่น PM 2.5

Abstract

This study developed a real-time dust monitoring device using Internet of Things (IoT) technology to improve public access to air quality data. The system integrated a PMS3003 sensor for PM1.0, PM2.5, and PM10 detection, an ESP8266 microcontroller for data processing and wireless transmission, and Blynk IoT for real-time display. An LCD and an active buzzer provided local visualization and alerts. The device proved effective in delivering timely notifications when dust levels exceeded safe thresholds and demonstrated potential for low-cost deployment in households, communities, and educational settings to enhance environmental awareness and health protection.

Keywords: Dust measurement device, Internet of Things (IoT), PM 2.5

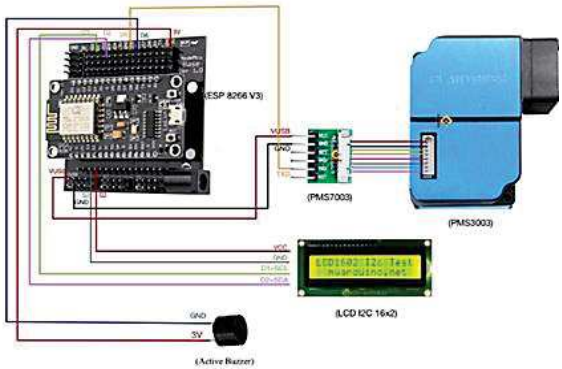
1. บทนำ

มลพิษทางอากาศเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขที่ทวีความรุนแรงขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะในเขตเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีกิจกรรมอุตสาหกรรมหนาแน่น [1] อนุภาคฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM2.5) ถือเป็นมลพิษทางอากาศที่สร้างความกังวลอย่างยิ่งต่อสุขภาพของประชาชน เนื่องจากมีขนาดเล็กมากจนสามารถแทรกซึมผ่านระบบทางเดินหายใจเข้าสู่กระแสเลือดได้โดยตรง ส่งผลให้เกิดโรคทางเดินหายใจเรื้อรัง โรคหัวใจและหลอดเลือด ตลอดจนโรคมะเร็งในระยะยาว [2] องค์การอนามัยโลกรายงานว่ามีผู้เสียชีวิตจากมลพิษทางอากาศประมาณ 7 ล้านคนต่อปีทั่วโลก [3] แม้ว่าหน่วยงานภาครัฐจะติดตั้งสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเพื่อเฝ้าระวังและแจ้งเตือนประชาชน แต่สถานีตรวจวัดเหล่านี้มักมีจำนวนจำกัดและมีต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษาสูง ส่งผลให้การครอบคลุมพื้นที่ทำได้ไม่ทั่วถึง [4] ช่องว่างนี้จึงเป็นโอกาสสำคัญในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีต้นทุนต่ำ ขนาดกะทัดรัด และสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อรายงานข้อมูลแบบเรียลไทม์ การบูรณาการเทคโนโลยี IoT กับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (WSN) และการประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Computing) เปิดโอกาสให้เกิดการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนที่เหมาะสม [5] ในปัจจุบัน การใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดฝุ่นละออง เช่น PMS3003 ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ที่มีความสามารถในการเชื่อมต่อ Wi-Fi ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบ IoT เนื่องจากมีราคาไม่แพง ใช้พลังงานต่ำ และสามารถส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์มออนไลน์ได้อย่างสะดวก [6] อย่างไรก็ตามความท้าทายที่สำคัญในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดราคาประหยัดเหล่านี้คือความแม่นยำและความเชื่อถือได้ของข้อมูลเมื่อเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน [7] งานวิจัยพัฒนาวิธีการสอบเทียบ (Calibration) และอัลกอริทึมการปรับปรุงข้อมูล เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเซ็นเซอร์ราคาประหยัด โดยอาศัยเทคนิคทางสถิติและการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) [8]

ประเทศไทยปัญหามลพิษทางอากาศโดยเฉพาะฝุ่น PM2.5 เป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและเมืองใหญ่ รวมถึงพื้นที่ภาคเหนือในช่วงฤดูหมอกควัน [9] แม้จะมีความพยายามในการแก้ไขปัญหาจากหน่วยงานภาครัฐ แต่การขาดแคลนข้อมูลคุณภาพอากาศที่ครอบคลุมและทันต่อเหตุการณ์ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญในการกำหนดนโยบายและมาตรการที่มีประสิทธิภาพ บทความวิจัยนี้มุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในการพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพอากาศต้นทุนต่ำ โดยเน้นที่การตรวจวัดฝุ่นละออง PM2.5 การพัฒนาระบบแสดงผลและแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนานโยบายด้านการส่วนร่วมของประชาชนในการเฝ้าระวังและป้องกันผลกระทบจากมลพิษทางอากาศในอนาคต

2. หลักการและวิธีการ

โครงการวิจัยนี้ใช้เทคโนโลยี Internet of Things ในการตรวจวัดคุณภาพอากาศ โดยใช้เซ็นเซอร์ PMS3003 สำหรับตรวจจับค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ระบบจะใช้ บอร์ด ESP8266 เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและส่งข้อมูลค่าฝุ่นไปยัง แอปพลิเคชัน Blynk IoT เพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตามคุณภาพอากาศแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ ระบบยังมีการตั้งค่า แจ้งเตือนอัตโนมัติ เมื่อค่าฝุ่นเกินเกณฑ์ที่กำหนด โดยใช้เสียงแจ้งเตือนและการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถปรับตัวและลดความเสี่ยงจากมลพิษทางอากาศ เช่น การสวมหน้ากากป้องกัน หรือการงดทำกิจกรรมกลางแจ้ง



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่

จากรูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่มีองค์ประกอบคือ PMS3003 คือเซ็นเซอร์วัดฝุ่นละอองที่สามารถตรวจจับและวัดคุณภาพอากาศ โดยเฉพาะอนุภาค PM1.0, PM2.5 และ PM10 ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ PMS3003 ส่งยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตและประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์ได้ ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลระบบนี้ไปยังแพลตฟอร์ม Blynk IoT โดยให้มือถือที่ผู้ใช้สามารถติดตามและโต้ตอบกับอุปกรณ์ IoT ของตนได้ ผ่าน สามารถส่งเสียงเตือนผ่านบัซเซอร์ และยังส่งข้อมูลไปยังคลาวด์เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันมือถือได้

2.1 การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือส่วนของฮาร์ดแวร์ เซ็นเซอร์ PMS3003ใช้ในการวัดค่าฝุ่น PM2.5 และ PM10 ในอากาศบอร์ด ESP8266 ใช้ในการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์กับอินเทอร์เน็ตและส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชัน ส่วนของซอฟต์แวร์การใช้ แอปพลิเคชัน Blynk IoT บนสมาร์ทโฟนเพื่อแสดงข้อมูลค่าฝุ่นแบบเรียลไทม์ รวมถึงการตั้งค่าการแจ้งเตือนเมื่อค่าฝุ่นเกินระดับที่กำนดการตั้งค่าการเชื่อมต่อระหว่างเซ็นเซอร์และแอปพลิเคชันผ่านการโปรแกรมบอร์ด ESP8266 เพื่อให้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์สามารถส่งไปยังแอปพลิเคชันได้ ส่วนของการแจ้งเตือนและการแสดงผล เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 เกินเกณฑ์ที่กำหนดระบบจะทำการแจ้งเตือนผู้ใช้ผ่านการแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk IoT ทั้งในรูปแบบข้อความแจ้งเตือนและเสียง เพื่อให้ผู้ใช้สามารถหลีกเลี่ยงกิจกรรมกลางแจ้งหรือใช้เครื่องมือป้องกัน เช่น หน้ากากอนามัย เป็นต้น

2.2 การออกแบบแอปพลิเคชัน Blynk IoT

Blynk IoT ถูกออกแบบให้ใช้งานง่าย โดยมีส่วนติดต่อที่ใช้งานสะดวกในการแสดงผลค่าฝุ่นในรูปแบบกราฟิกและตัวเลขที่สามารถอ่านค่าได้ทันที นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันการตั้งค่าการแจ้งเตือนเมื่อค่าฝุ่นสูงเกินระดับที่กำหนด ผู้ใช้สามารถรับข้อมูลได้ทั้งในแบบแสดงผลตัวเลขและกราฟเส้นที่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าฝุ่นในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถติดตามสภาพอากาศได้

3. ผลการทดลอง

การทดสอบระบบตรวจวัดค่าฝุ่น PM2.5 โดยใช้เซ็นเซอร์ PMS3003 และบอร์ด ESP8266 เชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk IoT แสดงผลค่าฝุ่นในรูปแบบเรียลไทม์รวมถึงการทดสอบฟังก์ชันการแจ้งเตือนเมื่อค่าฝุ่นเกินเกณฑ์ อุปกรณ์ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่ติดตั้งตามรูปที่ 2

3.1 การทดสอบการวัดค่าฝุ่น PM2.5

ผลการทดสอบจากเซ็นเซอร์ PMS3003 พบว่าเซ็นเซอร์สามารถวัดค่าฝุ่น PM2.5 ได้อย่างแม่นยำและสามารถแสดงผลข้อมูลได้ในช่วงเวลาเพียงไม่กี่วินาทีหลังจากการตรวจจับ ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ถูกส่งไปยังบอร์ด ESP8266 และแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk IoT บนสมาร์ทโฟนได้อย่างถูกต้อง ช่วงค่าฝุ่นที่วัดได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์สามารถวัดค่าฝุ่นในช่วงที่ต่ำสุดที่ 0 $\mu g/m^3$ และสูงสุดได้ถึง 300 $\mu g/m^3$ ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการวัดค่าฝุ่นในระดับสากล ค่าฝุ่นที่แสดงในแอปพลิเคชันมีความตรงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ

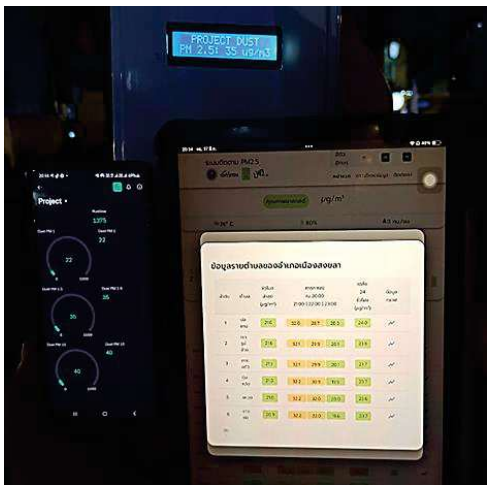
มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ โดยมีความแตกต่างที่น้อยกว่า 5% เมื่อทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีค่าฝุ่นในระดับปานกลางถึงสูง



รูปที่ 2 อุปกรณ์ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่

3.2 การทดสอบฟังก์ชันการแจ้งเตือน

ระบบการแจ้งเตือนทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ เมื่อค่าฝุ่น PM2.5 เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น หากค่าฝุ่นเกิน 100 µg/m³ ระบบจะส่งการแจ้งเตือนทันที ทั้งในรูปแบบของข้อความบนแอปพลิเคชัน Blynk IoT และเสียงเตือนบนสมาร์ทโฟน การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันผู้ใช้สามารถรับการแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์เมื่อค่าฝุ่นเกินระดับที่กำหนด ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับมลพิษทางอากาศที่มีความเสี่ยงสูงความสามารถในการตั้งค่าเกณฑ์ผู้ใช้สามารถตั้งค่าเกณฑ์ค่าฝุ่นที่ต้องการให้ระบบแจ้งเตือนได้ตามความต้องการ เช่น ระดับฝุ่นที่ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบวัดค่าฝุ่น PM 2.5 อ.เมือง จ.สงขลา

3.3 การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและความเสถียรภาพของระบบ

บอร์ด ESP8266 สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้อย่างเสถียรผ่านการเชื่อมต่อ Wi-Fi และส่งข้อมูลไปยังแอปพลิเคชัน Blynk IoT ได้ในเวลาไม่นาน ข้อมูลฝุ่นสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ได้ทันทีหลังจากการเชื่อมต่อสำเร็จ โดยไม่มีการดีเลย์ที่สำคัญในการส่งข้อมูล สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในช่วงเวลานานโดยไม่พบปัญหาการขัดข้องหรือการหยุดทำงาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์สามารถทำงานได้อย่างเสถียรเมื่อใช้งานในระยะยาว โดยไม่มีความผิดพลาดในการวัดค่าฝุ่น

3.4 การทดสอบการใช้งาน

การทดสอบการใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมภายนอก พื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นและการใช้เครื่องยนต์ยนต์ที่มีการปล่อยมลพิษสูง พบว่าค่าฝุ่น PM2.5 จะมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาพการจราจรและกิจกรรมต่างๆ ซึ่งระบบสามารถแสดงผลข้อมูลได้อย่างแม่นยำ และการแจ้งเตือนทำให้ผู้ใช้สามารถหลีกเลี่ยงกิจกรรมที่อาจทำให้สุขภาพเสี่ยงจากมลพิษทางอากาศได้ โดยค่าที่บันทึกทุก 3 ชั่วโมงบริเวณพื้นที่มีการจราจรคับคั่งเปรียบเทียบกับการวัดค่าของเว็บไซต์ www.iqair.com แสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยค่าฝุ่น PM2.5 กับเว็บไซต์ www.iqair.com

เวลา	ค่า PM2.5 (วัดจริง)	จากเว็บไซต์	Error
06:00	34.0 µg/m³	35.5 µg/m³	-1.5 µg/m³
09:00	48.4 µg/m³	49.9 µg/m³	-1.5 µg/m³
12:00	63.4 µg/m³	66.0 µg/m³	-2.6 µg/m³
15:00	70.0 µg/m³	73.0 µg/m³	-3.0 µg/m³
18:00	83.0 µg/m³	85.1 µg/m³	-2.1 µg/m³
21:00	76.0 µg/m³	78.0 µg/m³	-2.0 µg/m³

จากตารางการเปรียบเทียบค่าฝุ่น PM2.5 ที่ได้จากการวัดจริงในพื้นที่ กับค่าที่ได้จากเว็บไซต์ในช่วงเวลาต่างๆของวันพร้อมคำนวณค่าความคลาดเคลื่อซึ่งเป็นส่วนต่างระหว่างค่าจากเว็บไซต์และค่าที่วัดได้จริง ค่าฝุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วงกลางวันถึงเย็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) อยู่ในช่วง -1.5 ถึง -3.0 µg/m³ ค่าเฉลี่ยของ Error ค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ -2.12 µg/m³

4. สรุปผลการทดลอง

ระบบตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าฝุ่นละอองแบบเคลื่อนที่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการ

ในการเฝ้าระวังคุณภาพอากาศได้ โดยความแม่นยำของเซ็นเซอร์ PMS3003 วัดค่าฝุ่น PM1.0, PM2.5 และ PM10 ได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน โดยค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน ±5% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระบบสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าฝุ่นเกินเกณฑ์ที่กำหนดได้ทันที ทั้งในรูปแบบข้อความผ่านแอปพลิเคชัน Blynk IoT และเสียงเตือนผ่านลำโพง Buzzer ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับทราบและหลีกเลี่ยงกิจกรรมในพื้นที่ที่มีฝุ่นละอองเกินค่ามาตรฐาน ความเสถียรของการเชื่อมต่อของบอร์ด ESP8266 กับ Wi-Fi มีความเสถียร สามารถส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์ม Blynk IoT ได้อย่างต่อเนื่อง การแสดงผลค่าฝุ่นแบบเรียลไทม์มีความรวดเร็วและแม่นยำ

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนทุนการนำเสนอและอุปกรณ์เครื่องมือสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, and R. Britter, "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities," Environment International, vol. 75, pp. 199-205, 2015.

[2] WHO, "Air pollution," World Health Organization, 2021. [Online]. Available:https://www.who.int/health-topics/air-pollution. [Accessed: Jan. 15, 2025].

[3] WHO, "Air pollution and health: How air pollution impacts your body," World Health Organization, 2023. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/spotlight/how-air-pollution-impacts-your-body. [Accessed: Jan. 10, 2025].

[4] D. R. Nagel, A. Rector, and S. Fitzgerald, "Challenges in deploying low-cost air quality sensor networks at scale," Sensors, vol. 20, no. 5, p. 1382, 2020.

[5] T. Sanislav, G. D. Mois, S. Zeadally, and S. C. Folea, "Energy harvesting techniques for Internet of Things (IoT)," IEEE Access, vol. 9, pp. 39530-39549, 2021.

[6] T. Karvinen, K. Karvinen, and V. Valtokari, "ESP8266-based environmental monitoring system with MQTT protocol," IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 4, pp. 3544-3553, 2020.

[7] L. R. Crilley, M. Shaw, R. Pound, L. J. Kramer, R. Price, S. Young, A. C. Lewis, and F. D. Pope, "Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring," Atmospheric Measurement Techniques, vol. 11, pp. 709-720, 2018.

[8] S. Moltchanov, I. Levy, Y. Etzion, U. Lerner, D. M. Broday, and B. Fishbain, "On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks," Science of the Total Environment, vol. 502, pp. 537-547, 2015.

[9] Duc, Hiep Nguyen et al. "Impact of biomass burnings in Southeast Asia on air quality and pollutant transport during the end of the 2019 dry season." Environmental monitoring and assessment vol. 193,9 565. 12 Aug. 2021, doi:10.1007/s10661-021-09259-934383149.

ประวัติผู้เขียนบทความ



มารุต รักษา
อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งานวิจัยที่สนใจ ระบบสมองกลฝังตัวและประมวลผลสัญญาณ



สัญญา ผาสุข
อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งานวิจัยที่สนใจ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง



ชยานิษฐ์ บุญสนิท
อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งานวิจัยที่สนใจ การสื่อสารความถี่สูงและเว็บแอปพลิเคชัน



พรชัย แคล้วอ้อม
อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
งานวิจัยที่สนใจ ระบบควบคุมและปัญญาประดิษฐ์

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การตรวจจับแว่นตานิรภัยแบบเรียลไทม์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Real Time Detection of Safety Glasses using Machine Learning and Internet of Things Technology

นที ศรีนะ[1] และ ภาสพิชญ์ ชูใจ มิเชล[1*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี *pasapitch.chu@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบต้นแบบตรวจจับการสวมใส่แว่นตานิรภัยแบบเรียลไทม์ เพื่อควบคุมการเข้า-ออกพื้นที่ปฏิบัติงานอัตโนมัติ ระบบนี้บูรณาการสถาปัตยกรรม Vision Transformer (ViT) สำหรับจำแนกประเภทแว่นตาจากภาพเว็บแคมโดยการเรียนรู้ของเครื่อง เข้ากับบอร์ด ESP32 และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อควบคุมกลอนแม่เหล็กไฟฟ้า ผลการทดสอบเบื้องต้นหลังการพัฒนาแบบจำลองบนชุดข้อมูลภายใน 60 ภาพ พบว่ามีความแม่นยำ 100% และเมื่อทดสอบระบบในสภาพการใช้งานจริงด้วยชุดข้อมูลใหม่ 120 ภาพ แบบจำลองยังคงประสิทธิภาพสูง โดยมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) โดยรวม 98% สำหรับคลาสแว่นตานิรภัยโดยเฉพาะ สามารถทำค่าความเที่ยง (Precision) และค่าความไว (Recall) ได้ถึง 100% แสดงถึงความสามารถในการตรวจจับผู้สวมแว่นตานิรภัยได้อย่างถูกต้อง ทำให้สามารถควบคุมการเข้า-ออกพื้นที่ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แว่นตานิรภัย, การเรียนรู้ของเครื่อง, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This research presents the development of a real-time safety glasses detection prototype system for automated workplace access control. This system integrates the Vision Transformer (ViT) architecture, utilizing machine learning to classify glasses from webcam images, with an ESP32 board and Internet of Things (IoT) to control an electromagnetic lock. Initial test results after model development on an internal 60-image dataset showed 100% accuracy. When tested under real-world conditions using a new 120-image dataset, the model maintained high performance, achieving 98% overall accuracy. Notably, for the safety glasses class specifically, both Precision and Recall reached 100%. This demonstrates the capability to accurately detect safety glasses wearers, enabling effective control of workplace entry and exit.

Keywords: Safety glasses, Machine Learning, Internet of Things.

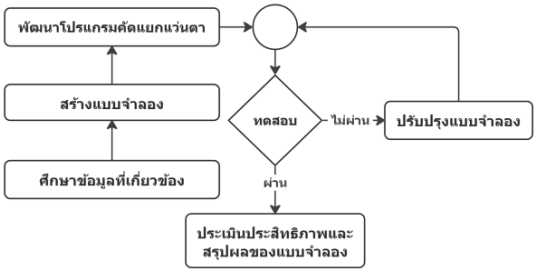
1. บทนำ

ความปลอดภัยในการทำงานเป็นเรื่องสำคัญในประเทศไทย โดยเฉพาะอุบัติเหตุทางตา แม้กฎหมายกำหนดให้สวมแว่นตานิรภัย แต่การตรวจสอบในสถานประกอบการขนาดใหญ่ยังเป็นเรื่องท้าทาย การตรวจสอบด้วยสายตาอาจไม่เพียงพอและมีความคลาดเคลื่อน ทำให้เกิดความเสี่ยงในการทำงาน [1]

ผู้วิจัยจึงเห็นศักยภาพของเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการตรวจจับแว่นตานิรภัยแบบเรียลไทม์ [2] เทคโนโลยีนี้สามารถจำแนกวัตถุได้อย่างแม่นยำ ลดความผิดพลาดจากปัจจัยบุคคล และช่วยเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ระบบควบคุมการเข้า-ออกพื้นที่อัตโนมัติและทำงานตลอดเวลา [3] การประยุกต์ใช้ทั้งสองเทคโนโลยีจะช่วยลดความเสี่ยงการบาดเจ็บที่ดวงตาและเพิ่มประสิทธิภาพในการบังคับใช้มาตรการความปลอดภัย

2. วิธีการดำเนินงาน

กรอบแนวคิดของงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาข้อมูล สร้างแบบจำลอง พัฒนาโปรแกรม ทดสอบและปรับปรุงจนได้แบบจำลองที่เหมาะสม ก่อนประเมินประสิทธิภาพและสรุปผล โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 1 ซึ่งผู้วิจัยได้ศึกษาแหล่งข้อมูลต่างๆ [1]-[10] เพื่อสนับสนุนแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

2.1 ออกแบบแบบจำลองและส่วนควบคุม

ในงานวิจัยนี้ใช้สถาปัตยกรรม Vision Transformer (ViT) รุ่น vit_base_patch16_224 [4] สำหรับการเรียนรู้และจำแนกรูปภาพจากกล้อง

เว็บแคม โดยแบ่งเป็น 3 คลาส ได้แก่ SG: แว่นตานิรภัย NG: แว่นตาทั่วไป และ BOX: ไม่มีแว่นตา

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการพัฒนาระบบประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ [5] และซอฟต์แวร์ รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดเครื่องมือในการสร้างแบบจำลอง

อุปกรณ์	รายละเอียด
	โปรแกรม PyCharm สำหรับการเขียนโปรแกรมสร้างแบบจำลอง
	ESP32 บอร์ดสำหรับควบคุมการทำงานของโมดูลรีเลย์
	โมดูลรีเลย์สำหรับเชื่อมวงจรเพื่อเปิด-ปิดการทำงานของกลอนแม่เหล็กไฟฟ้า
	กลอนแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับควบคุมการเข้า-ออก
	กล้องเว็บแคมความละเอียด Full HD สำหรับนำเข้าข้อมูลวีดีโอหรือรูปภาพ
	กล่องขนาด 29*20 ซม. สำหรับยึดกล้องเว็บแคมและตำแหน่งวางแว่นตานิรภัย

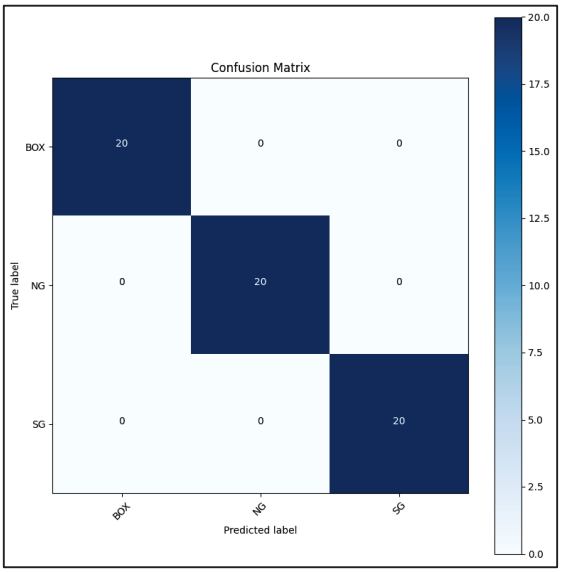
2.3 ชุดข้อมูลและการพัฒนาแบบจำลอง

ในการฝึกสอนนั้นใช้รูปภาพทั้งหมด 600 ภาพ แบ่งเป็นคลาสละ 200 ภาพ ซึ่งรวบรวมจากภายในวิทยาลัยและแหล่งข้อมูลอินเทอร์เน็ต ผู้วิจัยได้มีการกำหนดตำแหน่งวัตถุในภาพและการเพิ่มจำนวนข้อมูลด้วยเทคนิคการเพิ่มจำนวนรูปภาพ [4] รายละเอียดข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนรูปภาพในแต่ละคลาสสำหรับการสร้างแบบจำลอง

คลาส	ข้อมูลคลาส	จำนวน	ชุดฝึกสอน	ชุดตรวจสอบ	ชุดทดสอบ
0	BOX	560	420	120	20
1	NG	560	420	120	20
2	SG	560	420	120	20
รวม		1,680	1,260	360	60

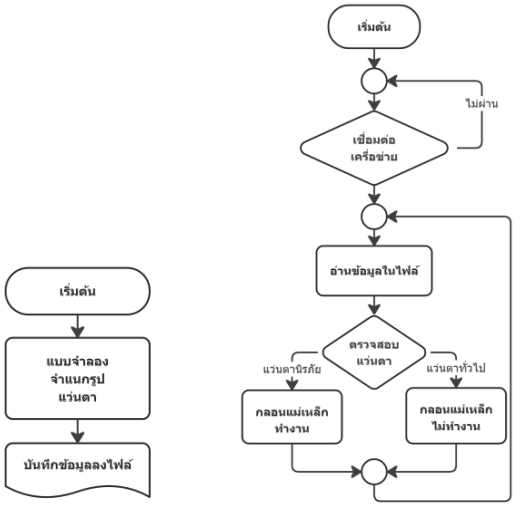
หลังจากทำการฝึกสอนแบบจำลองแล้ว ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองกับชุดทดสอบดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำแนกประเภทได้ถูกต้องทั้งหมด



รูปที่ 2 ผลการทดสอบบนชุดทดสอบ

2.4 การออกแบบการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างส่วนประมวลผลภาพและส่วนควบคุม IoT โดยเริ่มจากกล้องเว็บแคมจับภาพแว่นตาในตำแหน่งที่กำหนด แล้วส่งภาพไปยังแบบจำลองเพื่อจำแนกประเภท และคำนวณค่าความเชื่อมั่น ผลลัพธ์จะถูกบันทึกลงไฟล์เพื่อรอการอ่านแบบเรียลไทม์ [6] รายละเอียดดังรูปที่ 3 ก) ในขณะเดียวกันนั้น ส่วนควบคุม IoT จะอ่านผลการจำแนกล่าสุดจากไฟล์ หากผลเป็นคลาส SG และค่าความเชื่อมั่นมากกว่า 0.8 ระบบจะสั่งรีเลย์ให้ปลดล็อกกลอนแม่เหล็กไฟฟ้า หากไม่ใช่ จะยังคงสถานะล็อกประตูไว้ ดังรูปที่ 3 ข)

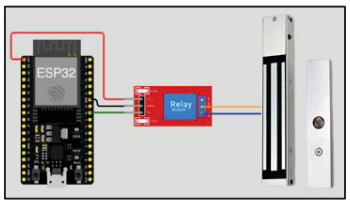


ก) ส่วนประมวลผลภาพ ข) ส่วนควบคุม IoT

รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

2.5 การพัฒนาแบบจำลองและติดตั้งระบบ

ผู้วิจัยได้เชื่อมต่ออุปกรณ์ส่วนควบคุม IoT [4] ที่แสดงในตารางที่ 1 เข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4 จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและกลอนแม่เหล็กเข้ากับประตู ดังรูปที่ 5 และติดตั้งกล้องเว็บแคมเข้ากับกล่องวางแว่นตาเพื่อจับภาพ ดังรูปที่ 6 โดยรูปภาพหรือวีดีโอที่ได้จากเว็บแคมจะถูกประมวลผลและแสดงผลการจำแนกประเภทพร้อมค่าความเชื่อมั่นแบบเรียลไทม์บนเว็บแอปพลิเคชัน ดังตัวอย่างในรูปที่ 7



รูปที่ 4 การต่ออุปกรณ์ควบคุม


รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและกลอนแม่เหล็กไฟฟ้า


รูปที่ 6 การติดตั้งกล้องเว็บแคมเข้ากล่องวางแว่นตา



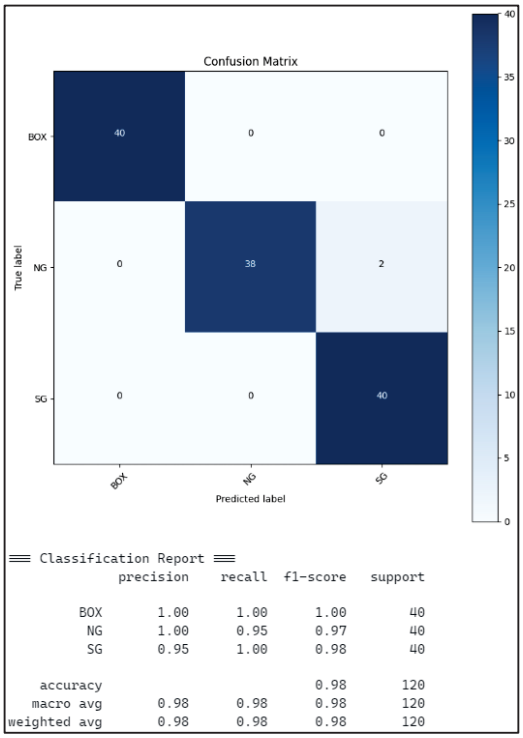
รูปที่ 7 ภาพการนำเข้ารูปภาพและจำแนกประเภทแว่นตา

3. ผลการดำเนินงาน

การประเมินผลการทำงานของระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

3.1 ด้านการทดลองด้านประสิทธิภาพของแบบจำลอง

การทดสอบในส่วนนี้จะเป็นการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในสภาพแวดล้อมจริง จับภาพจากเว็บแคมโดยตรงจำนวน 120 ภาพ แบ่งเป็นคลาส SG 40 ภาพ NG 40 ภาพ และ BOX 40 ภาพ ผลการทำนายแสดงในรูปที่ 8



Classification Report

	precision	recall	f1-score	support
BOX	1.00	1.00	1.00	40
NG	1.00	0.95	0.97	40
SG	0.95	1.00	0.98	40
accuracy			0.98	120
macro avg	0.98	0.98	0.98	120
weighted avg	0.98	0.98	0.98	120

รูปที่ 8 รายละเอียดการทำนายในแต่ละคลาส

จากรูปที่ 8 พบว่าผลการประเมินของแบบจำลอง แสดงให้เห็นถึงการจำแนกประเภท โดยมีค่าความถูกต้องโดยรวมสูงถึง 98% โดยในทุกคลาส (BOX, NG, SG) มีค่า F1-Score อยู่ที่ 1.00, 0.97 และ 0.98 ตามลำดับ ค่า Precision และ Recall ที่สูงมาก บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงและครอบคลุมข้อมูลได้ดี ลดโอกาสเกิดทั้ง False Positives และ False Negatives ได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.2 ด้านผลการทดลองด้านอุปกรณ์ควบคุมการเข้า-ออก

ส่วนนี้จะทำการทดสอบและตรวจสอบว่าระบบควบคุม IoT สามารถทำการสั่งงานเปิด-ปิดกลอนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกต้องตามที่ระบุในแบบจำลอง โดยพิจารณาจากผลการทดลองของระบบควบคุม IoT และความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่ได้ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการสั่งเปิด-ปิด กลอนแม่เหล็กไฟฟ้า

ลำดับที่	ข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่อง Server		การสั่งเปิด-ปิดกลอนแม่เหล็กไฟฟ้า
	คลาส	ความเชื่อมั่น	
1	SG	0.99	ทำงาน
2	SG	0.98	ทำงาน
3	NG	0.95	ไม่ทำงาน
4	NG	0.99	ไม่ทำงาน
5	BOX	1.00	ไม่ทำงาน
6	BOX	1.00	ไม่ทำงาน

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถสั่งงานให้กลอนแม่เหล็กไฟฟ้าทำงานได้อย่างถูกต้องเฉพาะเมื่อได้รับการระบุว่าเป็นคลาส SG และมีค่าความเชื่อมั่นมากกว่า 0.8 ในขณะที่กรณีอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นคลาส NG คลาส BOX หรือแม้แต่คลาส SG หากมีค่าความเชื่อมั่นไม่ถึงเกณฑ์ ระบบจะไม่สั่งงานให้กลอนแม่เหล็กไฟฟ้าทำงาน

4. สรุป

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบตรวจจับแว่นตานิรภัยแบบเรียลไทม์ โดยการบูรณาการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเข้ากับการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อควบคุมการเข้าถึงพื้นที่ทำงาน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุทางดวงตา ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองเมื่อประเมินผลกับชุดข้อมูลใหม่ 120 ภาพ พบว่ามีความแม่นยำรวม 98% โดยมีค่า Precision และ Recall สำหรับคลาส SG อยู่ที่ 95%, 100% ตามลำดับ สำหรับระบบควบคุม IoT สามารถรับผลการจำแนกจากแบบจำลองและสั่งการกลอนแม่เหล็กไฟฟ้าได้ถูกต้องตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ อนุญาตให้เข้าถึงเฉพาะเมื่อตรวจพบแว่นตานิรภัยและมีค่าความเชื่อมั่นสูงกว่า 0.8 โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องในการตรวจสอบและบังคับการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลโดยอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

[1] Al-Azani, H. Luqman, M. Alfarraj, A. A. I. Sidig, A. H. Khan, D. Al-Hamed, “Real-Time Monitoring of Personal Protective Equipment Compliance in Surveillance Cameras”, IEEE Access Volume 12, 2024, pp. 121882-12185, doi: 0.1109/ACCESS.2024.3451117

[2] วัฒนพงศ์ เหมือนมี. (2565). ระบบกล้อง AI ตรวจสอบพนักงานสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันภัยส่วนบุคคลก่อนเข้าทำงานในพื้นที่เสี่ยง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[3] M. Imam et al., "Ensuring Miners' Safety in Underground Mines Through Edge Computing: Real-Time PPE Compliance Analysis Based on Pose Estimation," in IEEE Access, vol. 12, pp. 145721-145739, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3470558.

[4] A. Jarndal, H. Tawfik, A. I. Siam, I. Alsyouf, A. Cheaitou, “A Real-Time Vision Transformers-Based System for Enhanced Driver Drowsiness Detection and Vehicle Safety”, IEEE Access Volume 13, 2025, pp. 1790-1803, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3522111

[5] อิทธิพงษ์ ย่องหยี, พรประภา โชติพินทุ และ เกศรา พละไชย. (2565). การใช้เทคโนโลยีอิมเมจโปรเซสซิ่งเพื่อจดจำใบหน้าสำหรับระบบล็อคประตูบ้านอัจฉริยะ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 (น.309-312). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.

[6] สกุล คำนวณชัย, ไพบูลย์ สมนึก และ จิตวัฒน์ เปิ่นวงษ์. (2565). การพัฒนาแบบจำลองระบบตรวจสอบและควบคุมอุปกรณ์ภายในบริเวณบ้านโดยใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชันด้วยบริการเซิร์ฟเวอร์การประมวลผลแบบกลุ่มเมฆ. ใน การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 14 (น. 237-242). มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.

[7] กาญจนา ศิลาวราเวทย์ และ ตะวัน ภูรัต. (2563). ชุดฝึกปฏิบัติการราคาประหยัดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการเรียนการสอนอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. ใน การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 12 (น.32-36). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

[8] สุทิพา เผือกผ่อง. (2559). การเรียนรู้เชิงลึกโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันสำหรับระบบรู้จำภาพใบหน้าบุคคล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[9] ธนู ทองแย้ม และ ทองพูล หีบไธสง. (2562). ระบบตรวจจับและแจ้งเตือนการล้มของผู้สูงอายุจากกล้องวิดีโอ ด้วยเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกบนไมโครคอมพิวเตอร์. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 15 ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (น.213-218). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[10] ฐิติพงษ์ รักษาริกรณ์. (2562). การจำแนกอารมณ์จากใบหน้าแบบ Real-Time บนอุปกรณ์ฝังตัว ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบทดสอบแบบปรับเหมาะ ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง สำหรับประเมินความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรม

Development of an Adaptive Testing System Using Machine Learning for Assessing Programming Knowledge and Skills

เอกราช ธรรมษา[1] ปกรณ์ กัลปดี[2*] และปิยภัทร โกษาพันธุ์[1]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
[2*]สาขาวิชาเทคโนโลยีเกม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
E-mail: pakorn.k@ubru.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบ ATML(Adaptive Testing using Machine Learning: ATML) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบ ATML 2) ประเมินความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรมผ่านระบบ ATML การพัฒนาระบบได้ใช้เทคนิค K-Means ร่วมกับ Elbow Method และ Silhouette Score จัดกลุ่มระดับความยากง่ายของข้อสอบสำหรับการทดสอบแบบปรับเหมาะเพื่อแบ่งกลุ่มความสามารถ กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในจังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 23 คน ผลการวิจัยพบว่า 1) ระบบมีประสิทธิภาพสามารถจัดกลุ่มข้อสอบเพื่อจำแนกระดับความสามารถของผู้สอบ และผลการประเมินอยู่ในระดับดีจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน และ 2) การทดลองประเมินกลุ่มตัวอย่างผ่านระบบ ATML ส่วนใหญ่มีความรู้และทักษะอยู่ในระดับต่ำมากและต่ำ ร้อยละ 48.73 ปานกลาง ร้อยละ 34.78 และระดับเก่งและเก่งมากมีเพียงร้อยละ 17.39 ซึ่งสามารถจำแนกระดับของผู้สอบได้อย่างเหมาะสม ผลที่ได้สะท้อนถึงความสามารถที่ยังต้องการการพัฒนา และระบบ ATML มีความสามารถในการประเมินที่มีประสิทธิภาพ ประหยัดเวลา และตอบสนองระดับความสามารถของผู้เรียนได้อย่างเหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินผลการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: ระบบทดสอบแบบปรับเหมาะ, การเรียนรู้ของเครื่อง, เคมีน

Abstract

This research presents the ATML system (Adaptive Testing using Machine Learning: ATML) with the following objectives: (1) to develop and evaluate the effectiveness of the ATML system, and (2) to assess programming knowledge and skills through the ATML system. The system development employed the K-Means clustering technique in conjunction with the Elbow Method and Silhouette Score to categorize the difficulty levels of test items for adaptive testing aimed at grouping learners by ability levels. The sample group comprised 23 students from the Computer Technology program at a university in Ubon Ratchathani Province. The results indicated that: (1) the system effectively grouped test items to classify the examinees' ability levels, and the expert evaluation (by three experts) rated the system at a good level of performance; and (2) the experimental evaluation of the sample group through the ATML system showed that most students had very low to low knowledge and skills (48.73%), moderate level (34.78%), and only 17.39% demonstrated high to very high levels of proficiency. These results indicate that the system can appropriately classify examinee levels. The outcomes reflect the existing need for skill development among learners. Furthermore, the ATML system demonstrates the potential to provide effective, time efficient assessment that appropriately adapts to individual learner abilities. It can be applied to support efficient teaching and learning evaluations in future educational settings.

1. บทนำ

การทดสอบแบบปรับตัว (Adaptive Testing) เป็นกระบวนการประเมินความสามารถของผู้สอบโดยระบบจะปรับความยากของข้อสอบให้เหมาะสมกับระดับความสามารถ การเลือกข้อสอบในแต่ละช่วงจึงอาศัยโมเดลทางจิตวิทยาการวัด เช่น ทฤษฎีการตอบสนองข้อสอบ (Item Response Theory: IRT) โดยจะประเมินความยากง่ายของข้อสอบและความสามารถของผู้สอบอย่างต่อเนื่อง เพื่อสะท้อนศักยภาพของผู้ทำแบบทดสอบได้อย่างแท้จริง [1] ข้อดีของการทดสอบแบบปรับเหมาะได้แก่ ลดจำนวนข้อสอบที่ไม่จำเป็น สามารถประเมินความสามารถของ

ผู้สอบได้แม่นยำกว่าการทดสอบแบบใช้ข้อสอบชุดเดียวกับทุกคน โดยใช้จำนวนคำถามน้อยลง ลดความเบื่อหน่ายและความเครียด ไม่ต้องทำข้อสอบที่ง่าย หรือยากเกินไปสำหรับระดับของตน และป้องกันการทุจริตเนื่องจากข้อสอบของแต่ละคนไม่เหมือนกัน [4]

เคมีน (K-Means) เป็นวิธีการจัดกลุ่มที่ได้รับความนิยมในด้านการวิเคราะห์ข้อมูลและการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เนื่องจากสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีหลักการที่เข้าใจง่าย โดยวิธีนี้จะเริ่มต้นจากการกำหนดจำนวนกลุ่ม (k) ที่ต้องการ จากนั้นสุ่มตำแหน่งเซนทรอยด์ (Centroids) เริ่มต้น แล้วทำการปรับปรุงตำแหน่งเซนทรอยด์ซ้ำๆ จนกระทั่งการแบ่งกลุ่มมีความเสถียร การใช้งานเคมีนจะเน้นไปที่การลดระยะห่างภายในกลุ่มให้น้อยที่สุด เพื่อสร้างกลุ่มข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงภายในสูงและมีความแตกต่างระหว่างกลุ่มสูง [2]

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบ ATML (Adaptive Testing using Machine Learning) สำหรับประเมินความรู้และทักษะของผู้เรียนที่กำลังศึกษาในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมุ่งเน้นการวัดระดับความสามารถที่แท้จริงของผู้เรียนด้วยการผสานแนวทางการทดสอบแบบเหมาะร่วมกับเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) เพื่อยกระดับประสิทธิภาพและความแม่นยำในการประเมินให้ดียิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาและหาประสิทธิภาพของระบบ ATML

2.2 เพื่อประเมินผลความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรมจากระบบ ATML

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

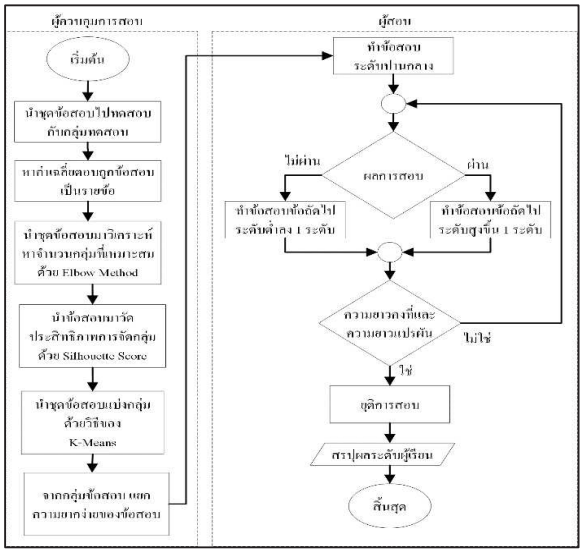
3.1 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักศึกษาสังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในจังหวัดอุบลราชธานี เลือกวิธีแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ได้แก่ กลุ่มเก็บข้อมูล เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 2 จำนวน 25 คน ทดสอบแบบทดสอบจำนวน 100 ข้อ และกลุ่มทดลองจำนวน 23 คน เป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 1 ทดลองผ่านระบบ ATML

3.2 การออกแบบข้อสอบวัดความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรม โดยครอบคลุมเนื้อหาโครงสร้างควบคุมทิศทางการทำงานของโปรแกรม (Control Structure) จำนวน 100 ข้อ เป็นข้อสอบแบบปรนัย 5 ตัวเลือก นำข้อสอบไปประเมินความสอดคล้องของข้อสอบ จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน

3.3 การออกแบบระบบ ATML

1) ผู้ควบคุมการสอบ ทำหน้าที่นำชุดข้อสอบเข้าสู่ระบบ และนำชุดข้อสอบนี้ไปทดสอบจากกลุ่มทดสอบ นำผลที่ได้หาค่าเฉลี่ยของการตอบถูกเป็นรายข้อ วิเคราะห์หาจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมด้วย Elbow Method วัดประสิทธิภาพการจัดกลุ่มด้วย Silhouette Score จากค่าเฉลี่ยข้อที่ได้ และเลือกจำนวนกลุ่มที่เหมาะสมจัดกลุ่มด้วยวิธีของเคมีน

2) ผู้ทดสอบทดสอบผ่านระบบ โดยเริ่มต้นจะได้รับข้อสอบจากการสุ่มในระดับปานกลาง ถ้าผลสอบถูก ข้อต่อไประบบจะสุ่มข้อสอบที่มีระดับยากที่สูงขึ้น 1 ระดับ และถ้าตอบผิด ระบบจะสุ่มข้อที่ระดับยากต่ำลงมา 1 ระดับ การยุติการสอบจะมี 2 เงื่อนไข ได้แก่ 1) ยุติแบบความยาวแปรผัน คือ การทำข้อสอบที่มีความยากในระดับสูงสุดถูกต่อเนื่องกัน หรือทำข้อสอบที่มีความง่ายในระดับต่ำสุดต่อเนื่องกันครบจำนวนที่กำหนด ระบบจะยุติการสอบทันทีและประเมินผล และ 2) ยุติแบบความคงที่ คือ ผู้สอบทำข้อสอบไปจนครบจำนวนข้อสอบที่กำหนด จึงยุติการสอบ และประเมินผล [3] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบ ATML

3.4 การพัฒนาระบบ

ระบบ ATML มีลักษณะเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ปรับหน้าจออัตโนมัติตามอุปกรณ์ (A Responsive Web Application) โดยใช้ภาษาพีเอชพี (PHP) ฐานข้อมูล MariaDB จัดการแสดงผล Bootstrap Framework และใช้ Google Colaboratory วิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบ

3.5 สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติพรรณนาที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ร้อยละ ดัชนีความสอดคล้อง (IOC) และการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ Elbow Method, Silhouette Score และเคมีน (K-Means) ด้วยวิธีการหาระยะทางแบบยุคลิด (Euclidean Distance) [2]

$$d(i,j) = \sqrt{(X1i - X1j)^2 + .. + (Xki - Xkj)^2} \quad (1)$$

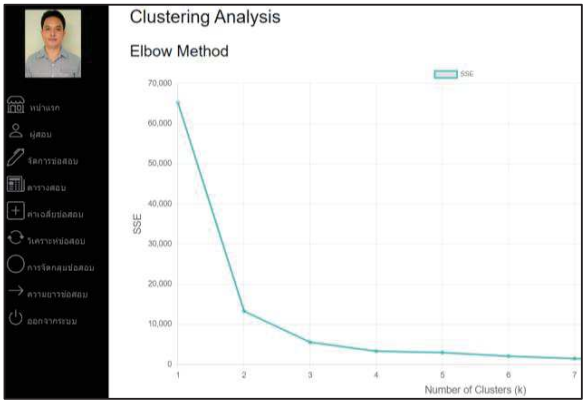
4. ผลการวิจัย

ข้อสอบที่พัฒนาขึ้นจำนวน 100 ข้อ นำไปประเมินความสอดคล้องของข้อสอบเป็นรายข้อกับผู้เชี่ยวชาญ พบว่า ข้อสอบมีค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่าง 0.67 ถึง 1 และภาพรวมมีค่าเฉลี่ย 0.82 ถือว่าข้อสอบทั้งหมดมีความสอดคล้องกับเนื้อหา สามารถนำไปใช้ได้ต่อไป

1. การพัฒนาและหาประสิทธิภาพของระบบ ATML

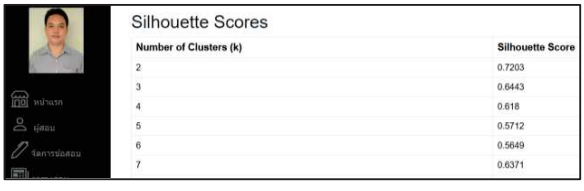
1.1 ระบบ ATML พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ นำข้อสอบที่พัฒนาขึ้นเข้าสู่ระบบ และทดสอบกับกลุ่มทดสอบ จำนวน 25 คน คำนวณค่าเฉลี่ยความยากง่ายข้อสอบเป็นรายข้อ

1.2 วิเคราะห์ข้อมูล โดยนำค่าเฉลี่ยข้อสอบที่ได้มาทำการวิเคราะห์การใช้จำนวนกลุ่มที่เหมาะสมสำหรับเคมีน ด้วยวิธีการ Elbow Method ผลที่ได้ดังนี้



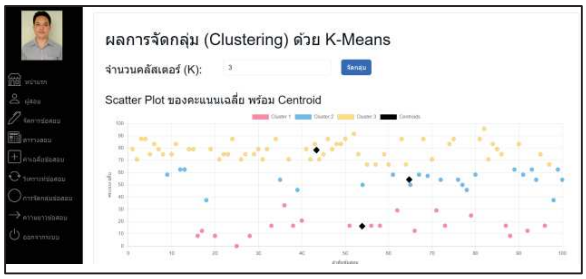
รูปที่ 2 Elbow Point

จากรูปที่ 4 กราฟรูปข้อศอก แสดงจุดจำนวนกลุ่มที่เหมาะสม คือ 3 หรือ 4 กลุ่ม เพราะที่จุดนี้เส้นกราฟเริ่มโค้งลดลงอย่างชัดเจน (Elbow Point) และหลังจากนั้น SSE ลดลงช้า วิเคราะห์จุดที่เหมาะสมเพิ่มเติมโดยใช้วิธี Silhouette Score เพื่อยืนยันวัดความเหมาะสมของผลการจัดกลุ่ม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 Silhouette Score

ผลการวิเคราะห์ที่ได้ ค่า Silhouette Score จะอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยค่าที่ใกล้ 1 มากที่สุดหมายความว่ากลุ่มมีการกระจายตัวที่ดี โดย 2 กลุ่มให้ค่า สูงสุด (0.7203) ซึ่งหมายถึงการแบ่งเป็น 2 กลุ่มมีความเหมาะสมที่สุดตามตัวชี้วัดนี้ แต่ถ้าพิจารณา 3 กลุ่มก็ยังมีค่า Silhouette Score ที่ดี (0.6443) จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสม ถ้าต้องการความละเอียดมากขึ้น ดังนั้นจึงจัดกลุ่มข้อสอบโดยใช้วิธีของเคมีนแบ่งกลุ่ม 3 กลุ่ม ดังรูปที่ 4



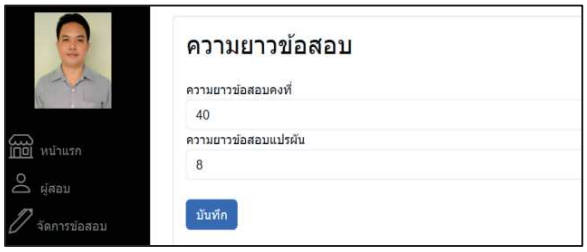
รูปที่ 4 ผลการจัดกลุ่มข้อสอบ

การจัดกลุ่มของข้อสอบ ถูกนำไปจัดระดับความยากง่ายของข้อสอบ เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ง่าย ปานกลาง และยาก ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจัดกลุ่มความยากง่ายของข้อสอบ

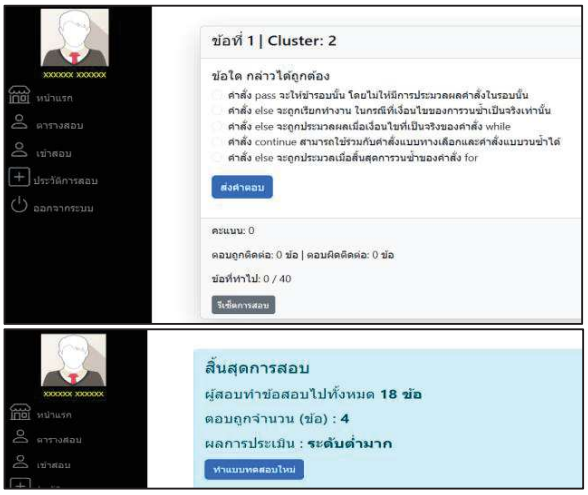
กลุ่มที่	ระดับข้อสอบ	ผลการทำแบบทดสอบถูก (%)		จำนวนข้อสอบ
		ต่ำสุด	สูงสุด	
1	ง่าย	70.83	95.83	51
2	ปานกลาง	37.50	66.67	28
3	ยาก	0	33.33	21

กำหนดค่าความยาวคงที่ และความยาวแปรผันของการสอบเพื่อควบคุมการสอบของระบบ ATML



รูปที่ 5 การกำหนดความยาวคงที่และความยาวแปรผันการสอบ

เมื่อกำหนดเงื่อนไขเสร็จสิ้น ผู้ควบคุมการสอบดำเนินการเปิดการสอบ โดยผู้ทดสอบจะเข้าสู่ระบบด้วยสิทธิ์ของตนเองและดำเนินการสอบผ่านระบบ ATML ดังตัวอย่างระบบประเมินรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสอบผ่านระบบ ATML

1.3 ประสิทธิภาพของระบบ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในระบบ ATML ได้นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบเครื่องมือปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล Google Colaboratory เปรียบเทียบพบว่า มีผลใกล้เคียงกัน และนำระบบที่ได้ไปประเมินกับผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 คน ด้านการเลือกคำถามที่เหมาะสม ประมวลผลรวดเร็วถูกต้อง และความเสถียรของระบบ พบว่าภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (Mean = 4.78, SD = 0.44)

2. การประเมินผลการสอบผ่านระบบ ATML

ระบบ ATML ได้กำหนดความยาวคงที่ 40 ข้อ และความยาวแปรผันหากต้องการความแม่นยำสูง (ความเชื่อมั่น 90%) ผู้สอบควรตอบข้อสอบผิดหรือถูกต่อเนื่องกัน 7-10 ข้อ [4] จึงกำหนดไว้ที่ 8 ข้อ ทดลองกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 23 คน ผลที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบผ่านระบบ ATML

ระดับข้อสอบสุดท้าย	จำนวนผู้สอบ	ร้อยละ	รวม	ประเมินผล
ง่าย (ความยาวแปรผัน)	5	21.74	48.73	ต่ำมาก
ง่าย (ความยาวคงที่)	6	26.09		ต่ำ
ปานกลาง	8	34.78	34.78	ปานกลาง
ยาก (ความยาวคงที่)	2	8.70	17.39	เก่ง
ยาก (ความยาวแปรผัน)	2	8.70		เก่งมาก

จากผลการทดสอบจากระบบ ATML ระบบสามารถจำแนกความรู้และทักษะได้ 5 ระดับ โดยแยกจากกลุ่มผู้สอบถูกยุติการสอบด้วยความยาวแปรผันหรือทำข้อสอบที่ง่ายที่สุดผิดต่อเนื่องกันถือว่าอยู่ในระดับต่ำมาก และผู้สอบถูกยุติการสอบด้วยความยาวแปรผันหรือทำข้อสอบระดับยากที่สุดถูกต่อเนื่องกันอยู่ในระดับเก่งมาก (ร้อยละ 8.70) ภาพรวมผู้เรียนอยู่ในระดับต่ำมากที่สุด (ร้อยละ 47.83) ระดับปานกลาง (ร้อยละ 34.78) และระดับเก่ง (ร้อยละ 17.39)

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการประเมินความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรมผ่านระบบ ATML พบว่า ผู้เรียนส่วนใหญ่อยู่ในระดับความสามารถต่ำถึงปานกลาง โดยมีสัดส่วนผู้สอบที่อยู่ระดับต่ำมากและต่ำ รวมกันถึงร้อยละ 47.83 และระดับปานกลางร้อยละ 34.78 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มของผู้เรียนที่ยังคงต้องการการเสริมความรู้และทักษะทางด้านการเขียนโปรแกรม ในขณะที่ผู้ทดสอบมีความรู้และทักษะระดับเก่งมีเพียงร้อยละ 17.39 แสดงให้เห็นถึงจำนวนผู้ที่มีความสามารถสูงยังค่อนข้างน้อย จากผลการวิจัยพบว่า การประเมินผลผ่านระบบ ATML สามารถจำแนกระดับผู้เรียนได้อย่างชัดเจน และมีความสอดคล้องใกล้เคียงกับการประเมินเชิงพฤตินัยของผู้สอน ซึ่งพิจารณาจากความเข้าใจในชั้นเรียนและทักษะการเขียนโปรแกรม มากกว่าการประเมินแบบใช้ข้อสอบชุดเดียวกันสำหรับผู้สอบทุกคน สรุปการวิจัยนี้เป็นการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการประเมิน โดยใช้วิธีของเคมีนร่วมกับหลักการทดสอบแบบปรับเหมาะ ช่วยให้สามารถประเมินระดับผู้เรียนได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ซึ่งถือเป็นจุดแข็งของระบบในการสะท้อนศักยภาพผู้เรียนที่แท้จริง และสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาหลักสูตรหรือการเรียนการสอนเฉพาะบุคคลในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารอ้างอิง

[1] Choi, Y., & McClenen, C. “Development of adaptive formative assessment system using computerized adaptive testing and dynamic bayesian networks.” in Applied Sciences, vol. 10, no. 22, pp. 81-96, 2020. https://doi.org/10.3390/app10228196

[2] H. Humaira & R. Rasyidah, “Determining the appropiate cluster number using elbow method for k- means algorithm. ” In Proceedings of the 2nd Workshop on Multidisciplinary and Applications (WMA), pp. 1-8, 2020. http://dx.doi.org/10.4108/eai.24-1-2018.2292388

[3] E. Thammasa & N. Ditcharoen, “Development of Intelligent Tutoring System Based on Adaptive Testing for Learning Computer Programming.” in Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning, vol. 12, no. 2, pp. 218-237, 2021. https://doi.org/10.14456/jstel.2021.16

[4] H. Wainer, “Computerized Adaptive Testing: A Primer (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.”, 2000.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์และการตรวจจับการโจมตีของ LockBit Ransomware โดยใช้บันทึกเหตุการณ์และเครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะทาง

Analyzing and Detecting LockBit Ransomware Attacks with Event Logs and Tools

ณัฐพงษ์ รุ่งพรมมา[1*] และ พงษ์พิสิฐ วุฒิดิษฐโชติ[1]

[1*]สาขาวิชาการบริหารเครือข่ายและความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ ภาควิชาการบริหารเครือข่ายดิจิทัลและความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: too8885@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ และตรวจจับการโจมตีของแรนซัมแวร์ LockBit (LockBit Ransomware) โดยมีการจำลองสถานการณ์ของการโจมตีภายใต้สภาพแวดล้อมเสมือนจริง (Virtual Environment) เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นจริงได้มากที่สุด ในการทดลองเป็นการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของแรนซัมแวร์ การตรวจจับ และแนวทางการป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการดำเนินการนั้นผู้วิจัยจะใช้เครื่องมือด้านความมั่นคงปลอดภัย เช่น ระบบ SIEM (Security Information and Event Management) ในการตรวจสอบและวิเคราะห์เหตุการณ์แบบเรียลไทม์ รวมถึงการใช้เครื่องมือเฉพาะทาง เช่น Redline และ Any.Run สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมของมัลแวร์ และแพลตฟอร์ม Wazuh สำหรับตรวจจับเชิงลึก จากการศึกษาพบว่าเครื่องมือด้านความมั่นคงปลอดภัยจะช่วยให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการทำงานของแรนซัมแวร์ LockBit ที่ชัดเจนขึ้น พร้อมสามารถนำเสนอแนวทางการตรวจจับและการป้องกันที่สามารถประยุกต์ใช้ในองค์กรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างมาตรการด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์และลดความเสี่ยงจากภัยคุกคามในอนาคต

คำสำคัญ: แรนซัมแวร์, การตรวจจับการโจมตี, ความมั่นคงปลอดภัยทางไซเบอร์, การตรวจจับภัยคุกคาม, การวิเคราะห์มัลแวร์

Abstract

This research aims to investigate, detect, and prevent attacks from LockBit Ransomware by simulating a real-world attack scenario. The objective is to closely examine the behavior and operational patterns of the ransomware under a controlled virtual environment that mirrors real-world conditions as accurately as possible. To achieve this, the study employs advanced cybersecurity tools, including a Security Information and Event Management (SIEM) system, to perform real-time monitoring and analysis of security events. Additionally, specialized forensic tools such as Redline and Any.Run are used to analyze malware behavior, while Wazuh is implemented to detect and correlate anomalous activities across the system. The results of this study are expected to enhance the understanding of LockBit's attack mechanisms and provide effective detection and prevention strategies. These findings can assist organizations in strengthening their cybersecurity posture and reducing the risk of ransomware attacks in the future.

Keywords: LockBit Ransomware, attack simulation, digital forensics, threat detection, SIEM, malware behavior analysis, cybersecurity

1. บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยเข้าสู่ยุคที่เทคโนโลยีดิจิทัลถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วจนทำให้แรนซัมแวร์กลายเป็นภัยคุกคามที่สำคัญต่อองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน เมื่อระบบถูกโจมตีมัลแวร์เรียกค่าไถ่ (Malware) ที่เรียกว่าแรนซัมแวร์ (Ransomware) จะเข้ารหัสไฟล์และเรียกค่าไถ่เพื่อปลดล็อคไฟล์เหล่านั้นทันที [1] แรนซัมแวร์ถูกพัฒนาและมีความซับซ้อนมากขึ้นตามกาลเวลา เนื่องจากแฮกเกอร์ (Hacker) มีการคิดค้นวิธีการใหม่ๆ ที่สามารถหารายได้จากการโจมตีนี้ ในอดีตแฮกเกอร์ใช้บริการออนไลน์ผ่าน Paysafecard (หรือ MoneyPak) ที่ต้องอาศัยรหัส 16 หลักในการจำหน่ายหรือการรับเงินค่าไถ่ ซึ่งระบบชำระเงินแบบ Paysafecard เป็นช่องทางการชำระเงินที่ช่วยให้ผู้ก่ออาชญากรรมเรียกค่าไถ่โดยไม่เปิดเผยตัวตนและยากต่อการตรวจสอบติดตาม แตกต่างจากปัจจุบันที่ใช้เงินคริปโต หรือ คริปโตเคอร์เรนซี (Cryptocurrency) คือ สกุลเงินดิจิทัลที่ใช้เทคโนโลยีการเข้ารหัสลับ (Cryptography) เพื่อให้การทำธุรกรรมปลอดภัย ตรวจสอบได้ และไม่ต้องพึ่งพาตัวกลางอย่างธนาคารหรือรัฐบาลแทนการใช้จ่ายบริการออนไลน์ผ่าน Paysafecard เงินคริปโตที่ถูกใช้ในการเรียกค่าไถ่ของการโจมตีด้วยแรนซัมแวร์นั้นคือ Bitcoin (BTC) และแพลตฟอร์ม Ethereum (ETH) เนื่องจากเข้าถึงได้ง่ายและเมื่อเกิดการโอนเงินคริปโตแล้วจะไม่สามารถยกเลิกหรือเรียกคืนได้นั่นเอง การโจมตีด้วยแรนซัมแวร์ในประเทศไทยส่งผลกระทบดังต่อไปนี้

1) ผลกระทบต่อระบบการให้บริการขององค์กร การโจมตีด้วยแรนซัมแวร์ทำให้ระบบคอมพิวเตอร์ขององค์กรหยุดชะงัก ซึ่งส่งผล

ให้การให้บริการแก่ลูกค้ามีความผิดปกติ เช่น การหยุดให้บริการชั่วคราวของโรงพยาบาลเนื่องจากไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลผู้ป่วยได้จนทำให้การรักษาและการดูแลผู้ป่วยได้รับผลกระทบ

2) ผลกระทบทางด้านการเงินที่มักเกิดขึ้นในองค์กร เช่น องค์กรต้องดำเนินการจ่ายค่าไถ่เพื่อปลดล็อคข้อมูลหรือกู้คืนระบบและเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงโดยปราศจากการรับประกันว่าจะสามารถปลดล็อคได้ นอกจากการดำเนินการจ่ายค่าไถ่แล้วยังมีค่าใช้จ่ายด้านการกู้คืนระบบและการป้องกันไม่ให้เกิดการโจมตีนี้อีกในอนาคต ซึ่งถือเป็นการสูญเสียเงินตราขององค์กร

3) ผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของลูกค้า การโจมตีด้วยแรนซัมแวร์ทำให้ข้อมูลสำคัญของลูกค้า เช่น ข้อมูลส่วนบุคคลและข้อมูลการเงินถูกเข้ารหัสหรือถูกขโมยไปทำให้ความเชื่อมั่นของลูกค้าต่อองค์กรลดลง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์และความน่าเชื่อถือขององค์กรในระยะยาวได้

4) ผลกระทบต่อการดำเนินธุรกิจมักเกิดในลักษณะการหยุดชะงักของระบบคอมพิวเตอร์ส่งผลให้การดำเนินธุรกิจประสบปัญหาและไม่สามารถดำเนินงานได้ตามแผนจนอาจก่อให้เกิดการสูญเสียโอกาสทางธุรกิจ เช่น การสั่งซื้อสินค้าหรือบริการจากลูกค้าถูกยกเลิก

2. แรนซัมแวร์ (Ransomware)

โมเดลธุรกิจของอาชญากรไซเบอร์หรือ Ransomware as a Service (RaaS) เป็นการให้บริการแรนซัมแวร์แบบสำเร็จรูปที่จัดเป็นการพัฒนาที่สำคัญในวงการแรนซัมแวร์ โมเดลธุรกิจของอาชญากรไซเบอร์นี้ทำให้แฮกเกอร์ที่ไม่มีทักษะการเขียนโค้ดขั้นสูงสามารถเริ่มการโจมตีได้ง่ายขึ้น โดยการเช่าแรนซัมแวร์จากผู้พัฒนาโดยไม่ต้องสร้างเอง [2] แรนซัมแวร์ที่รู้จักกันดีของ RaaS คือ LockBit Ransomware ซึ่งแรนซัมแวร์ระดับองค์กรที่ถูกใช้โจมตีระบบคอมพิวเตอร์โดยเข้ารหัสไฟล์และเรียกค่าไถ่เพื่อแลกกับการปลดล็อกข้อมูลและเข้ารหัสข้อมูล [3] ผลที่ได้คือผู้ใช้จะเห็นข้อความเรียกค่าไถ่บนหน้าจอของเครื่องและแจ้งว่าข้อมูลถูกเข้ารหัสโดยต้องชำระค่าไถ่เป็นสกุลเงินดิจิทัลเพื่อปลดล็อกไฟล์ ตัวอย่าง RaaS ที่เคยโจมตี เช่น REvil DarkSide และConti เป็นต้น [4]

ความรุนแรงของปัญหาโมเดลธุรกิจของอาชญากรไซเบอร์ไม่เพียงแต่สะท้อนให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนการโจมตีแต่ยังรวมถึงผลกระทบทางการเงินและการดำเนินธุรกิจที่รุนแรงอีกด้วย เช่น การหยุดชะงักของระบบส่งผลให้ไม่สามารถให้บริการลูกค้าได้ตามปกติ การสูญเสียข้อมูลสำคัญที่อาจถูกนำไปขายในตลาดมืด และความเชื่อมั่นของลูกค้าลดลง เนื่องจากข้อมูลส่วนบุคคลและข้อมูลทางการเงินถูกละเมิด [5] ด้วยเหตุนี้การศึกษาปัญหาแรนซัมแวร์จึงมีความสำคัญเพราะจะช่วยให้องค์กรสามารถวางมาตรการป้องกันและรับมือจากการถูกโจมตีได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงช่วยลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้

LockBit Ransomware เป็นแรนซัมแวร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดในโลกไซเบอร์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง LockBit Ransomware ในรูปแบบ Ransomware-as-a-Service (RaaS) ที่จะช่วยให้ผู้ที่ไม่มีทักษะการเขียนโค้ดขั้นสูงสามารถเช่าแรนซัมแวร์จากผู้พัฒนาเพื่อโจมตีเป้าหมายได้ [2] RaaS เริ่มปรากฏตัวครั้งแรกในปี 2019 และถูกพัฒนาจนถึงเวอร์ชันล่าสุดคือ LockBit 3.0 ซึ่งมีความสามารถในการหลบเลี่ยงการตรวจจับและแพร่กระจายได้ดียิ่งขึ้น

สมบัติเด่นของ LockBit Ransomware มีดังต่อไปนี้ (1) การเข้ารหัสข้อมูลไฟล์บนเซิร์ฟเวอร์ได้อย่างรวดเร็วโดยใช้อัลกอริธึมการเข้ารหัสขั้นสูงทำให้เหยื่อไม่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ (2) การข่มขู่สองชั้น (Double Extortion) คือ นอกจากการเรียกค่าไถ่จากเหยื่อเพื่อปลดล็อกไฟล์แล้ว ยังมีการข่มขู่ที่จะเปิดเผยข้อมูลที่ถูกขโมยหากเหยื่อไม่จ่ายเงิน ซึ่งเพิ่มแรงกดดันให้เหยื่อต้องตัดสินใจจ่ายค่าไถ่ และ (3) การใช้สกุลเงินดิจิทัลในการชำระค่าไถ่ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ Bitcoin หรือ Monero ทำให้ยากต่อการติดตามเส้นทางการเงิน

บทความนี้นำเสนอการแก้ปัญหาอาชญากรไซเบอร์ด้วยการวิเคราะห์พฤติกรรมกระบวนการทำงานของ LockBit Ransomware โดยใช้โปรแกรมขโมยข้อมูลหรือ Redline และระบบ Sandbox ในการวิเคราะห์หน่วยความจำและไฟล์ในระบบ รวมถึงวิเคราะห์มัลแวร์เพิ่มเติม มากไปกว่านั้นยังมีการพัฒนาและทดสอบโมเดลการตรวจจับ LockBit Ransomware โดยใช้การจำลองการโจมตีโดยแรนซัมแวร์ตัวจริงผ่านระบบ SIEM (Security Information and Event Management) ด้วยเครื่องมือ Wazuh

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยได้แบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ (1) การวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์ (Forensic Analysis) และ (2) การตรวจจับมัลแวร์ (Malware Detection) การดำเนินงานวิจัยจะเริ่มจากการจำลองสภาพแวดล้อมด้วยเครื่องเสมือน (Virtual Machine) บนระบบปฏิบัติการ Windows Server 2022 เพื่อใช้ในการทดลอง LockBit Ransomware ที่ได้จากแหล่งที่น่าเชื่อถือ จากนั้นใช้แพลตฟอร์มวิเคราะห์มัลแวร์ออนไลน์คือ Any.Run ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของมัลแวร์ (Sandbox) เพื่อสังเกตพฤติกรรมและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของมัลแวร์ เช่น ข้อมูลที่บ่งชี้ว่าระบบอาจถูกบุกรุกโดยภัยคุกคามทางไซเบอร์ หรือ Indicator of Compromise (IOC) พร้อมติดตั้งเครื่องมือวิเคราะห์ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์เพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์ เช่น Sysmon และ Wireshark จากนั้นจะทำการรันมัลแวร์ในสภาพแวดล้อมควบคุมและวิเคราะห์พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในระบบเชิงลึกด้วย Redline Malware เช่น การเข้ารหัสไฟล์ การลบ Shadow Copy และการเปลี่ยนแปลงรีจิสทรี เป็นต้น นำข้อมูลพฤติกรรมที่เกิดขึ้นไปจำลองระบบตรวจจับด้วยการสร้างระบบเครือข่ายเสมือนที่ประกอบด้วย pfSense

Firewall Wazuh SIEM/XDR Windows Server และ Windows 11 ในเครื่องเป้าหมายและวิเคราะห์เหตุการณ์ผ่านแพลตฟอร์มสำหรับการตรวจสอบความปลอดภัย (Wazuh) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการแจ้งเตือนและการตรวจจับพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ก่อนหน้า พร้อมสรุปผลการตรวจจับและแนวทางการพัฒนาเพิ่มเติม

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วย Redline

จากการรันไฟล์ LockBit Ransomware บน Windows Server 2022 และวิเคราะห์ด้วย Redline Malware พบว่ามีไฟล์ที่ถูกเข้ารหัสทั้งหมด 697 ไฟล์ ซึ่งแบ่งเป็นการสร้างไฟล์ Ransom Note จำนวน 518 รายการและพบการลบบริการ Volume Shadow Copy (VSS) ที่ไม่สามารถกู้คืนไฟล์จาก Previous Versions ได้ อีกทั้งยังพบว่ามี Event Logs ถูกลบและ Registry มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนมากในเวลาที่ใกล้เคียงกับการรันมัลแวร์

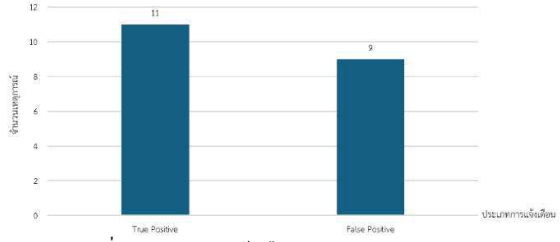
4.2 ผลการจำลองพฤติกรรมมัลแวร์ด้วย Any.Run

การจำลองพฤติกรรมมัลแวร์ผ่านแพลตฟอร์ม Any.Run บน Windows 10 พบพฤติกรรมสำคัญที่พบคือ การเปิด Notepad พร้อมข้อความเรียกค่าไถ่ การเข้ารหัสไฟล์ .doc, .jpg, .json, .txt และการลบ Shadow Copy ด้วย Vssadmin Delete Shadows มากไปกว่านั้นยังพบการดำเนินกิจกรรมบน Registry จำนวนมากโดยแบ่งเป็นกิจกรรมการอ่านค่า (Read) 12,314 รายการ การเขียนหรือแก้ไขค่า (Write) 1,250 รายการ และการลบค่า (Delete) 1 รายการ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความพยายามของมัลแวร์ในการตรวจสอบข้อมูลภายในระบบและการปรับแต่งค่าคอนฟิกบางอย่างเพื่อใช้ในการเข้ารหัสไฟล์หรือฝังตัวในระบบอย่างแนบเนียน กิจกรรมดังกล่าวถือเป็นพฤติกรรมที่สำคัญที่สามารถใช้เป็นหลักฐานในการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์ได้อย่างชัดเจน

4.3 ผลการตรวจจับเหตุการณ์ด้วย Wazuh

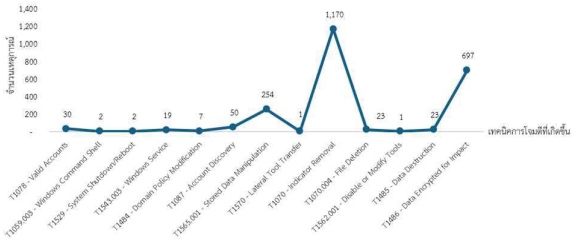
4.3 ผลการตรวจจับเหตุการณ์ด้วย Wazuh

ในส่วนนี้ ใช้ระบบตรวจจับเหตุการณ์แบบ Real-time ผ่านแพลตฟอร์ม Wazuh ที่ติดตั้งบนเครื่อง Virtual Machine ซึ่งมีสเปคดังนี้: CPU Intel i5-8265U, RAM 32GB, SSD 2TB โดย Wazuh ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองการโจมตีจาก LockBit Ransomware บน Windows Server 2022 และ Windows 11 โดย Wazuh ตรวจพบเหตุการณ์รวมทั้งสิ้น 20 รายการ แบ่งเป็น True Positive 11 รายการ และ False Positive 9 รายการ



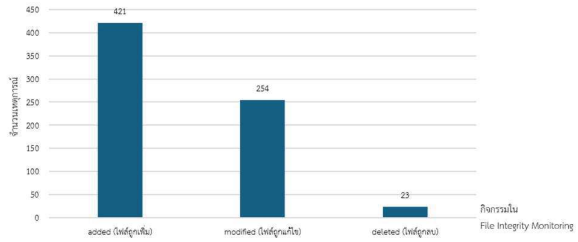
รูปที่ 1 สรุปผลการแจ้งเตือนโดยรวมบนระบบ Wazuh

จากการตรวจจับเหตุการณ์ด้วย Wazuh พบพฤติกรรมของ LockBit Ransomware ที่สามารถจับคู่กับเทคนิคภายใต้กรอบของฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้โจมตีทางไซเบอร์ (MITRE ATT&CK) ได้อย่างชัดเจนในหลายกลยุทธ์ โดยกลยุทธ์ที่ตรวจพบมากที่สุดคือ Defense Evasion ผ่านเทคนิค T1070 - Indicator Removal 1,170 เหตุการณ์แสดงถึงความพยายามของมัลแวร์ในการลบ log และลบร่องรอยการโจมตี ส่วนกลยุทธ์ด้าน Impact (T1485 - Data Destruction) ตรวจพบ 23 เหตุการณ์ซึ่งเป็นผลจากการเข้ารหัสและการทำลายข้อมูล ส่วนกลยุทธ์ Discovery (T1087 - Account Discovery) มี 50 เหตุการณ์ บ่งชี้ถึงการสแกนข้อมูลผู้ใช้และกลุ่มภายในระบบ สำหรับกลยุทธ์ Privilege Escalation (T1484 - Domain Policy Modification) และกลยุทธ์ Persistence (T1543.003 - Windows Service) ตรวจพบ 7 และ 19 เหตุการณ์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 สะท้อนถึงการฝังตัวและการยกระดับสิทธิ์ของมัลแวร์เพื่อควบคุมระบบอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมดังกล่าวเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของการโจมตีที่ซับซ้อนของ LockBit สอดคล้องกับเทคนิคที่ใช้จริงภายใต้กรอบของฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้โจมตีทางไซเบอร์



รูปที่ 2 Attack Timeline ของ LockBit Ransomware อ้างอิงจากฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้โจมตีทางไซเบอร์ (MITRE ATT&CK)

จากการตรวจสอบด้วยระบบ File Integrity Monitoring (FIM) ของ Wazuh หลังการรันมัลแวร์ LockBit Ransomware พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงไฟล์ในระบบจำนวนมาก โดยมีไฟล์ที่ถูกเพิ่มใหม่ (added) จำนวน 421 รายการ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไฟล์เรียกค่าไถ่ (Ransom Note) ที่ถูกสร้างในหลายตำแหน่งของระบบ มีไฟล์ที่ถูกแก้ไข (modified) จำนวน 254 รายการ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการเข้ารหัสไฟล์ และพบไฟล์ที่ถูกลบ (deleted) จำนวน 23 รายการ ซึ่งอาจเป็นส่วนหนึ่งของการลบร่องรอย หรือไฟล์สำคัญของระบบ ข้อมูลเหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงผลกระทบโดยตรงของมัลแวร์ที่สามารถตรวจจับผ่านฟีเจอร์ FIM ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3 สรุปผลการแจ้งเตือนโดยรวมบนระบบ Wazuh

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ใช้

ในการเปรียบเทียบเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ LockBit Ransomware ได้แก่ Redline Any.Run และ Wazuh แสดงให้เห็นว่าทั้ง 3 เครื่องมือสามารถใช้ในการวิเคราะห์ย้อนหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในด้านการตรวจจับแบบ Real-time มีเพียง Wazuh เท่านั้นที่รองรับได้ ในขณะที่ Redline และ Any.Run จะเป็นเพียงการเก็บข้อมูลย้อนหลังในลักษณะ Sandbox เท่านั้น สำหรับการตรวจจับ Process และการเปลี่ยนแปลงของ Registry นั้นทั้ง 3 เครื่องมือสามารถทำได้ทั้งหมด ส่วนการตรวจจับ Log Event นั้น Redline Malware ไม่สามารถรองรับได้โดยตรงแต่สามารถใช้ร่วมกับไฟล์จากแหล่งอื่นได้ ในขณะที่แพลตฟอร์ม Any.Run และ Wazuh สามารถตรวจจับได้อย่างแม่นยำโดยเฉพาะอย่างยิ่งแพลตฟอร์ม Wazuh ที่เน้นการตรวจสอบ log แบบ Real-time นอกจากนี้แพลตฟอร์ม Any.Run และ Wazuh ยังสามารถเชื่อมโยงพฤติกรรมที่ตรวจพบภายใต้ฐานข้อมูลที่รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้โจมตีทางไซเบอร์ (MITRE ATT&CK) ได้อัตโนมัติเพื่อช่วยให้องค์กรสามารถวิเคราะห์ ตรวจจับ และป้องกันภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในขณะที่ Redline ไม่สามารถรองรับการเชื่อมโยงนี้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้หลายเครื่องมือหรือหลายแพลตฟอร์มร่วมกันในการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมมากกว่า

ด้านที่เปรียบเทียบ	Redline	Any.Run	Wazuh
การวิเคราะห์ย้อนหลัง	ได้	ได้	ได้
ตรวจจับ Real-time	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้
ตรวจจับ Process	ได้	ได้	ได้
ตรวจจับ Registry	ได้	ได้	ได้
ตรวจจับ Log Event	ไม่ได้	ได้	ได้
เชื่อมโยง MITRE ATT&CK	ไม่ได้	ได้	ได้

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบความสามารถของแต่ละเครื่องมือ

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือที่หลากหลายร่วมกันนั้นจะให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับมัลแวร์ได้ดีกว่าการใช้เครื่องมือเพียงชนิดเดียวซึ่งถือเป็นแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในองค์กรเพื่อเพิ่มความมั่นคงความปลอดภัยเชิงรุกได้อย่างดี การทดลองที่มีพื้นฐานความรู้ที่แตกต่างกันจะมีการตอบสนองต่อการโจมตีด้วยฟิชชิงอีเมลในรูปแบบที่แตกต่างกันสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

5. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมของ LockBit Ransomware โดยใช้เครื่องมือ Redline Any.Run และ Wazuh ในสภาพแวดล้อมจำลองบนระบบปฏิบัติการ Windows พบว่ามัลแวร์มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับลักษณะของ Ransomware ขั้นสูงกล่าวคือ สามารถเข้าถึงรหัสไฟล์ได้อย่างรวดเร็วและสามารถสร้างไฟล์เรียกค่าไถ่ รวมถึงสามารถลบข้อมูลสำรองพร้อมกับลบ log เหตุการณ์ของระบบเพื่อหลบเลี่ยงการตรวจจับได้ และเมื่อวิเคราะห์ในเชิงปริมาณพบว่า LockBit สามารถเข้ารหัสไฟล์ได้ 697 ไฟล์ สามารถสร้างไฟล์ Ransom Note 518 ไฟล์ และสามารถสร้าง Process ใหม่ 166 รายการ (โดยมีรายการที่เกี่ยวข้องกับมัลแวร์ 28 รายการ) อีกทั้งยังสามารถตรวจพบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง Registry 13,565 รายการ ในขณะที่แพลตฟอร์ม Wazuh สามารถตรวจจับเหตุการณ์ Integrity Checksum Changed ได้มากถึง 1,274 รายการ สำหรับในเชิงคุณภาพจะพบพฤติกรรมที่ชัดเจนของมัลแวร์ดังนี้ การเปลี่ยน Wallpaper การเปิด Notepad การแสดงข้อความเรียกค่าไถ่ การลบ Shadow Copy และการลบร่องรอยซึ่งถือเป็นสิ่งที่ยืนยันความสามารถในการโจมตีและการหลบเลี่ยงการตรวจจับอย่างมีแบบแผน

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Suk-on, N. Thiratitsakun, and K. Chimmanee, “Digital Forensic Analysis of Lockbit Ransomware Attack on Operational Technology,” in Proc. the 2nd Int. Conf. Cyber Resilience (ICCR), Nov. 2024, pp. 624–630, doi:10.1109/InCIT56086.2022.10067356.

[2] A.A.M.A. Alwashali, N.A.A. Rahman, and N. Ismail, “A Survey of Ransomware as a Service (RaaS) and Methods to Mitigate the Attack,” in Proc. the 14th Int. Conf. Developments in eSystems Eng. (DeSE), Dec. 2021, doi: 10.1109/DeSE54285.2021.9719456.

[3] N.A. Malik, A.M. Delshadi, M. Ibrar, K. Hamid, M. Aamir, F. Ahmed, and G. Ahmad, “Behavior and Characteristics of Ransomware – A Survey,” in Proc. the 2nd Int. Conf. Cyber Resilience (ICCR), Feb. 2024, doi: 10.1109/ICCR61006.2024.10532983.

[4] R. Singh, S. Singh, and A. Singh, “REvil Ransomware: Analysis of One of the Most Sophisticated Malware Families,” in Proc ICICET- 2024, Jun. 2024, doi: 0.1109/ICICET59348.2024.10616279.

[5] K.Khaliq, N.Z.A. Rahim, K. Hamid, M. Ibrar, U. Ahmad, and M.U. Ullah, “Ransomware Attacks: Tools and Techniques for Detection,” in Proc. the 2nd Int. Conf. Cyber Resilience (ICCR), Feb. 2024, doi: 10.1109/ICCR61006.2024.10532926.

การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

Development of An Application for Controlling Electric Beds for Bedridden Patients

นุชจิเรศ แก้วสกุล[1*] วรพงศ์ บุญช่วยแทน[2] และ กรภัทร เฉลิมวงศ์[3]
[1*3]หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: nutjired.k@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง 2) ศึกษาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง และ 3) สอบถามความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

วิธีการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ใช้กลุ่มตัวอย่างในการวิจัย คือ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 จำนวน 20 คน หลักสูตรพยาบาลศาสตรบัณฑิต วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สงขลา ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา โดยสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ซึ่งเครื่องมือในการวิจัย ประกอบด้วย แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง แบบประเมินคุณภาพ แบบทดสอบประสิทธิภาพการ และแบบสอบถามความพึงพอใจการใช้งาน ผลการวิจัยพบว่า 1) แอปพลิเคชันสามารถสั่งการให้เตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง ปรับเอนตัวขึ้นลง ยกเท้าขึ้นลง พลิกตะแคงซ้าย และพลิกตะแคงขวา ทั้งในรูปแบบโหมดการปรับการทำงานด้วยตัวเอง และโหมดอัตโนมัติ ซึ่งในโหมดอัตโนมัติสามารถตั้งเวลาในการปรับเปลี่ยนท่าทางการเคลื่อนไหวของผู้ป่วยได้ตามมาตรฐานการดูแลผู้ป่วยติดเตียง อีกทั้งยังมีระบบแจ้งเตือนการปรับเปลี่ยนท่าทางการเคลื่อนไหว ในโหมดปรับการทำงานด้วยตัวเอง ส่วนการติดต่อผู้ใช้งาน ประกอบด้วย 4 หน้า ได้แก่ หน้าแรกของแอปพลิคชัน หน้าเลือกโหมดการทำงาน หน้าโหมดการทำงานอัตโนมัติ และโหมดปรับการทำงานด้วยตัวเอง ซึ่งคุณภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง อยู่ในระดับมาก ($\bar{x}$ = 4.32, S.D. = 0.46) 2) ประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง ได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำงาน 4 อย่าง ประกอบด้วย 1) ผลการศึกษาประสิทธิภาพโหมดอัตโนมัติของแอปพลิเคชัน กำหนดเวลา 2 นาที ค่าเฉลี่ย = 2.003 2) ผลการศึกษาประสิทธิภาพโหมดปรับการทำงานด้วยตัวเอง พบว่า การตอบสนองอยู่ที่ค่าเฉลี่ย 0.634 วินาที 3) ผลการศึกษาประสิทธิภาพสมรรถนะ ทดสอบสำหรับการเชื่อมต่อสมาร์ทโฟนเครือข่าย WiFi และ Cellular แล้วส่งคำสั่งจากแอปพลิเคชัน ไปยัง Firebase เมื่อใช้ความเร็วอินเทอร์เน็ตปกติของ WiFi พบว่า ค่าเฉลี่ยการตอบสนองอยู่ที่ 0.477 วินาที และความเร็วอินเทอร์เน็ตล่าช้าของ WiFi พบว่าค่าเฉลี่ยการตอบสนองอยู่ที่ 0.365 วินาที ส่วนเมื่อใช้ความเร็วอินเทอร์เน็ตปกติของ Cellular พบว่าค่าเฉลี่ยการตอบสนองอยู่ที่ 0.543 วินาที และเมื่อใช้ความเร็ว อินเทอร์เน็ตล่าช้าของ Cellular พบว่า ค่าเฉลี่ยการตอบสนองอยู่ที่ 0.304 วินาที และผลการสอบถามความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับ ผู้ป่วยติดเตียง ด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ ($\bar{X}$ = 4.52, S.D.= 0.82) ด้านเหมาะสมกับการใช้งานมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ ($\bar{X}$ = 3.97, S.D.= 0.82) ภาพรวมจากการสอบถามความพึงพอใจกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย($\bar{X}$ = 4.24, S.D. = 0.55) เป็นไปตามสมติฐานที่ตั้งไว้

คำสำคัญ : แอปพลิเคชัน, ควบคุม, เตียงไฟฟ้า, ผู้ป่วยติดเตียง

Abstract

This research aims to 1) develop an electric bed control application for bedridden patients, 2) study the efficiency of the electric bed control application for bedridden patients, and 3) inquire about the satisfaction of using the electric bed control application for bedridden patients. The research methodology used in this research was 20 third-year undergraduate students in the nursing program, Boromarajonani College of Nursing, Songkhla, Bo Yang Subdistrict, Mueang Songkhla District, Songkhla Province, by purposive sampling. The research instruments consisted of an electric bed control application for bedridden patients, a quality assessment form, an efficiency test, and a satisfaction questionnaire. The research results found that 1) the application can command the electric bed for bedridden patients to adjust the body up and down, lift the feet up and down, turn left and right sides, both in manual and automatic modes. In automatic mode, the time can be set to change the patient's movement posture according to the bedridden patient care standards. There is also a notification system for changing the movement posture in manual mode. The user interface consists of 4 pages: the application home page, the operation mode selection page, the automatic mode page, and the manual mode. The quality of the electric bed control application for bedridden patients At a high level ($\bar{X}$ = 4.32, S.D. = 0.46) 2) The efficiency of the application to control the electric bed for bedridden patients. The study of the efficiency of 4 tasks consisted of 1) The study of the efficiency of the automatic mode of the application, set the time to 2 minutes, the average = 2.003. 2) The study

of the efficiency of the self-adjustment mode found that the average response was 0.634 seconds. 3) The study of the efficiency of the performance tested for connecting smartphones to WiFi and Cellular networks and sending commands from the application to Firebase. When using normal WiFi internet speed, the average response was 0.477 seconds, and the delayed WiFi internet speed was 0.365 seconds. When using normal Cellular internet speed, the average response was 0.543 seconds, and when using delayed Cellular internet speed, the average response was 0.304 seconds. The results of the satisfaction survey of the sample group using the electric bed control application for bedridden patients In terms of ease of use, the highest mean score was ($\bar{X}$ = 4.52, S.D. = 0.82). In terms of suitability for use, the lowest mean score was ($\bar{X}$ = 3.97, S.D. = 0.82). Overall, from the satisfaction survey, the sample group was very satisfied with the mean score ($\bar{X}$ = 4.24, S.D. = 0.55), which was in line with the hypothesis.

Keywords: Application, Control, Electric beds, Bedridden patients

1. บทนำ

ประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงทางประชากรที่สำคัญ นั้นคือ การเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ (Aged Society) ซึ่งเป็นลักษณะที่พบได้ในหลายประเทศทั่วโลก ประเทศไทยจะมีประชากรผู้สูงอายุประมาณ 14.4 ล้านคน หรือเกินร้อยละ 20 ของประชากรทั้งหมด ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงนี้นำมาซึ่งความท้าทายในหลายมิติ โดยเฉพาะมิติด้านการดูแลสุขภาพ และการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้สูงอายุที่มีภาวะพึ่งพิงหรือที่เรียกว่ากลุ่มติดบ้านหรือติดเตียง มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมาก [2] หนึ่งในอุปกรณ์สำคัญที่ช่วยลดภาระของผู้ดูแล คือ เตียงไฟฟ้า ซึ่งออกแบบมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการปรับท่าทางของผู้ป่วย คณะผู้วิจัยได้เห็นโอกาสในการพัฒนาระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการเปลี่ยนจากการควบคุมผ่านรีโมทคอนโทรลธรรมดามาเป็นแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน การนำระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งมาใช้ในทางการแพทย์หรือทางสุขภาพมากขึ้น [5] แอปพลิเคชันจะช่วยเพิ่มความประสิทธิภาพในการดูแลผู้ป่วยติดเตียงได้ดียิ่งขึ้น และช่วยลดการสัมผัสกับเตียงโดยตรง [4] ลดความเสี่ยงการแพร่เชื้อโรคระหว่างผู้ดูแลและผู้ป่วย นอกจากนี้ ตั้งค่าการปรับเตียงอัตโนมัติตามช่วงเวลา สามารถลดภาระของผู้ดูแลในการพลิก การแจ้งเตือนเมื่อปรับการทำงานของเตียงและควบคุมได้จากทุกที่ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลผู้ป่วยและลดภาระของผู้ดูแลได้อย่างมีนัยสำคัญ การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าที่ควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน ไม่เพียงช่วยแก้ไขข้อจำกัดและสร้างความสะดวก แต่ยังเปิดโอกาสให้เกิดนวัตกรรมใหม่ ๆ ในการดูแลผู้ป่วยติดเตียง ช่วยให้การดูแลมีประสิทธิภาพมากขึ้นและรองรับความต้องการในอนาคตได้อย่างยั่งยืน [6]

2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

2.3 เพื่อสอบถามความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

3.สมมติฐานงานวิจัย

3.1 แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียงที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญ อยู่ในระดับมาก

3.2 แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในโหมดการทำงานอัตโนมัติ โดยมีค่าเฉลี่ยเวลาการเปลี่ยนท่าทางของเตียงไม่เกิน 2 นาที ในโหมดปรับการทำงานด้วยตัวเอง ค่าเฉลี่ยเวลา ตอบสนองไม่เกิน 1 วินาที ส่วนประสิทธิภาพด้านสมรรถนะของระบบ มีค่าเฉลี่ยเวลาตอบสนองมากกว่า 1 วินาที

3.3 กลุ่มตัวอย่างที่ใช้งานแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง มีความพึงพอใจเฉลี่ยไม่ต่ำกว่าระดับมาก

4.ขอบเขตของการวิจัย

4.1 ขอบเขตด้านการพัฒนาแอปพลิเคชัน

4.1.1 แอปพลิเคชันพัฒนาในระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Andriod)

4.1.2 แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นเป็นต้นแบบผลิตภัณฑ์ทางซอฟต์แวร์เท่านั้น

4.1.3 แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นใช้งานได้กับเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียงที่ออกแบบให้รองรับกับแอปพลิเคชันนี้เท่านั้น

4.2 ขอบเขตด้านสถานที่

4.2.1 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

4.2.2 วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สงขลา ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

5.วิธีการดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง คณะผู้วิจัยนำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยตามลำดับหัวข้อต่อไปนี้

5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

5.1.1 ประชากร นักศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรพยาบาลศาสตรบัณฑิต วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สงขลา จำนวน 45 คน

5.1.2 กลุ่มตัวอย่าง นักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 จำนวน 20 คน หลักสูตรพยาบาลศาสตรบัณฑิต วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สงขลา โดยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

5.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

5.2.1 ตัวแปรต้น คือ การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

5.2.2 ตัวแปรตาม ประกอบด้วย

- คุณภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง
- ประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง
- ผลความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้า

5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย [1] [3] [6]

5.3.1 แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

5.3.2 แบบประเมินคุณภาพ

5.3.3 แบบทดสอบประสิทธิภาพ

5.3.4 แบบสอบถามความพึงพอใจ

5.4 การพัฒนาเครื่องมือวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้า มีวิธีการพัฒนาโดยใช้กระบวนการของวงจรพัฒนาระบบ

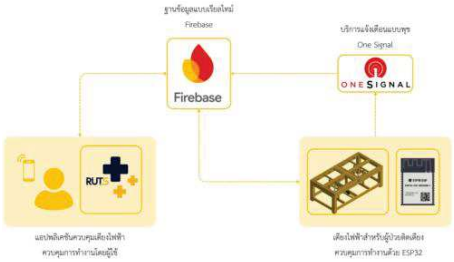
5.4.1 ศึกษาปัญหาของผู้ป่วยติดเตียงในการใช้งานเตียงไฟฟ้า

5.4.2 การศึกษาความเหมาะสม

5.4.3 การวิเคราะห์ความต้องการของระบบอย่าง

5.4.4 การออกแบบระบบและส่วนประกอบต่าง ๆ ของแอปพลิเคชัน

การพัฒนาแอปพลิเคชันบนแพลตฟอร์ม Thunkable เชื่อมต่อแอปพลิเคชันกับฐานข้อมูล Firebase เขียนโปรแกรมควบคุม ESP32 ผ่าน Arduino IDE เพื่อรับข้อมูลจาก Firebase Realtime Database การทดสอบการทำงานโดยการต่อวงจรควบคุมเตียงไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้



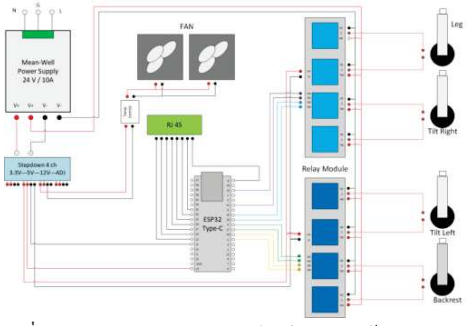
รูปที่ 1 ไดอะแกรมการออกแบบระบบแอปพลิเคชันสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

การเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชันและเตียงไฟฟ้า โดยมีหลักการทำงานดังนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่รับคำสั่งจากแอปพลิเคชันเพื่อนำไปควบคุมการทำงานของเตียงไฟฟ้า คำสั่งที่จะถูกส่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยัง Firebase จากนั้น Firebase จะส่งคำสั่งต่อไปยัง ESP32 เพื่อควบคุมเตียงไฟฟ้าให้ทำงานตามที่กำหนด

นอกจากนี้ ระบบยังมีการแจ้งเตือนผ่านบริการ One Signal



รูปที่ 2 แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

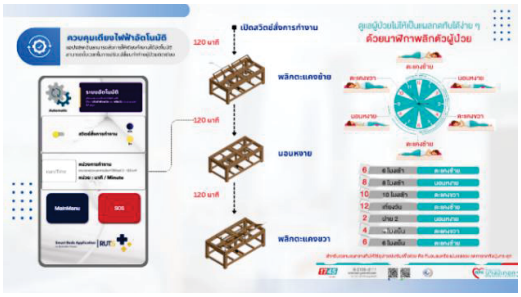


รูปที่ 3 ออกแบบวงจรควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

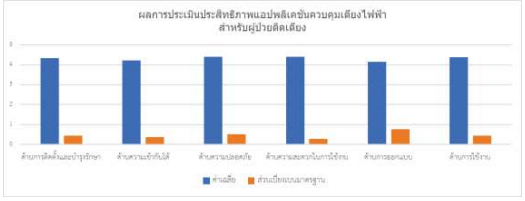
6.ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง ศึกษาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน ควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง และเพื่อสอบถามความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชัน ควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลและนำเสนอผลการวิจัย ดังนี้

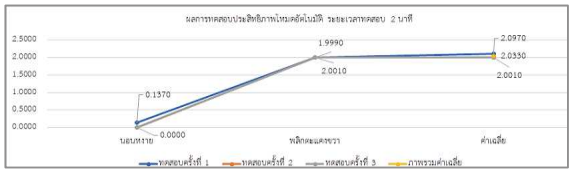
6.1 ผลการพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง

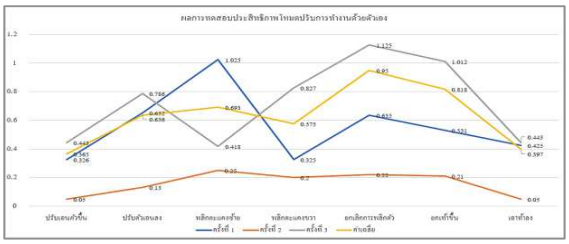


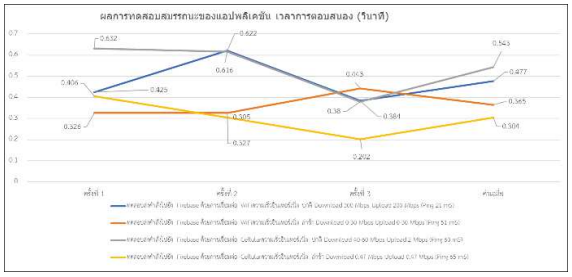
6.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง



6.3 ผลการสอบถามความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันควบคุมควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง







7.สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง ผู้วิจัยได้ศึกษาคุณภาพของแอปพลิเคชันด้วยการนำแอปพลิเคชันเข้ารับการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน โดยผลการประเมินพบว่าภาพรวมของคุณภาพแอปพลิเคชันอยู่ในระดับ มาก ค่าเฉลี่ย 4.32 คะแนน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.46 ($\bar{X}$ = 4.32, S.D. = 0.46) ซึ่งตรงกับสมมติฐานที่ตั้งไว้

ผลการสอบถามความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้แอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง พบว่า ด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ ($\bar{X}$ = 4.52, S.D.= 0.51) ด้านเหมาะสมกับการใช้งานมีค่าเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ ($\bar{X}$ = 3.97, S.D.= 0.82) ภาพรวมจากการสอบถามความพึงพอใจกลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ = 4.24, S.D. = 0.55) เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

8.อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันควบคุมเตียงไฟฟ้าสำหรับผู้ป่วยติดเตียง มีประโยชน์ในด้านการเพิ่มความสะดวกในการควบคุม และช่วยลดภาระงานของผู้ดูแลผู้ป่วยติดเตียง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สกุล คำนวณชัย [8] ที่ได้ศึกษาการพัฒนาระบบควบคุมการพลิกเตียงผู้ป่วยและการแจ้งเตือนผู้ป่วยลุกออกจากเตียงผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน ในด้านความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ดูแลผู้ป่วย ลดภาระการดูแลและช่วยเหลือผู้ป่วยในทุกขั้นตอนของการพลิกเตียง และนอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังส่งผลให้ผู้ป่วยได้รับการดูแลในลักษณะที่มีความเป็นระบบและปลอดภัย

ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบควบคุมการพลิกเตียงและการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในภาคการดูแลสุขภาพและตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

บรรณานุกรม

[1] บุญชม ศรีสะอาด. (2539). การแปลผลเมื่อใช้เครื่องมือรวบรวมข้อมูลแบบมาตราส่วนประมาณค่า.ใน*การวัดผลการศึกษา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม* (หน้า 64-68). ภาควิชาการวิจัยและพัฒนาการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

[2] พูลสิน ศรีประยูร, ศุภราภรณ์ ธรรมชาติ, จันสุดา โพธิ์เที่ยง, ปารณัฐ สุขสุทธิ์, ศาสตรา ชนะสาร, ยุพาพรรณ ธรรมวงษา ปาณบดี เอกะจัมปกะ. (2564). *รายงานการประเมินสภานภาพการใช้ Health Application ของกระทรวงสาธารณสุข เพื่อการสื่อสารสุขภาพ*. กองยุทธศาสตร์และแผนงาน สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข.

[3] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2565). *รายงานการประเมินความพึงพอใจ ประจำปี 2565*. สำนักงานการตรวจสอบภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[4] เรืองฤทธิ์ โทรพันธ์,เพชรรัตน์ พิบาลวงศ์ สกลสุภา สิงคิบุตร. (2567). *งานวิจัยเรื่องการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อติดตามและเตือนอาการผิดปกติ ต่อความรู้พฤติกรรมการปฏิบัติตัว และระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยเบาหวาน*. วิทยาลัยพยาบาลบรมราชชนนี สรรพสิทธิประสงค์ คณะพยาบาลศาสตร์.

[5] ศุภชัย จันทสาร, มงคลเทพ หนุนพงษ์ มงคล ณ ลำพูน. (2567). *งานวิจัยเรื่อง การพัฒนาแอปพลิเคชันระบบควบคุมการให้น้ำต้นไม้ด้วยอุปกรณ์ IOT กรณีศึกษาสวนบัญญัติพันธ์ไม้*. สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารบริหารธุรกิจและ เทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี.

[6] สกุล คำนวณชัย. (2566). งานวิจัยเรื่องการพัฒนาระบบควบคุมการพลิกเตียงผู้ป่วยและการแจ้งเตือนผู้ป่วยลุกออกจากเตียงผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือ. สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวนุชจิเรส แก้วสกุล



ปี 2553 คอ.ม(ไฟฟ้า) มจพ.
ปี 2550 อส.บ (เครื่องมือวัดและควบคุม) สจพ.

ความเชี่ยวชาญ	รายละเอียด
ไฟฟ้า	1.ชุดทดลองหลักการทำงานตัวเก็บประจุ,2560 2.ชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ 1 เฟส โดยใช้โปรแกรมพีแอลซี,2562
ระบบควบคุม	1.ชุดทดลองการควบคุมแท็งก์น้ำแบบ PID โดยโปรแกรม LabVIEW,2560 2.แบบจำลองระบบการตรวจสอบความปลอดภัยภายในบ้าน,2561 3.ชุดควบคุมสายพานลำเลียงคัดแยกวัตถุโดย PLC,2562
อุตสาหกรรมเกษตร	1.เครื่องผ่าจาวตาลโดยใช้วิธีเลย์ในการควบคุมใบมีด,2561 2.การยกระดับคุณภาพชีวิตอาชีพผลไม้กวนของชุมชนด้วยนวัตกรรมเครื่องกวนผลไม้ควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติและเครื่องอัดแท่งผลไม้กวน,2563 3.เครื่องมือบรรจุภัณฑ์ข้าวสารแบบสุญญากาศที่สามารถชั่งน้ำหนักและบรรจุข้าวสารจำหน่ายสำหรับวิสาหกิจชุมชน,2564 4.การออกแบบและพัฒนาเครื่องผสมก้อนเชื้อเห็ดสำหรับวิสาหกิจชุมชน,2565

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ReXNet สำหรับการจำแนกสถานะก้อนเห็ดจากภาพถ่าย

Performance Comparison of ReXNet for Image-Based Classification of Mushroom Bag Status

กฤษฎา ทาสันเทียะ[1*] เอกบดี เมืองกลาง[1] ปรีชา สมหวัง[1] กรัณฑ์กมล ภูครองหิน[1] ประจวบ อินระวงค์[2] ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย[2]
มงคล ดูพิมาย[3] และ พงษ์ประภัทร ชูหิรัญญ์วัฒน์[4]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและนวัตกรรมดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[4]สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

E-mail: kritsada.ta@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

การเพาะเห็ดจากก้อนฟางข้าวเป็นวิธีที่นิยมในภาคเกษตรกรรมของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม การประเมินสถานะของก้อนเห็ดด้วยสายตามีความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพและผลผลิต งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์สถานะของก้อนเห็ดโดยใช้ ReXNet ซึ่งเป็นโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Deep Neural Networks) ที่มีประสิทธิภาพในการประมวลผลภาพ โดยจำแนกก้อนเห็ดออกเป็น 3 กลุ่ม (Class) ได้แก่ ปกติ (Normal) เริ่มมีปัญหา (Warning) และเสียหาย (Severe) โดยใช้ภาพถ่ายก้อนเห็ดในกระบวนการฝึกและทดสอบโมเดล ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ReXNet-1.0 กับโมเดลพื้นฐานที่ได้รับความนิยม ได้แก่ MobileNetV2 และ ResNet18 พบว่าโมเดลทั้งสามสามารถจำแนกสถานะก้อนเห็ดได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) เท่ากับ 100% อย่างไรก็ตาม MobileNetV2 มีค่าเวลาในการทำนาย (Inference Time) ต่ำที่สุดที่ 16.97 มิลลิวินาทีต่อภาพ และจำนวนพารามิเตอร์น้อยที่สุดที่ 2.2 ล้านพารามิเตอร์ ขณะที่ ReXNet-1.0 มีความโดดเด่นด้านความเสถียรของการเรียนรู้และไม่มีอาการ Overfitting งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ ReXNet-1.0 ในการประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมคุณภาพการเพาะเห็ด พร้อมทั้งเปิดโอกาสในการพัฒนาโมเดลให้เหมาะสมกับระบบใช้งานจริง โดยเฉพาะในด้านความเร็วและขนาดโมเดล เพื่อรองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ฝังตัว (Embedded Devices) หรืออุปกรณ์ IoT ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

คำสำคัญ: การจำแนกภาพ ก้อนเห็ด โครงข่ายประสาทเทียม ReXNet

Abstract

Mushroom cultivation using straw-based substrate blocks is a popular method in Thai agriculture. However, assessing the condition of mushroom blocks by human vision is often inaccurate and may affect production quality and yield. This study presents an approach to analyzing the condition of mushroom blocks using ReXNet, a deep convolutional neural network with high performance in image classification. The model classifies mushroom blocks into three categories: Normal, Warning, and Severe, based on photographic images used for both training and testing. The experimental results comparing ReXNet-1.0 with widely used baseline models, namely MobileNetV2 and ResNet18, show that all three models achieved 100% classification accuracy. However, MobileNetV2 demonstrated the fastest inference time at 16.97 milliseconds per image and the smallest number of parameters at 2.2 million. Meanwhile, ReXNet-1.0 exhibited superior learning stability and no signs of overfitting throughout the training process. This study demonstrates the potential of ReXNet-1.0 in supporting quality control processes in mushroom cultivation. It also highlights the opportunity for further model optimization to suit real-world applications, particularly in terms of speed and model size, for deployment on embedded devices or IoT systems with limited computational resources.

Keywords: Image Classification, Mushroom Blocks, Neural Networks, ReXNet

1. บทนำ

การเพาะเห็ดเป็นกระบวนการผลิตทางการเกษตรที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารและเกษตรกรรม เห็ดเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง อีกทั้งยังเป็นที่ต้องการของตลาดในระดับประเทศและต่างประเทศ การเพาะเห็ดโดยใช้ก้อนเชื้อเห็ดที่ทำจากฟางข้าวเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม เนื่องจากฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือใช้

ทางการเกษตรที่หาได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของการเพาะเห็ดขึ้นอยู่กับการควบคุมคุณภาพของก้อนเห็ดอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะการป้องกันความเสียหายจากปัจจัยแวดล้อม เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และการปนเปื้อนของเชื้อโรค ซึ่งหากตรวจสอบได้ไม่ทันท่วงที อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียผลผลิตและต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น

วิธีการตรวจสอบสถานะของก้อนเห็ดในปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงอาศัยการสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของเกษตรกร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน และไม่สามารถระบุปัญหาได้ในระยะเริ่มต้นอย่างแม่นยำ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ภาพในหลากหลายสาขา และแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในการจำแนกข้อมูลที่มีความซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ ReXNet ซึ่งเป็นโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึกที่มีความสามารถในการเรียนรู้ลักษณะเด่นจากภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ มาใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกสถานะของก้อนเห็ดออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ก้อนเห็ดปกติ (Normal), ก้อนเห็ดเริ่มมีปัญหา (Warning) และก้อนเห็ดเสียหาย (Severe) พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบผลการจำแนกกับโมเดลพื้นฐานอื่น เช่น MobileNetV2 และ ResNet18 เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างแนวทางในการตรวจสอบคุณภาพของก้อนเห็ดอย่างแม่นยำ และสนับสนุนการเพาะเห็ดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในภาคเกษตรกรรม

2. การใช้ AI ในการจำแนกภาพทางการเกษตร

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก ได้รับความนิยมในภาคเกษตรกรรม เช่น Mohanty et al. [1] ใช้ CNN จำแนกโรคพืชจากภาพใบไม้ 38 ชนิด ได้ความแม่นยำ 99.35% และ Ferentinos [2] จำแนกโรคพืชมีความแม่นยำกว่า 99.53% จากแหล่งข้อมูลเปิด ขณะที่ Huang et al. [3] เสนอโมเดลที่รวม CNN, LSTM และ Attention สำหรับพยากรณ์สภาพแวดล้อมโรงเพาะเห็ด ส่วน Ahmed et al. [4] ใช้ MobileNetV2 จำแนกโรคใบมะเขือเทศได้แม่นยำถึง 99.30% ด้วยขนาดโมเดลเพียง 9.6 MB ซึ่งเหมาะกับอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด สำหรับ ReXNet ซึ่งพัฒนาโดย Han et al. [5] มีจุดเด่นในการลดพารามิเตอร์และลดปัญหา Overfitting โดยยังคงความแม่นยำสูง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ ReXNet สำหรับจำแนกภาพก้อนเห็ดออกเป็น 3 กลุ่ม (Normal, Warning, Severe) และเปรียบเทียบกับ MobileNetV2 และ ResNet18 เพื่อประเมินความเหมาะสมของโมเดลสำหรับการใช้งานจริงในภาคเกษตรกรรม

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายของก้อนเห็ดภูฏานที่ทำจากฟางข้าว ในระยะการเดินเส้นใย เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์และจำแนกสถานะของก้อนเห็ด โดยก้อนเห็ดที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกว้าง 22 เซนติเมตร ยาว 22 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร และมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 2.5 - 3.0 กิโลกรัม

สำหรับการเตรียมข้อมูลในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายก้อนเห็ดจำนวน 3,000 ภาพ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอนโมเดล (Training set) ร้อยละ 70 ชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบความแม่นยำระหว่างการฝึก (Validation set) ร้อยละ 20 และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล (Test set) ร้อยละ 10 เพื่อให้การวิเคราะห์และจำแนกสถานะของก้อนเห็ดเป็นไปอย่างแม่นยำ

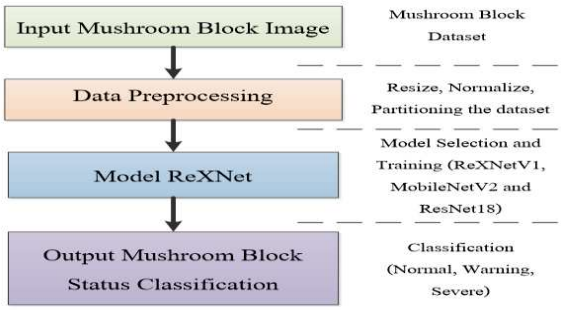
ผู้วิจัยได้จำแนกกลุ่มข้อมูลร่วมกับเกษตรกรผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด โดยอ้างอิงจากลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏในภาพถ่าย แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

Class ที่ 1: ก้อนเห็ดปกติ (Normal)
Class ที่ 2: ก้อนเห็ดที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหาย (Warning)
Class ที่ 3: ก้อนเห็ดที่มีความเสียหายรุนแรง (Severe)



รูปที่ 1 การแบ่งประเภทของก้อนเห็ด

ในการเปรียบเทียบโมเดล ได้เลือกใช้ 3 โมเดล ได้แก่ ReXNet-1.0, MobileNetV2 และ ResNet18 โดยใช้ CPU Intel Core i7-10750H 2.60 GHz, RAM 16 GB, ระบบปฏิบัติการ Windows 10 และในการทดลอง ผู้วิจัยใช้ไลบรารี PyTorch 2.6.0 โดยเทรนโมเดลจำนวน 30 epoch ด้วยค่า Learning rate 0.001 และ Batch size 32 โดยมีโครงสร้างขั้นตอนการทำงานของระบบจำแนกสถานะก้อนเห็ดได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างการทำงานของระบบจำแนกสถานะก้อนเห็ด

ส่วนที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมภาพถ่ายก้อนเห็ดถูกจัดเก็บจากสภาพแวดล้อมจริงเพื่อใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับระบบจำแนกสถานะ โดยครอบคลุมสถานะต่าง ๆ ที่สำคัญในการประเมินคุณภาพการเพาะเห็ด

ส่วนที่ 2 ข้อมูลภาพที่ได้จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการฝึกโมเดล โดยปรับขนาดภาพให้เท่ากัน ทำการ Normalize ค่าพิกเซล และแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดฝึกสอน ชุดตรวจสอบ และชุดทดสอบ เพื่อให้การประเมินโมเดลมีประสิทธิภาพอย่างเป็นระบบ

ส่วนที่ 3 ในขั้นตอนนี้ โมเดล ReXNet-1.0 ถูกฝึกด้วยข้อมูลที่ผ่านการเตรียมมาอย่างเหมาะสม พร้อมเปรียบเทียบกับโมเดลมาตรฐานที่นิยมใช้งานในงานด้านภาพ ได้แก่ MobileNetV2 และ ResNet18 เพื่อวัดความแม่นยำ ความเสถียร และเวลาในการประมวลผลของแต่ละโมเดล

ส่วนที่ 4 ระบบจะทำการจำแนกภาพก้อนเห็ดที่รับเข้ามาโดยอัตโนมัติเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ก้อนเห็ดปกติ ก้อนเห็ดที่เริ่มมีปัญหา และก้อนเห็ดที่เสียหาย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้สนับสนุนการตัดสินใจของเกษตรกรในการดูแลและปรับปรุงคุณภาพการเพาะเห็ด

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้ในการจำแนกสถานะของก้อนเห็ดในงานวิจัยนี้ ได้มีการใช้ตัวชี้วัดมาตรฐานที่นิยมในงานด้านการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall และ F1-score โดยมีรายละเอียดของแต่ละตัวชี้วัดดังนี้

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1 - Score = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

โดยที่

TP (True Positive) จำนวนที่จำแนกถูกว่าอยู่ใน Class เป้าหมาย

TN (True Negative) จำนวนที่จำแนกถูกว่าไม่ใช่ Class เป้าหมาย

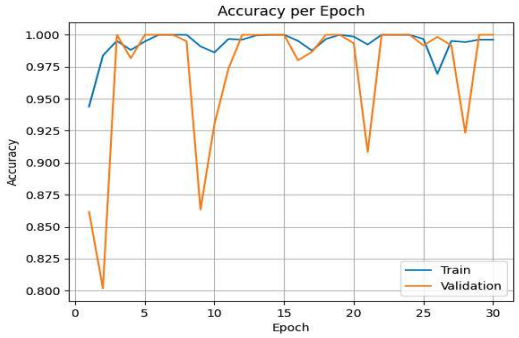
FP (False Positive) จำนวนที่จำแนกผิดว่าเป็น Class เป้าหมาย

FN (False Negative) จำนวนที่จำแนกผิดว่าไม่ใช่ Class เป้าหมาย

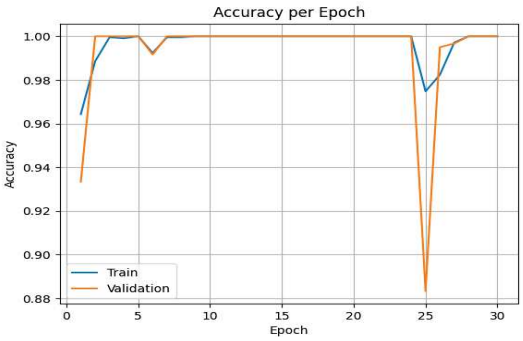
นอกจากนี้ เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลในด้านการนำไปใช้งานจริง ยังได้มีการวัด ค่าเวลาเฉลี่ยในการทำนายต่อภาพ ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$Average\ Inference\ Time = \frac{Total\ Time\ for\ N\ Images}{N} \quad (5)$$

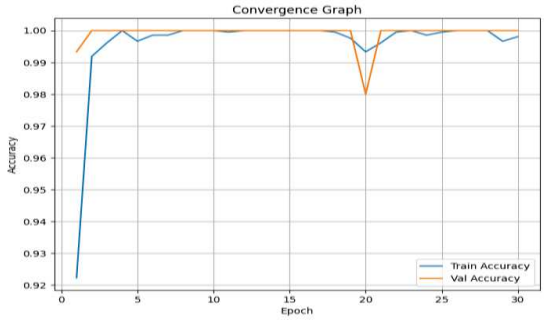
เพื่อประเมินความสามารถในการเรียนรู้ของโมเดลทั้งสามที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ResNet18, MobileNetV2 และ ReXNet-1.0 ได้ทำการบันทึกค่าความแม่นยำของชุดฝึก และชุดตรวจสอบ ในแต่ละรอบการฝึก และแสดงผลในรูปของกราฟความแม่นยำตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3 กราฟความแม่นยำของ ResNet18 ต่อ Epoch



รูปที่ 4 กราฟความแม่นยำของ MobileNetV2 ต่อ Epoch



รูปที่ 5 กราฟความแม่นยำของ ReXNet-1.0 ต่อ Epoch

จากผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 โมเดลสามารถสรุปได้ว่า ReXNet-1.0 มีความเสถียรสูงสุดในการเรียนรู้ ส่วน MobileNetV2 แสดงผลแม่นยำและฟื้นตัวจากความคลาดเคลื่อนได้ดี ในขณะที่ ResNet18 มีความผันผวนและไม่เสถียรในบางช่วงของการฝึกอบรม

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้ในการจำแนกสถานะของก้อนเห็ด งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบโมเดลทั้งสาม ได้แก่ ReXNet-1.0, MobileNetV2 และ ResNet18 โดยใช้ตัวชี้วัดหลัก คือ ค่าความแม่นยำ ค่าเวลาในการทำนายต่อภาพ และจำนวนพารามิเตอร์ของโมเดล ทั้งนี้เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของแต่ละโมเดลในการประยุกต์ใช้ในระบบจริง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น อุปกรณ์ฝังตัวหรือระบบ IoT โดยตารางที่ 1 แสดงผลการเปรียบเทียบในแต่ละตัวชี้วัด ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับการจำแนกสถานะก้อนเห็ด

Models	Accuracy	Inference Time (ms/image)	Parameters
ReXNet-1.0	100%	26.89	4.80 M
MobileNetV2	100%	**16.97**	**2.23 M**
ResNet18	100%	23.71	11.18 M

จากตารางแสดงผลการเปรียบเทียบโมเดลทั้งสาม พบว่าแม้ค่าความแม่นยำของ ReXNet-1.0, MobileNetV2 และ ResNet18 จะอยู่ในระดับ 100% เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านประสิทธิภาพอื่น ๆ พบว่า MobileNetV2 มีความโดดเด่นที่สุด ด้วยขนาดโมเดลที่เล็กที่สุด 2.2 ล้านพารามิเตอร์ และเวลาในการทำนายต่อภาพต่ำที่สุด 16.97 มิลลิวินาที จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น ระบบฝังตัวหรืออุปกรณ์ IoT ในขณะที่ ReXNet-1.0 แสดงความเสถียรของกระบวนการเรียนรู้สูง เหมาะสำหรับงานที่เน้นความแม่นยำระยะยาว ส่วน ResNet18 แม้มีความแม่นยำสูง แต่ขนาดโมเดลใหญ่ และกราฟการเรียนรู้ผันผวน จึงเหมาะกับระบบที่ไม่จำกัดด้านทรัพยากร

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของโมเดล ReXNet-1.0 สำหรับการจำแนกสถานะของก้อนเห็ดที่ทำจากฟางข้าวในกระบวนการเพาะเห็ด โดยจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ก้อนเห็ดปกติ (Normal), ก้อนเห็ดเริ่มมีปัญหา (Warning) และก้อนเห็ดเสียหาย (Severe) พร้อมเปรียบเทียบกับโมเดลพื้นฐานที่ได้รับความนิยม ได้แก่ MobileNetV2 และ ResNet18 จากการทดลองบนชุดข้อมูลภาพถ่ายก้อนเห็ดจำนวน 3,000 ภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็นชุดฝึกสอน 70% ชุดตรวจสอบ 20% และชุดทดสอบ 10% พบว่าโมเดลทั้งสามสามารถจำแนกภาพได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความแม่นยำ เท่ากับ 100% บนชุดข้อมูลทดสอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการประมวลผลและขนาดของโมเดล พบว่า MobileNetV2 มีค่าเวลาในการทำนายต่ำที่สุด เฉลี่ย 16.97 มิลลิวินาทีต่อภาพ และใช้จำนวนพารามิเตอร์น้อยที่สุด 2.2 ล้านพารามิเตอร์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานจริงในระบบที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร เช่น ระบบฝังตัวหรืออุปกรณ์ IoT ในขณะที่ ReXNet-1.0 แสดงความเสถียรในการเรียนรู้สูง ไม่มีอาการ Overfitting และมีกราฟการฝึกที่ราบเรียบสม่ำเสมอ จึงเหมาะกับระบบที่เน้นความแม่นยำระยะยาวหรือการควบคุมคุณภาพในระดับอุตสาหกรรม ส่วน ResNet18 แม้ให้ผลลัพธ์แม่นยำ แต่มีจำนวนพารามิเตอร์มากที่สุด และแสดงความผันผวนระหว่างการฝึก ทำให้เหมาะสำหรับระบบที่ไม่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

ดังนั้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ReXNet-1.0 มีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้จริง โดยเฉพาะในบริบทที่ต้องการความแม่นยำและความเสถียรสูง ขณะที่ MobileNetV2 เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบที่ให้ความสำคัญกับความเร็วและประสิทธิภาพเชิงทรัพยากร

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. P. Mohanty, D. P. Hughes, and M. J. F. i. p. s. Salathé, "Using deep learning for image-based plant disease detection," vol. 7, p. 215232, 2016.

[2] K. P. J. C. Ferentinos and e. i. agriculture, "Deep learning models for plant disease detection and diagnosis," vol. 145, pp. 311-318, 2018.

[3] S. Huang, Q. Liu, Y. Wu, M. Chen, H. Yin, and J. J. A. Zhao, "Edible mushroom greenhouse environment prediction model based on attention cnn-lstm," vol. 14, no. 3, p. 473, 2024.

[4] S. Ahmed, M. B. Hasan, T. Ahmed, M. R. K. Sony, and M. H. J. I. A. Kabir, "Less is more: Lighter and faster deep neural architecture for tomato leaf disease classification," vol. 10, pp. 68868-68884, 2022.

[5] D. Han, S. Yun, B. Heo, and Y. Yoo, "Rethinking channel dimensions for efficient model design," in Proceedings of the IEEE/CVF conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021, pp. 732-741.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาการจดจำท่ามือด้วยถุงมือเซนเซอร์ร่วมกับการโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน 1 มิติ

Development of Hand Gesture Recognition using Gloves Sensor and 1-D Convolutional Neural Network

สมชาย เปาะทองคำ[1*] กมลทิพย์ วัฒกีกำธร[1] และ ธนะกิจ วัฒกีกำธร[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: somchai.po@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์เพื่อจดจำท่ามือซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การจดจำท่ามือ การแปลภาษามือ การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และการควบคุมหุ่นยนต์เป็นต้น โครงสร้างของถุงมือเซนเซอร์ที่พัฒนาใช้เซนเซอร์โค้งงอแบบ 5 ตัว หรือ 5 จุดหมุน ติดตั้งบนถุงมือ ทำการอ่านค่าเซนเซอร์ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano และใช้วิธีการวิเคราะห์การจดจำด้วยโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน 1 มิติ (1D-CNN) ซึ่งผลจากการทดลองสามารถลดทอนขั้นตอนการคำนวณผลในส่วนของการแปลงข้อมูล 2 มิติลงได้ โดยยังคงให้ผลความถูกต้องในการจดจำที่สูงอยู่ ซึ่งผลการทดลองการจดจำท่ามือ 20 ท่า ให้ค่าความถูกต้องในการจดจำท่ามืออยู่ที่ 99.40 %

คำสำคัญ: ถุงมือเซนเซอร์, เซนเซอร์โค้งงอ, ท่ามือ, โครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน 1 มิติ

Abstract

In this research, a sensor glove was developed for hand gestures recognition, which can used for various applications such as gesture recognition, sign language translation, computer interfacing, and robotic control. The glove structure utilizes five flex sensors, representing five degrees of motion, mounted on the glove. Sensor data is read by an Arduino Nano microcontroller board, and gesture recognition is performed using a one-dimensional convolutional neural network (1 D-CNN). The experimental results demonstrate that this approach reduces the complexity of processing two-dimensional data while maintaining high recognition accuracy. In tests involving the recognition of 20 hand gestures, the system achieved an accuracy rate of 99.40 %.

Keywords: sensor glove, flex sensor, hand gesture, one-dimensional convolutional neural network

1. บทนำ

ถุงมือเซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human Interface Device: HMI) ถูกนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์อินพุตสำหรับรับข้อมูลการเคลื่อนไหวและการเปลี่ยนแปลงท่ามือ ถูกนำมาใช้กับการจดจำท่ามือ [1-4] ภาษามือ [5] การควบคุมกราฟฟิกในคอมพิวเตอร์ การควบคุมยานบังคับ การควบคุมหุ่นยนต์ และทางการแพทย์ [3] ดังนั้นถุงมือเซนเซอร์ถูกนำมาใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์อ่านข้อมูลจากนิ้วมือ และมีการพัฒนาออกแบบเซนเซอร์ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่ถูกนำมาพัฒนาเป็นถุงมือเซนเซอร์มากที่สุดคือเซนเซอร์แบบโค้งงอ (Bend sensor, Flex sensor) [1-5] และข้อมูลที่อ่านได้ถูกนำมาใช้การทำการประมวลผลด้วยวิธีประมวลผลสัญญาณที่หลากหลาย แต่เนื่องด้วยปัจจุบันวิธีทางปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย ในงานนี้จึงได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์สำหรับการจดจำท่ามือชนิด 5 นิ้วมือ อ่านสัญญาณด้วยบอร์ด Arduino Nano และประมวลผลสัญญาณด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด 1 มิติ เพื่อให้ระบบสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและยังมีประสิทธิภาพ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่พัฒนา

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2020 [1] ได้จำลองการใช้เซนเซอร์แบบโค้งงอชนิด 5 นิ้วมือ 5 จุดหมุนร่วมกับ Arduino UNO อ่านข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์และส่งข้อมูลที่อ่านได้แบบไร้สายผ่าน Bluetooth แต่อย่างไรก็ตามงานนี้ไม่ได้นำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูล ในปี 2020 [2] ได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์ชนิด 2 นิ้วมือ 2 จุดหมุน ใช้เซนเซอร์แบบโค้งงอเป็นตัววัดการงอนิ้วและใช้ Arduino UNO สำหรับเก็บข้อมูล ในส่วนของการวิเคราะห์ใช้การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) ทดสอบกับท่ามือ 4 ท่า ได้ความ

ถูกต้องอยู่ที่ 88.32 % ในปี 2021 [5] ได้ทำการสร้างถุงมือเซนเซอร์ชนิด 5 นิ้วมือ 6 จุดหมุน จากเซนเซอร์ยืดหยุ่นจากเส้นไนล่อนเคลือบเงิน (Silver-coated Nylon) และใช้ Arduino Micro ในการอ่านค่าข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์และแปลงเป็นภาพขนาด 6 × 6 จากนั้นใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันในการวิเคราะห์การจดจำ ทำการวิเคราะห์การจดจำ ทดสอบกับท่ามือ 10 ท่าได้ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 94.17 % จากนั้นในปี 2021 [3] ได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์ชนิด ชนิด 5 นิ้วมือ 16 จุดหมุนร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano อ่านข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ จากนั้นแปลงข้อมูลเป็นภาพด้วยวิธี Nearest interpolation ขนาด 227 × 227 พิกเซล และใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันชนิด AlexNet ทำการวิเคราะห์การจดจำ ทดสอบกับท่ามือ 20 ท่าได้ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 99.70 % และในปี [2024] [4] ได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์ชนิด 5 นิ้วมือ 16 จุดหมุนร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano อ่านข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ จากนั้นแปลงข้อมูลเป็นภาพขนาด 227 × 227 พิกเซล ด้วยวิธี Gramian Angular Fields และใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน 8 โมเดล ทดสอบกับท่ามือ 20 ท่าพบว่าโมเดล Resnet 101 ให้ความถูกต้องสูงสุดอยู่ที่ 99.72 % อย่าไรก็ตามในงาน [1] ไม่ได้ทำการทดลองการจดจำท่ามือ ส่วนในงาน [2] ใช้เซนเซอร์น้อยเกินไปจึงไม่คลอบคลุมท่ามือที่ต้องแสดงกิริยาทั้ง 5 นิ้ว ส่วนงาน [3-4] มีการแปลงภาพขนาดใหญ่ด้วยวิธี Nearest interpolation และ Gramian Angular Fields จึงเสียเวลาในการคำนวณ และในงาน [5] ได้ลดมิติข้อมูลลงมากจึงส่งผลต่อค่าความถูกต้อง ดังนั้นในงานนี้จึงได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์ชนิด 5 นิ้วมือ 5 จุดหมุนร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano อ่านข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์และใช้การวิเคราะห์การจดจำด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบ 1D-CNN ในการประมวลผล

2.2 งานวิจัยที่พัฒนา

โครงสร้างการทำงานของถุงมือเซนเซอร์ที่พัฒนาแสดงดังรูปที่ 1 ถุงมือเซนเซอร์ประกอบด้วยเซนเซอร์แบบโค้งงอ 5 ตัวติดไว้ในแต่ละนิ้ว เซนเซอร์แต่ละตัวถูกไบอัสด้วยความต้านทานค่า 10 kΩ และใช้บอร์ด Arduino Nano อ่านข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ส่งเข้าเก็บเป็นชุดข้อมูล (Dataset) ของการทดลอง

แผนผังการทำงานของเซนเซอร์ถุงมือประกอบด้วย

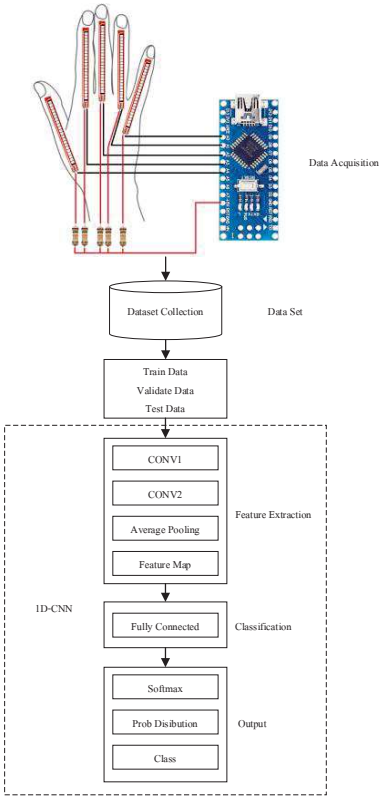
1) ถุงมือที่มีเซนเซอร์โค้งงอ 5 ตัว สำหรับสวมใส่มือและแสดงท่าทางมือท่าต่างๆ

2) บอร์ด Arduino Nano สำหรับแปลงค่าแรงดันตกคร่อมเซนเซอร์แปลงเป็นข้อมูลดิจิตอลส่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์

3) รวบรวมสัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์เข้าไปเก็บเป็นชุดข้อมูล

4) ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ชุดข้อมูลย่อยประกอบด้วย Train Data สำหรับใช้ Training ให้โครงข่าย Validate Data สำหรับ Validate โครงข่ายที่ฝึกอบรม และ Test Data สำหรับทดสอบ

5) โครงข่ายประสาทเทียม 1D-CNN สำหรับทำ Feature Extraction และ Classification ในงานนี้เลือกใช้ 1D-CNN เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์เป็นข้อมูลชนิด Timeseries มีขนาด 1 มิติ จำนวน 5 ชุดข้อมูลต่อ 1 ครั้ง ดังนั้นการใช้ 1D-CNN ย่อมดีกว่า 2D-CNN เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนรูปแบบข้อมูล



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบถุงมือเซนเซอร์

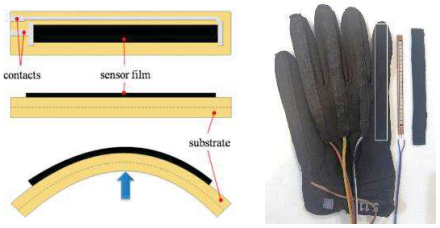
3. อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และวิธีการที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยเซนเซอร์โค้งงอ ถุงมือเซนเซอร์ วงจรอ่านค่า และท่ามือที่ใช้ในการทดลอง

3.1 เซนเซอร์โค้งงอ

เซนเซอร์โค้งงอแบบยืดหยุ่นแสดงในรูปที่ 2 (ก) มีโครงสร้างเป็นผงหมึกนำไฟฟ้าพิมพ์ลงบนแผ่นฉนวนไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นได้ การผลิตด้วยการพิมพ์นี้ทำให้ผงหมึกจับตัวกันอย่างหลวมๆ เมื่อแผ่นเซนเซอร์อยู่

ในสภาวะแบนราบ ค่าความต้านทานที่ปลายทั้งสองด้านจะอยู่ที่ประมาณ 10 kΩ และเมื่อเซนเซอร์มีการโค้งงอ ผงหมึกมีการคลายตัว ค่าความต้านทานของเซนเซอร์จึงเปลี่ยนแปลงไปตามมุมการเบี่ยงเบน



(ก) (ข)

รูปที่ 2 (ก) เซนเซอร์โค้งงอ [3], (ข) การประกอบถุงมือเซนเซอร์

3.2 ถุงมือเซนเซอร์

การประกอบถุงมือเซนเซอร์แสดงดังรูปที่ 2 (ข) ในงานนี้ใช้ถุงมือผ้าและยึดเซนเซอร์โค้งงอด้วยแผ่นผ้าใช้การเย็บติดเพื่อให้เกิดความคงทนและต่อสายสัญญาณไปยังวงจรอ่านค่าเซนเซอร์ต่อไป

3.3 วงจรอ่านค่าเซนเซอร์

วงจรสำหรับการอ่านค่าของถุงมือเซนเซอร์ ซึ่งเป็นการอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันขาออกจากเซนเซอร์โค้งงอแต่ละตัว จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกแปลงค่าเป็นตัวเลขโดยใช้ตัวแปลง Analog to Digital (A/D) ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano และสัญญาณที่ได้ถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อไว้สำหรับขั้นตอนถัดไป

3.4 ท่ามือที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดลองนี้ใช้ท่ามือจำนวน 20 ท่า [3] แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ท่ามือที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับที่	ชื่อท่ามือ	ลำดับที่	ชื่อท่ามือ
1	Large Diameter	11	Tip Pinch
2	Medium Wrap	12	Power Sphere
3	Small Diameter	13	Power Disk
4	Fixed Hook	14	Precision Disk
5	Index Finger Extension	15	Tripod
6	Thump Index Finger	16	Lateral Tripod
7	Thump 2 Finger	17	Parallel Extension
8	Thump 3 Finger	18	Extension Type
9	Thump 4 Finger	19	Literal Pinch
10	Writing Tripod	20	Ring

ซึ่งท่าเหล่านี้เป็นท่ามือที่เกิดขึ้นเมื่อทำการจับวัตถุที่มีลักษณะแตกต่างกัน ในการทดลองได้ทำการจำลองท่ามือ 20 ท่า ท่าละ 100 ครั้ง ดังนั้นจะได้ชุดข้อมูล ที่มีข้อมูลทั้งหมด 2000 ข้อมูล เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลในการทดสอบการทำงานของส่วนโปรแกรมการจดจำ

3.5 โครงข่ายประสาทแบบ 1D-CNN

โครงข่ายประสาทแบบ 1D-CNN ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้กับสัญญาณที่มีลักษณะ 1 มิติ โดยไม่ต้องทำการแปลงสัญญาณ สถาปัตยกรรมของแบบจำลอง 1D-CNN ที่ใช้ประกอบด้วยชั้นทั้งหมด 11 ชั้น มีชั้นแรกเป็นชั้นอินพุตแบบ Sequence จำนวน 5 dimension, ชั้นคอนโวลูชัน 1 มิติ สองชั้น, ชั้น activation ด้วยฟังก์ชัน ReLu 2 ชั้น, ชั้น นอร์มอลไลซ์ 2 ชั้น, ชั้นดึงข้อมูล แบบ Average Pooling 1 ชั้น, และ 3 ชั้นสุดท้ายเป็นส่วนของ Fully Connected และ Softmax สำหรับทำนายผลเอาต์พุต ลำดับชั้นทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทแบบ 1D-CNN

No. of Layer	Function
1	Sequence Input 5 dimensions
2	1-D Convolution
3	ReLU
4	Layer Normalization
5	1-D Convolution
6	ReLU
7	Layer Normalization
8	1-D Global Average Pooling
9	Fully Connected
10	Softmax
11	Classification Output

ในการทดสอบจากชุดข้อมูลทั้งหมด 2000 ข้อมูล ถูกแบ่งเป็นข้อมูล Training Set 50 % และข้อมูล Test Set 50 % ใช้ข้อมูลที่มีความยาว 500 sampling ทั้ง 5 ช่องสัญญาณ ใช้โปรแกรม MATLAB เครื่องคอมพิวเตอร์ Laptop ยี่ห้อ ASUS รุ่น A570Z และ GPU NVIDIA GeForce GTX1050 ในการคำนวณ

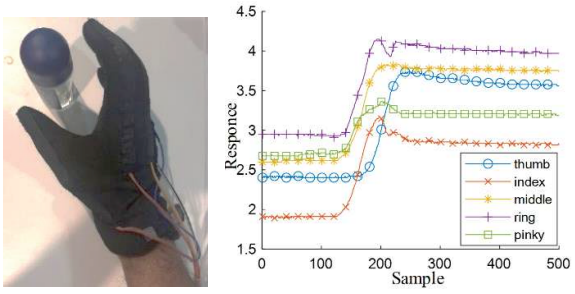
4. ผลการทดลอง

ในส่วนของผลการทดลองได้นำเสนอผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนของผลการอ่านค่าเซนเซอร์ และ ผลของการทดสอบการจดจำท่ามือผลในการทดลองแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลของการอ่านค่าสัญญาณ

ผลของการอ่านค่าสัญญาณ ได้จากการใช้ท่ามือในการจับวัตถุในการจับวัตถุแต่ละครั้งใช้เวลาในการบันทึก 10 วินาที และอัตราการสุ่มที่ 50 จุดต่อวินาที ดังนั้นในแต่ละช่องสัญญาณจะประกอบไปด้วยเวกเตอร์ข้อมูลจำนวน 500 ข้อมูล ตัวอย่างท่ามือที่ใช้ในการจับวัตถุแสดงดังรูปที่ 3 (ก) ซึ่งเป็นท่า Medium Wrap และผลของสัญญาณในท่ามือจับ

นี้แสดงดังรูปที่ 3 (ข) ลักษณะของสัญญาณคือตั้งแต่ข้อมูลที่ประมาณ Sampling 1-100 เป็นลักษณะของสัญญาณขณะแบบมือก่อนจับวัตถุ ข้อมูลที่ประมาณ Sampling 101-250 เป็นลักษณะของสัญญาณขณะมือกำลังเงื้อมเข้ากำวัตถุ และสัญญาณประมาณ Sampling 251-500 คือขณะกำวัตถุอยู่ในมือ

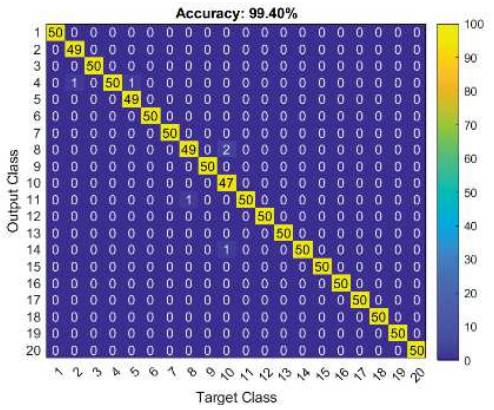


(ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) ท่าจับวัตถุ Medium Wrap, (ข) สัญญาณที่ได้จากท่าจับวัตถุ Medium Wrap

4.2 ผลของการจดจำ

รูปที่ 4 แสดงผลจากการทดสอบการจดจำท่ามือของถุงมือเซนเซอร์จากการทดลองจับวัตถุซึ่งทำให้เกิดท่ามือจับจำนวน 20 ท่ามือ เมื่อใช้วิธีการโครงข่ายประสาทแบบ 1D-CNN ที่นำเสนอทำให้สามารถลดขั้นตอนการแปลงข้อมูลไปเป็นภาพลง จึงสามารถลดขั้นตอนในการคำนวณลงได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าประสิทธิภาพในการจดจำท่ามือยังสูงใกล้เคียงกับวิธีการอื่น [2-5] โดยค่าความถูกต้องในการจดจำท่ามืออยู่ที่ 99.40 % อย่างไรก็ดีท่ามือที่มีความผิดพลาดสูงสุดคือท่ามือลำดับที่ 10 Writing Tripod ซึ่งทำนายผลเป็นท่ามือลำดับที่ 8 Thump 3 Finger เนื่องจากท่ามือ 2 ท่านี้มีลักษณะคล้ายกัน



รูปที่ 4 ความถูกต้องของการจดจำท่ามือ

5. สรุป

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาถุงมือเซนเซอร์เพื่อจดจำท่ามือ ซึ่งเป็นพื้นฐานของการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น การจดจำท่ามือ การแปลภาษามือ การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และการควบคุมหุ่นยนต์เป็นต้น โครงสร้างของถุงมือเซนเซอร์ที่พัฒนาเป็นแบบใช้เซนเซอร์โค้งงอจำนวน 5 ตัว ติดตั้งบนถุงมือตำแหน่งด้านบนนิ้วมือ อ่านค่าด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano และใช้วิธีการวิเคราะห์การจดจำด้วยโครงข่ายประสาทแบบ 1D-CNN ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการคำนวณผลในส่วนการแปลงข้อมูล 1 มิติไปเป็นข้อมูล 2 มิติลงได้ โดยที่ยังคงให้ผลความถูกต้องในการจดจำในเกณฑ์ที่สูงอยู่ โดยในการทดลองนี้ให้ค่าความถูกต้องในการจดจำท่ามือ 20 ท่า อยู่ที่ 99.40 %

6. งานในอนาคต

เนื่องจากงานนี้ยังไม่สามารถวิเคราะห์ผลในเวลาจริง (Real time) ได้ สำหรับงานในอนาคตทางผู้ศึกษาได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้การทำนายผลท่ามือสามารถทำนายผลได้ทันที่ขณะใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Telluri, S. Manam, S. Somarouthu, J. M. Oli and C. Ramesh, "Low cost flex powered gesture detection system and its applications," 2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India, 2020, pp. 1128-1131.

[2] A. K. Panda, R. Chakravarty and S. Moulik, "Hand Gesture Recognition using Flex Sensor and Machine Learning Algorithms," 2020 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), Langkawi Island, Malaysia, 2021, pp. 449-453.

[3] ชนะ จันทร์ศรี และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร. (2021). การพัฒนาการจดจำท่ามือด้วยถุงมือเซนเซอร์แบบ 16 จุดหมุนอิสระร่วมกับการโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์* มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 28 (3), 43-56.

[4] C. Chansri and J. Srinonchat, "Utilizing Gramian Angular Fields and Convolution Neural Networks in Flex Sensors Glove for Human–Computer Interaction," in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 54, no. 4, pp. 475-483, 2024.

[5] S. Lee, Y. Choi, M. Sung, J. Bae, Y. Choi, "A Knitted Sensing Glove for Human Hand Postures Pattern Recognition," Sensors , vol. 2021, no. 21, pp. 1-15, Art no. 1364, 2021.

Control Systems and Instrumentation

(CT)

ระบบควบคุมและการวัด

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การควบคุมระดับของเหลวสองถังด้วยการค้นหาแบบค้างคาวบนพื้นฐานตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน

Two Tanks Liquid Level Control by Bat Search Based on Fractional Order PID Controller

ดนุพล คำปัญญา[1*] ชาญณรงค์ อ่างทอง[1] และ สัตถาภูมิ ไทยพานิช[2]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
[2]สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: danupon.k@rmutsb.ac.th[*]

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนด้วยการค้นหาแบบค้างคาวสำหรับระบบควบคุมระดับของเหลวสองถัง การค้นหาแบบค้างคาวเป็นหนึ่งในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพ การค้นหาแบบค้างคาวอยู่บนพื้นฐานของพฤติกรรมการสะท้อนตำแหน่งของค้างคาวขนาดเล็กโดยมีการปล่อยพัลส์และความดังที่แตกต่างกัน ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุตของระบบถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้น้อยที่สุด ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนที่ได้รับจากการค้นหาแบบค้างคาวจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้รับจากตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม ผลที่ได้รับพบว่าการค้นหาแบบค้างคาวสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วนได้อย่างเหมาะสมให้ผลตอบสนองน่าพึงพอใจมากกว่าตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม

คำสำคัญ: ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน, การค้นหาแบบค้างคาว, การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก

Abstract

The aim of this paper is to design the fractional order PID (FOPID) controller by the bat search (BS) for two tanks liquid level control system, one of the efficient metaheuristic optimization searches. The BS is based on the echolocation behaviour of micro bats with varying pulse emission and loudness. The sum squared errors between reference input signal and output signal is performed to minimize the objective function. Parameters of the FOPID controller obtained by the BS will be compared to those obtained by the integer order PID (IOPID) controller. As the results, it was found that the BS can provide optimal parameters of the FOPID controller giving more satisfactory response more than the IOPID controller.

Keywords: fractional order PID (FOPID) controller, bat search (BS), metaheuristic optimization searches

1. บทนำ

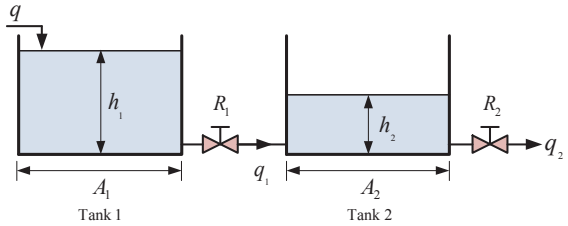
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ตัวควบคุมพีไอดีอันดับเชิงเศษส่วน (Fractional Order PID Controller หรือ FOPID) ได้รับการนำเสนอโดย Podlubny ในปี ค.ศ. 1994 [1] ที่อยู่บนพื้นฐานของแคลคูลัสเชิงเศษส่วน (Fractional Calculus) ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์จำนวน 5 ตัว คือ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) λ เป็นอันดับเชิงปริพันธ์ (Integral Order) และ μ เป็นอันดับเชิงอนุพันธ์ (Derivative Order) โดยที่ λ และ μ มีค่าไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็ม (Integer Order PID Controller หรือ IOPID) ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์จำนวน 3 ตัว คือ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงปริพันธ์ (Integral Gain) และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative Gain) จึงทำให้ตัวควบคุม FOPID มีประสิทธิภาพในการควบคุมเหนือกว่าตัวควบคุม IOPID จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวควบคุม FOPID ได้ถูกนำไปใช้กับการควบคุมที่หลากหลาย อาทิเช่น การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และการควบคุมพลานต์ (Plant) ชนิดอื่นๆ เป็นต้น

มากกว่าสองทศวรรษ การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Optimization Search) [2] ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายกับปัญหาทางวิศวกรรมในโลกแห่งความจริง เมตาฮิวริสติกที่ทรงพลังจำนวนมากได้รับการนำเสนออย่างต่อเนื่อง หนึ่งในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพมาก ก็คือ การค้นหาแบบค้างคาว (Bat Search หรือ BS) ได้รับการนำเสนอเมื่อปี ค.ศ. 2010 โดย Yang [3] โดยได้แนวคิดจากพฤติกรรมการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว (Sonar) เพื่อใช้ในการนำทางและค้นหาอาหารในที่มืด (Echolocation) BS อยู่บนพื้นฐานจากพฤติกรรมการสะท้อนตำแหน่งของค้างคาวขนาดเล็กโดยมีการปล่อยพัลส์และความดังที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ผ่านมา BS ประสบผลสำเร็จในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมหลายอย่าง เช่น การออกแบบคานเชื่อมประกอบ (Welded Beam Design) การออกแบบภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel Design) และการออกแบบสปริง (Spring Design)

บทความนี้ จึงนำเสนอการออกแบบ FOPID ด้วย BS สำหรับระบบควบคุมระดับของเหลวสองถัง ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum Squared Error หรือ SSE) หาได้จากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง (Reference Input Signal) กับสัญญาณเอาต์พุต (Output Signal) ของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function หรือ F) ให้น้อยที่สุด จากผลที่ได้รับจากตัวควบคุม FOPID ถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากตัวควบคุม IOPID ของระบบควบคุมระดับของเหลวสองถังที่เป็นอันดับเชิงเศษส่วนและอันดับจำนวนเต็ม [4]

2. พลานต์ระดับของเหลวสองถัง

พิจารณาจากพลานต์ที่ประกอบด้วยถังบรรจุของเหลวสองถัง ดังรูปที่ 1 เมื่อ q คือ การไหลเชิงปริมาตรเข้าสู่ถัง 1 (cm^3/sec), q_1 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถัง 1 ไปยังถัง 2 (cm^3/sec), q_2 คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถัง 2 (cm^3/sec), h_1, h_2 คือความสูงระดับของเหลว (cm), A_1, A_2 คือพื้นที่หน้าตัดของถังที่มีขนาดเท่ากัน (cm^2) และ R_1, R_2 คือค่าความต้านทานการไหล (cm^2/sec)



รูปที่ 1 แผนภาพของถังบรรจุของเหลวสองถัง

สำหรับถัง 1 เมื่อ q ไหลเข้าสู่ถัง 1 ความจุ A_1 และ q_1 ไหลออกจากถัง ในระหว่างช่วงเวลา dt จะมีค่าเท่ากับระดับ h_1 แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \tag{1}$$

อัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถัง 1 ไปยังถัง 2 คือ

$$q_1 = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \tag{2}$$

แทนสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (1) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q - \frac{h_1 - h_2}{R_1} \tag{3}$$

$$R_1 A_1 \frac{dh_1}{dt} = R_1 q - h_1 + h_2 \tag{4}$$

การแปลงลาปลาซของสมการที่ (4) สามารถเขียนได้เป็น

$$R_1 A_1 s h_1(s) + h_1(s) - h_2(s) = R_1 q(s) \tag{5}$$

หรือ

$$q(s) = \frac{h_1(s)(R_1 A_1 s + 1) - h_2(s)}{R_1} \tag{6}$$

สำหรับถัง 2 เมื่อ q_1 ไหลเข้าสู่ถัง 2 ความจุ A_2 และ q_2 ไหลออกจากถัง ในระหว่างช่วงเวลา dt จะมีค่าเท่ากับระดับ h_2 แสดงได้ดังสมการที่ (7)

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \tag{7}$$

อัตราการไหลเชิงปริมาตรจากถัง 2 คือ

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2} \tag{8}$$

แทนสมการที่ (2) และ (8) ลงในสมการที่ (7) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} - \frac{h_2}{R_2} \tag{9}$$

$$R_2 A_2 \frac{dh_2}{dt} + \frac{R_2}{R_1} h_2 + h_2 = \frac{R_2}{R_1} h_1 \tag{10}$$

การแปลงลาปลาซของสมการที่ (10) สามารถเขียนได้เป็น

$$R_2 A_2 s h_2(s) + \frac{R_2}{R_1} h_2(s) + h_2(s) = \frac{R_2}{R_1} h_1(s) \tag{11}$$

หรือ

$$h_2(s) = \frac{R_2 h_1(s)}{(R_1 R_2 A_2 s + R_2 + R_1)} \tag{12}$$

แทนสมการที่ (12) ลงในสมการที่ (6) สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$q(s) = \frac{h_1(s)}{R_1}\left\{(R_1 A_1 s + 1) - \frac{R_2}{(R_1 R_2 A_2 s + R_2 + R_1)}\right\} \tag{13}$$

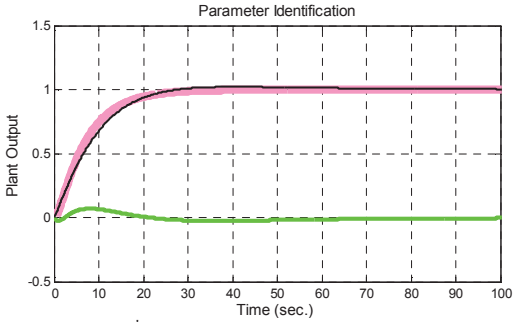
จากสมการที่ (12) กับสมการที่ (13) พลานต์อันดับจำนวนเต็มระดับของเหลวสองถังในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$\frac{h_2(s)}{q(s)} = \frac{R_2}{(R_1 R_2 A_1 A_2 s^2 + (R_2 A_1 + R_1 A_1 + R_2 A_2)s + 1)} \tag{14}$$

จากสมการที่ (14) เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ของระบบระดับของเหลวสองถัง [4] $A_1, A_2 = 250\ \text{cm}^2$, $R_1, R_2 = 0.01\ \text{cm}^2/\text{sec}$, $h_1 = 30\ \text{cm}$ และ $h_2 = 15\ \text{cm}$ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานต์อันดับจำนวนเต็ม $G_p(s)$ แสดงได้ดังสมการที่ (15)

$$G_p(s)\big|_{IO} = \frac{0.01}{6.25s^2 + 7.5s + 1} \tag{15}$$

จากสมการที่ (15) สามารถดัดแปรพลานต์อันดับจำนวนเต็มให้เป็นพลานต์อันดับเชิงเศษส่วนจากการระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ (Parameter Identification) [5] ด้วย BS แสดงดังรูปที่ 2 และสมการที่ (16)



รูปที่ 2 การระบุเอกลักษณ์ค่าพารามิเตอร์ด้วย BS

$$G_p(s)\big|_{FO} = \frac{0.0099616}{0.054542s^{1.9709} + 11.079s^{1.0943} + 1} \tag{16}$$

3. การค้นหาแบบค้างคาว

การค้นหาแบบค้างคาว [3] ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการส่งคลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว เพื่อใช้ในการนำทางและค้นหาอาหารในที่มืด ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของพฤติกรรมการสะท้อนตำแหน่งของค้างคาวขนาดเล็ก โดยมีการส่งพัลส์และความดังที่มีค่าแตกต่างกัน การค้นหาแบบค้างคาวจะอาศัยกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ดังต่อไปนี้ คือ

1) ค้างคาวเคลื่อนที่ขณะบินเข้าหาแหล่งอาหาร (เหยื่อ) ตามเสียงสะท้อนที่ถูกส่งออกมาด้วยคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงอย่างเป็นจังหวะและสม่ำเสมอกัน

2) ค้างคาวบินแบบสุ่มด้วยความเร็ว v_i ที่ตำแหน่ง x_i ด้วยความถี่คงที่ $f_{\min}$ โดยเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น λ และความดังของเสียง A_0 เพื่อค้นหาอาหาร (เหยื่อ) และสามารถปรับความยาวคลื่น (หรือความถี่) ของพัลส์ที่ส่งออกมาโดยอัตโนมัติและปรับอัตราการส่งพัลส์ (Pulse Emission หรือ r) โดยที่ $r \in [0,1]$ จะขึ้นอยู่กับระยะห่างของเป้าหมาย

3) ความดังของเสียงสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ ความดังของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากความดังของเสียงสูงที่สุด A_0 ไปยังค่าคงที่ต่ำที่สุด $A_{\min}$ นั่นคือ ความดังจะลดเรื่อยๆ เมื่อค้างคาวเข้าใกล้อาหาร (เหยื่อ) เพิ่มมากขึ้น

จากกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ สามารถเขียนเป็นอัลกอริทึมของ BS ได้ด้วยรหัสลำลอง (Pseudo Codes) แสดงอัลกอริทึมของ BS ได้ดังรูปที่ 3

Initialized :
- Objective function $f(x), x = (x_1, \ldots, x_d)^T$
- Initialize the bat population $x_i = (i = 1, 2, \ldots, n)$and v_i
- Define pulse frequency f_i at x_i
- Initialize pulse rate r_i and the loudness A_i

while $(t < Max\_Gen)$ or (Termination Criteria: TC)
- Generate new solutions by adjusting frequency
- Update velocities and locations /solutions by using (17) - (19)

  if $(rand > r_i)$
  - Select as solution among the best solutions
  - Generate a local solution around the selected best solution

  else if
  - Generate a new solution by flying randomly

  if $(rand < A_i \,\&\, f(x_i) < f(x_*))$
  - Accept the new solutions
  - Increase r_i and reduce A_i

  end if
- Rank the bats and find the current best x_*

End while
Report the best solution found

รูปที่ 3 รหัสลำลองแสดงอัลกอริทึมของ BS [3]

ค้างคาวแต่ละตัวมีความสัมพันธ์กับความเร็ว v_i^t และตำแหน่ง x_i^t ที่รอบการทำซ้ำ t ในปริภูมิการค้นหา d มิติ ในจำนวนค้างคาวทั้งหมด x_* คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดในรอบปัจจุบัน ดังนั้น จากกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ข้างต้น สามารถทำการปรับปรุงตำแหน่ง x_i^t และความเร็ว v_i^t ใหม่โดยอาศัยสมการที่ (17) ถึงสมการที่ (19) ตามลำดับ

$$f_i = f_{\min} + \beta(f_{\max} - f_{\min}) \tag{17}$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + f_i(x_i^{t-1} - x_*) \tag{18}$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \tag{19}$$

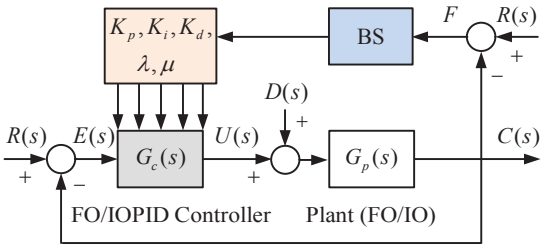
เมื่อ $\beta \in [0,1]$ คือเวกเตอร์การสุ่มจากการแจกแจงแบบปกติ (Uniform Distribution) ในค้างคาวแต่ละตัวจะถูกกำหนดความถี่แบบสุ่ม ซึ่งมาจากการสุ่ม $[f_{\min}, f_{\max}]$ อย่างสม่ำเสมอ ที่ระยะเวลาของการทำซ้ำความดัง A_i และอัตราพัลส์ r_i จะถูกปรับตามสมการที่ (20) เพื่อสร้างความสมดุลการสำรวจและการแสวงหาประโยชน์ สำหรับ $0 < \alpha < 1$ และ $\gamma > 0$ พบว่า ความดัง $(A_i^t \to 0)$ และอัตราพัลส์ $(r_i^t \to r_i^0)$ เมื่อ $(t \to \infty)$ โดย Yang กำหนดให้ค่าของ $\alpha = \gamma \in [0.9, 0.98]$ [3]

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t,\ r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{(-\gamma t)}) \tag{20}$$

ในเริ่มต้น ผู้ใช้งานจะสามารถปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของ BS ตามคำแนะนำของ Yang [3] เบื้องต้นกำหนดให้จำนวนของค้างคาว $n = 30$ ตัว ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังของเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราการส่งพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$ ตามลำดับ

4. การปรับแต่งตัวควบคุม FO/IOPID ด้วย BS

การปรับแต่งตัวควบคุม FO/IOPID อย่างเหมาะสมด้วย BS สำหรับพลานต์ที่เป็นอันดับเชิงเศษส่วน (FO) และอันดับจำนวนเต็ม (IO) แสดงได้ดังรูปที่ 4 ค่าความผิดพลาดกำลังสอง (SSE) ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ และสัญญาณเอาต์พุต $C(s)$ ของระบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F โดยที่ F ถูกป้อนให้อัลกอริทึมของ BS ให้น้อยที่สุด ดังสมการที่ (21) ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FO/IOPID อย่างเหมาะสม โดยที่ M_p คือค่าเกินพิกัดสูงสุด (Maximum Overshoot) และ e_{ss} คือค่าคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว (Steady State Error)



รูปที่ 4 การปรับแต่งตัวควบคุม FO/IOPID อย่างเหมาะสมด้วย BS

$$\textbf{Minimize} \quad \boldsymbol{F}(K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu) = \sum_{i=1}^{N} [r(i) - c(i)]^2 \tag{21}$$

$$\textit{subject to} \quad M_p \le 10\%, e_{ss} \le 0.1\%,$$

$$\left.\begin{aligned} 0 \le K_p \le 500, \\ 0 \le K_i \le 100, \\ 0 \le K_d \le 100, \end{aligned}\right\} \text{IOPID}$$

$$\left.\begin{aligned} 0 \le \lambda \le 1.0,\ 0 \le \mu \le 1.0 \end{aligned}\right\} \text{FOPID}$$

5. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของ BS ตามคำแนะนำของ Yang [3] โดยให้จำนวนรอบสูงสุด (*Max_Gen*) = 1000 เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) การค้นหาทั้งหมด 40 ครั้ง ภายใต้ขอบเขตที่กำหนดในสมการที่ (21) หลังจากยุติการค้นหาด้วย BS จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID และ IOPID สำหรับพลานต์ FO และ IO ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ผลตอบสนองของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 3 ในขณะที่ ผลตอบสนองของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ IO ดังรูปที่ 6 และตารางที่ 4 โดยที่ t_r คือช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) t_s คือช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) M_d คือค่าขนาดสูงสุดของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากการรบกวน (Maximum Disturbance) และ t_d คือช่วงเวลากำจัดสัญญาณรบกวน (Disturbance Rejection) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO

Control Structures	Parameters				
	λ	μ	K_p	K_i	K_d
IOPID	–	–	267.7124	82.9643	15.3384
FOPID	0.9354	0.4971	275.4129	68.5978	77.9308

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ IO

Control Structures	Parameters				
	λ	μ	K_p	K_i	K_d
IOPID	–	–	284.1209	54.8195	78.4875
FOPID	0.9906	0.4014	286.9387	55.9641	80.3036

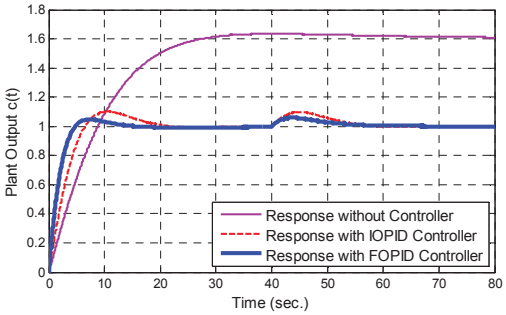
ตารางที่ 3 สมรรถนะของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO

Control Structures	System Responses						
	Command Tracking				Disturbance Rejection		
	t_r(sec.)	M_p(%)	t_s(sec.)	e_{ss}(%)	t_d(sec.)	M_d(%)	e_{ss}(%)
IOPID	6.5261	10.00	18.5882	0.00	17.2775	9.75	0.00
FOPID	4.7985	4.64	11.5235	0.00	11.7150	5.94	0.00

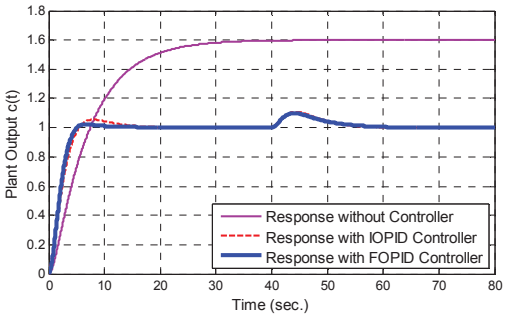
ตารางที่ 4 สมรรถนะของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ IO

Control Structures	System Responses						
	Command Tracking				Disturbance Rejection		
	t_r(sec.)	M_p(%)	t_s(sec.)	e_{ss}(%)	t_d(sec.)	M_d(%)	e_{ss}(%)
IOPID	5.4561	5.45	13.6755	0.00	14.0305	10.75	0.00
FOPID	5.1505	2.32	8.0716	0.00	13.3525	9.92	0.00

จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พบว่า การปรับแต่งด้วย BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO และ IO ได้อย่างเหมาะสม สมรรถนะของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO และ IO ในตารางที่ 3 กับรูปที่ 5 และในตารางที่ 4 กับรูปที่ 6 พบว่า ระบบควบคุม FOPID มีช่วงเวลาขึ้น t_r มีค่าเกินพิกัดสูงสุด M_p มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s มีค่าเกินพิกัดสูงสุดเนื่องจากสัญญาณรบกวน M_d และมีช่วงเวลากำจัดสัญญาณรบกวน t_d น้อยกว่าระบบควบคุม IOPID โดยไม่มีค่าคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว e_{ss} นั่นคือ ตัวควบคุม FOPID สามารถควบคุมพลานต์ FO และ IO ให้ผลตอบสนองน่าพึงพอใจมากกว่าตัวควบคุม IOPID อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ FO



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของระบบควบคุม FO/IOPID สำหรับพลานต์ IO

6. สรุป

บทความนี้นำเสนอการควบคุมระดับของเหลวสองถังด้วย BS บนพื้นฐานตัวควบคุม FOPID ตัวควบคุม FOPID ถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม IOPID ที่ถูกปรับแต่งในเงื่อนไขเดียวกัน ผลที่ได้รับ พบว่า BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ให้ผลตอบสนองอย่างเหมาะสมเป็นที่น่าพอใจมากกว่าตัวควบคุม IOPID สำหรับพลานต์ FO และ IO ทั้งด้านการติดตามคำสั่งอินพุตและการกำจัดสัญญาณรบกวน

เอกสารอ้างอิง

[1] X. S. Yang, *Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications,* John Wiley & Sons, 2010.

[2] I. Podlubny, *Fractional-Order Systems and Fractional-Order Controller*,UEF-03-94,Slovak Academy of Sciences,Kosice,1994.

[3] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired an algorithm," *in: Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), Studies in Computational Intelligence, Springer Berlin, 284, Springer, pp. 65–74, 2010.

[4] M. A. Fellani and A. M. Gabaj, "PID Controller Design for Two Tank Liquid Level Control System using Matlab," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 5, no. 3, pp. 436–442, 2015.

[5] L. Ljung, *System identification*, *Theory for the user*, Prentice-Hall, 2nd edition, 1999.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลแบบวิชวลที่มีปฏิสัมพันธ์สำหรับวิชาระบบควบคุม

Interactive Visual Computer Program for Control System Course

ดนุพล คำปัญญา[1] และ ปรีชา สาคะรังค์[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: preecha.s@rmutsb.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลแบบวิชวลซึ่งทำงานแบบปฏิสัมพันธ์กับผู้เรียนสำหรับวิชาระบบควบคุม เป็นที่รู้กันว่าการเรียนการสอนทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยสร้างภาพการทำงานที่สัมพันธ์กันในโดเมนการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น โดเมนเวลาและโดเมนลาปลาสซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญต่อการทำความเข้าใจโดยเฉพาะเกี่ยวกับแนวคิดของระบบควบคุม โปรแกรม Sysquake เป็นโปรแกรมที่ไม่มีค่าใช้จ่ายซึ่งมีความสามารถเพียงพอต่อการทำตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว บทความนี้ได้แสดงตัวอย่างโปรแกรมสำหรับการเรียนรู้ในหัวข้อต่างๆ ดังนี้ 1. ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้น 2. การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz 3. การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการ จากการทดลองใช้โปรแกรมดังกล่าวเปรียบเทียบกับทฤษฎีระบบควบคุมพบว่ามีความถูกต้อง

คำสำคัญ: ระบบควบคุม, การวิเคราะห์เสถียรภาพ, ตัวควบคุมพีไอดี

Abstract

This article presents a visually interactive computer program for control system course. It is undeniable, particularly in the electrical engineering education, that computer programs can enhance the creation of pictures of interrelated work of different domains, such as Time domain and Laplace domain, which are important to the understanding of control system concepts in particular. In this study, Sysquake, which is a free program, was mainly used to serve this purpose in providing example topics for learning as follows: 1. pole position and step response, 2. stability analysis using the Routh Hurwitz method, and 3. designing a phase-leading controller using equations. In testing it with the control system theory, the program was found functional in providing accurate results.

Keywords: control system, stable analysis, PID controller

1. บทนำ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ CCSdemo [1] และ Ictools [2] รวมทั้งเอกสาร [3 - 6] ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของแนวทางการเรียนรู้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลแบบวิชวลซึ่งทำงานแบบปฏิสัมพันธ์กับผู้เรียน โปรแกรมดังกล่าวสร้างขึ้นจากภาษาคอมพิวเตอร์ที่หลากหลายทั้งที่มีค่าลิขสิทธิ์เช่น MATLAB [7], LabVIEW [8] และไม่มีค่าลิขสิทธิ์เช่น PYTHON [9] , Octave, Sysquake [10] ข้อดีของโปรแกรม Sysquake คือมีขนาดไฟล์ 5.2 MB ซึ่งเหมาะสมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีทรัพยากรจำกัด มีการประมวลผลของโปรแกรมที่รวดเร็ว มีฟังก์ชันการทำงานครอบคลุมทฤษฎีระบบควบคุมสมัยใหม่ มีความสามารถทำงานแบบปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ได้ ข้อเสียคือไม่สามารถเขียนแบบบล็อกไดอะแกรมเหมือนกับโปรแกรม MATLAB ได้

บทความนี้นำเสนอตัวอย่างโปรแกรมสำหรับการเรียนรู้เรื่อง
1. ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้น (โปรแกรม No. 1 – No.4)
2. การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz (โปรแกรม No. 5) และ
3. การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการ (โปรแกรม No. 6)

2. วิธีการศึกษา

2.1 โปรแกรม Sysquake

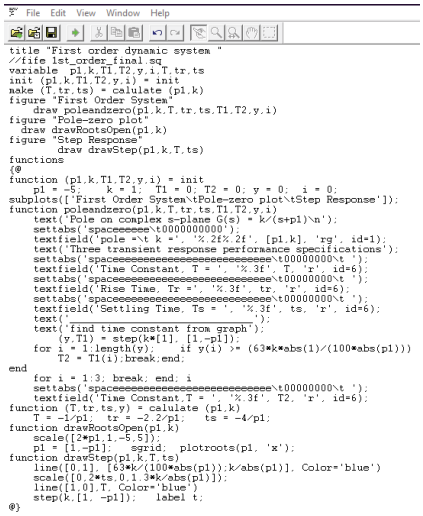
โปรแกรม Sysquake มีความสามารถในการคำนวณทางคณิตศาสตร์และแสดงผลเป็นรูปภาพ รวมทั้งมีการรับค่าข้อมูลในหลายรูปแบบจากผู้ใช้แบบปฏิสัมพันธ์ที่ทำงานทันทีเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรจากค่าเริ่มต้น ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือรูปภาพมีการเคลื่อนไหวสอดคล้องกับค่าดังกล่าว โปรแกรมนี้มีเครื่องมือพิเศษโดยเฉพาะสำหรับการทำงานของระบบควบคุม และการประมวลผลสัญญาณ ดังนั้นจึงมีคำสั่งหลักต่างๆ ที่พร้อมใช้งาน ตัวอย่าง คำสั่งวาดตำแหน่งของโพลและซีโรบนโดเมนลาปลาส คำสั่งวาดเส้นทางเดินราก คำสั่งแสดงผลตอบสนองแบบขั้น คำสั่งการรวมฟังก์ชันถ่ายโอนแบบลูปปิด เป็นต้น

โครงสร้างของโปรแกรม Sysquake ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1. การกำหนดชื่อตัวแปร (variable) การกำหนดค่าเริ่มต้น (init) การ

คำนวณตอนเริ่มต้น ตัวอย่างการคำนวณหาค่าตัวแปร T,tr,ts จากค่า p1,k เขียนได้ดังนี้ make (T,tr,ts) = calulate (p1,k) และการกำหนดชื่อกราฟพร้อมชื่อฟังก์ชันที่ใช้งาน ตัวอย่างชื่อกราฟและคำสั่งให้วาดกราฟเขียนได้ดังนี้ figure "Pole-zero plot" draw drawRootsOpen(p1,k)

2. รายละเอียดการทำงานของฟังก์ชันต่างๆ ในแต่ละกราฟจะอยู่ในส่วนนี้ functions{@ ตัวอย่างชื่อกราฟคือ function drawRootsOpen(p1,k) ตัวอย่างคำสั่งให้ทำงานคือ plotroots(p1, 'x'); @}

โครงสร้างของโปรแกรม Sysquake แสดงดังรูปที่ 1 เมื่อไฟล์คำสั่งมีนามสกุล sq เป็นการเขียนคำสั่งแบบข้อความแสดงในรูปที่ 1 และหน้าจอแสดงผลเมื่อสั่งให้ทำงาน แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 โครงสร้างของโปรแกรม Sysquake ตัวอย่างของโปรแกรม No. 1

2.2 ทฤษฎีระบบควบคุมและตัวอย่างโปรแกรม

2.2.1 ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้น

ระบบพลวัตอันดับหนึ่งและอันดับสองมีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของโพลในโดเมนลาปลาสและผลตอบสนองแบบขั้นในโดเมนเวลาแสดงได้ดังสมการ (1-3) และ (4-9) ตามลำดับ

$$T = -1/p_1 \quad (1)$$

$$T_r = -2.2/p_1 \quad (2)$$

$$T_s = -4/p_1 \quad (3)$$

$$T_p = \pi/\omega_d \quad (4)$$

$$T_s = 4/\sigma_d \quad (5)$$

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2{}_d + \omega^2{}_d} \quad (6)$$

$$T_r = \left[\left(\left(1.76*\zeta^3\right)-\left(0.417*\zeta^2\right)+\left(1.039*\zeta\right)+1\right)\right]/\omega_n \quad (7)$$

$$\zeta = \cos\left[\arctan\left(\omega_d/\sigma_d\right)\right] \quad (8)$$

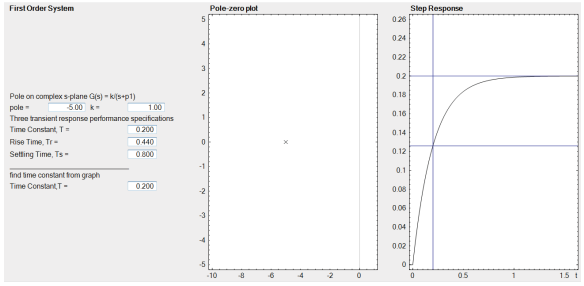
$$\%OS = e^{-\left(\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}\right)}*100 \quad (9)$$

เมื่อ $s_1 = -p_1$ คือตำแหน่งของโพลในระบบอันดับหนึ่ง $s_{1,2} = -\sigma_d \pm j\omega_d$ คือตำแหน่งของโพลในระบบอันดับสอง T_p คือเวลาที่จุดสูงสุด $\%OS$ คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน T_s คือเวลาเข้าที่ T_r คือเวลาขาขึ้น [11]

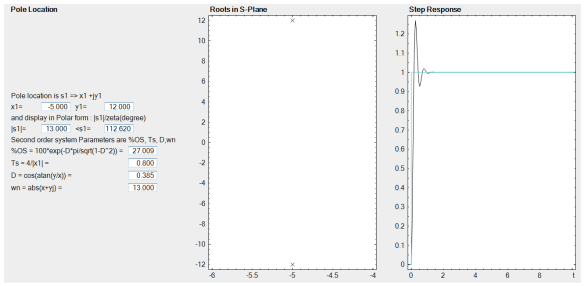
2.2.2 โปรแกรม No. 1 ถึง โปรแกรม No. 4

โปรแกรม No. 1 สำหรับระบบอันดับหนึ่งและโปรแกรม No. 2 สำหรับระบบอันดับสองมีผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อแบ่งรูปออกเป็นสามส่วนคือ 1. พื้นที่ด้านซ้ายมือแสดงตำแหน่งของโพลที่สามารถเปลี่ยนค่าได้โดยการพิมพ์ค่าลงไปในช่องรับข้อมูล นอกจากนี้ยังมีการแสดงผลของค่าคุณลักษณะต่างๆ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าสอดคล้องกับตำแหน่งของโพล 2. พื้นที่ตรงกลางแสดงกราฟตำแหน่งของโพลในโดเมนลาปลาสและ 3. พื้นที่ด้านขวาแสดงผลตอบสนองแบบขั้นในโดเมนเวลา

โปรแกรม No. 3 สำหรับระบบอันดับสองมีผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 4 หลังจากทำการป้อนค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โปรแกรมจะคำนวณตำแหน่งของโพล และค่าคุณลักษณะต่างๆ พร้อมกับแสดงกราฟตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้น

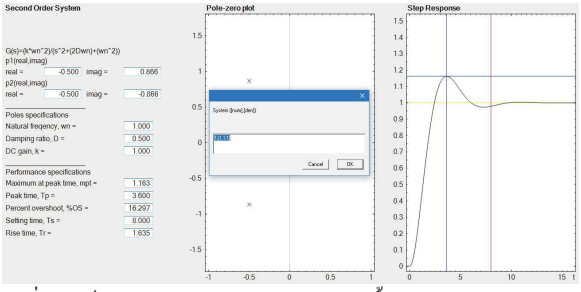


รูปที่ 2 ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับหนึ่ง

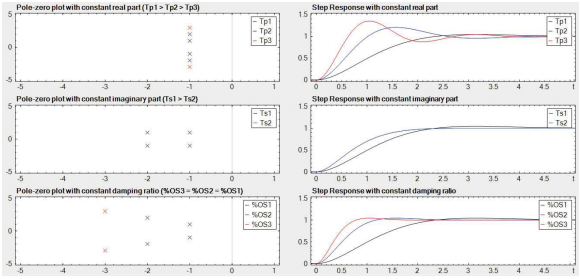


รูปที่ 3 ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับสอง

โปรแกรม No. 4 สำหรับระบบอันดับสองมีผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของระบบอันดับสองต่างๆ ที่มีตำแหน่งของโพลแตกต่างกันโดยมีเงื่อนไขดังนี้ 1. ให้ค่าจริงคงที่ (สองรูปด้านบน) 2. ค่าจินตภาพคงที่ (สองรูปตรงกลาง) และ 3. เปอร์เซนต์ค่าพุ่งเกินคงที่ (สองรูปด้านล่าง)



รูปที่ 4 ฟังก์ชันถ่ายโอนและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับสอง



รูปที่ 5 การเปลี่ยนโพลและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับสอง

2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz

จาก [11] ตารางของ Routh มีรูปแบบดังสมการ (10) สร้างจากสมการคุณลักษณะดังสมการ (11) และสามารถพิจารณาเสถียรภาพได้จากการนับการเปลี่ยนเครื่องหมายในคอลัมน์แรกของตารางของ Routh ถ้าไม่มีการเปลี่ยนเครื่องหมายแสดงว่ามีเสถียรภาพ ตารางของ Routh สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้ 1. คอลัมน์แรกไม่เป็นศูนย์ 2. คอลัมน์แรกเป็นศูนย์ และ 3. เป็นศูนย์ทั้งแถว

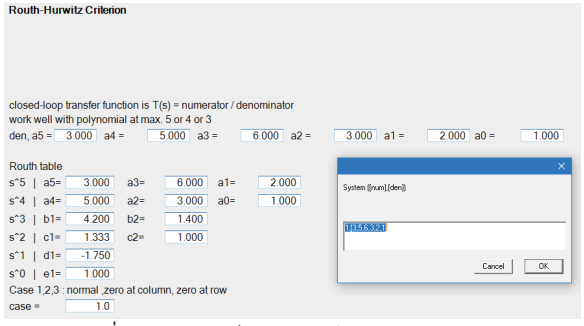
s^3	a_3	a_1
s^2	a_2	a_0
s^1	$-\dfrac{\begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix}}{a_2} = b_1$	
s^0	$-\dfrac{\begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ b_1 & 0 \end{vmatrix}}{b_1} = c_1$	

(10)

$$Q(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_0 \qquad (11)$$

2.2.4 โปรแกรม No. 5

โปรแกรม No. 5 สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz มีผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 6 หลังจากทำการป้อนค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โปรแกรมจะแสดงตารางของ Routh พร้อมบอกกรณีที่เกิดขึ้น



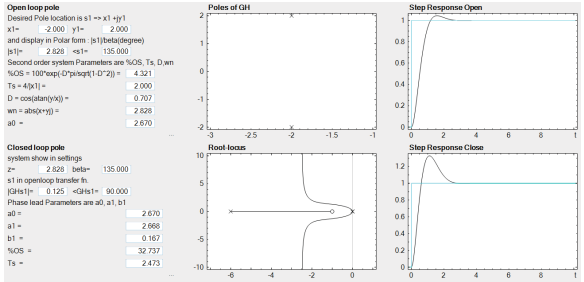
รูปที่ 6 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz

2.2.5 การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการ

จาก [11] การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการแสดงดังสมการ (12-13) โดยมีขั้นตอนแรกเริ่มจากกำหนดตำแหน่งรากวงปิด $\left(s_1 = |s_1| e^{j\beta}\right)$ และนำตำแหน่งดังกล่าวไปใส่ในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงเปิด $\left(G_p(s_1)H(s_1) = \left|G_p(s_1)H(s_1)\right| e^{j\psi}\right)$ หลังจากนั้นนำค่าทั้งสองไปคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมเฟสนำหน้าดังสมการ (14) เมื่อกำหนดค่าอัตราขยายไฟตรง (a_0)

$$a_1 = \frac{\sin\beta + a_0 \left|G_p(s_1)H(s_1)\right| \sin(\beta - \psi)}{|s_1| \left|G_p(s_1)H(s_1)\right| \sin(\psi)} \qquad (12)$$

$$b_1 = \frac{\sin(\beta + \psi) + a_0 \left|G_p(s_1)H(s_1)\right| \sin(\beta)}{-|s_1| \sin(\psi)} \qquad (13)$$



รูปที่ 7 การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการ

$$G_C(s) = \frac{a_1 s + a_0}{b_1 s + 1} \quad (14)$$

2.2.6 โปรแกรม No. 6

โปรแกรม No. 6 สำหรับการออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการมีผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 7 หลังจากทำการป้อนค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ โปรแกรมจะแสดงตำแหน่งของโพล ผลตอบสนองแบบขั้นและค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวงเปิดในพื้นที่ครึ่งบน ส่วนพื้นที่ครึ่งล่าง โปรแกรมจะแสดงตำแหน่งของโพล ผลตอบสนองแบบขั้นและค่าคุณลักษณะต่างๆ ของระบบวงปิด

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการทดลองของโปรแกรม No. 1 ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับหนึ่งแสดงค่า T, T_r, T_s ถูกต้องตามสมการ (1-3) ผลการทดลองของโปรแกรม No. 2 ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับสองแสดงค่า $\zeta, T_p, T_r, T_s, \omega_n$,%OS ถูกต้องตามสมการ (4-9) ผลการทดลองของโปรแกรม No. 3 ฟังก์ชันถ่ายโอนและผลตอบสนองแบบขั้นของระบบอันดับสอง โดยค่า $\zeta, T_p, T_r, T_s, \omega_n$,%OS, M_{pt} คำนวณจากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใส่เข้าไปซึ่งได้ผลลัพธ์ถูกต้องตามสมการ (4-9) ผลการทดลองของโปรแกรม No. 4 แสดงความสัมพันธ์ของผลตอบสนองแบบขั้นที่ตำแหน่งโพลของระบบอันดับสอง โดยแสดงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนตำแหน่งโพลใน 3 รูปแบบถูกต้องตามทฤษฎีและโปรแกรม No. 1 – No. 3

ผลการทดลองของโปรแกรม No. 5 การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz แสดงผลลัพธ์ตารางของ Routh ได้เหมือนกับการคำนวณด้วยการเขียนบนกระดาษซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยนักศึกษาทำแบบฝึกหัดได้ โปรแกรม No. 5 รองรับสมการโพลิโนเมียลอันดับสูงสุดเท่ากับ 5

ผลการทดลองของโปรแกรม No. 6 การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้า นอกจากจะคำนวณฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมเฟสนำหน้าได้จากการกำหนดตำแหน่งรากวงปิดและค่าอัตราขยายไฟตรงที่ต้องการแล้ว หลังจากใช้ตัวควบคุมดังกล่าวควบคุมกระบวนการจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่แตกต่างไปจากตำแหน่งของโพลวงปิดที่ต้องการ ทั้งนี้เพราะอิทธิพลของตำแหน่งรากที่สามรวมทั้งตำแหน่งของซีโรที่เพิ่มเข้ามา [11] จากผลตอบสนองแบบขั้นของระบบวงปิดสามารถหาค่าเปอร์เซนต์ค่าพุ่งเกินและค่าเวลาเข้าที่ได้ โดยโปรแกรมทั้งหมดมีความสามารถด้านการคำนวณแบบโต้ตอบคือเมื่อผู้ใช้เปลี่ยนค่าตัวแปรอินพุตจะส่งผลทำให้โปรแกรมแสดงผลตัวแปรเอาต์พุตทันที

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอตัวอย่างการใช้โปรแกรม Sysquake เพื่อสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลแบบวิชวลซึ่งทำงานแบบปฏิสัมพันธ์กับผู้เรียนสำหรับวิชาระบบควบคุมในระดับปริญญาตรี

บทความนี้ได้แสดงตัวอย่างโปรแกรมสำหรับการเรียนรู้เรื่อง 1. ตำแหน่งของโพลและผลตอบสนองแบบขั้น 2. การวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยวิธี Routh Hurwitz 3. การออกแบบตัวควบคุมเฟสนำหน้าโดยใช้สมการ จากการทดลองใช้โปรแกรมดังกล่าวเปรียบเทียบกับทฤษฎีระบบควบคุมพบว่ามีความถูกต้อง

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมระดับปริญญาตรีในอนาคตการใช้โปรแกรม Sysquake สำหรับการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่เป็นหัวข้อที่น่าสนใจเป็นอย่างมากเพราะมีรายละเอียดที่ซับซ้อนซึ่งมีความจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ช่วยทำให้นักศึกษาสามารถทำความเข้าใจได้ด้วยตนเองเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้โปรแกรม Sysquake ยังมีประโยชน์ต่อการศึกษาทางด้านวิศวกรรมสาขาอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] Åström, K. J., & Wittenmark, B. (1997). CCSDEMO. Technical report, Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology.

[2] Johansson, M., & Gäfvert, M. (2003). ICTools—Interactive learning tools for control. Department of automatic control. Technical report, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

[3] Shahian, B., & Hassul, M. (1993). Control system design using MATLAB®. Prentice Hall. ISBN: 0-13-174061-X.

[4] Johansson, M., Gäfvert, M., & Åström, K. J. (1998). Interactive tools for education in automatic control. IEEE Control Systems Magazine,18(3), 33–40.

[5] Keller, Jürg. (2006). Interactive control system design. Control Engineering Practice. 14. 177-184.

[6] Guzmán, J. L., Åström, K. J., Dormido, S., Hägglund, T., Berenguel, M., & Piguet, Y. (2008). Interactive learning modules for PID control IEEE Control Systems Magazine, 28(5), 118–134.

[7] MATLAB. Available online: https://www.mathworks.com/products/matlab.html, (accessed on 10 December 2024).

[8] LabVIEW.https://www.ni.com/en/shop/labview.html, (accessed on 10 December 2024).

[9] The Python Control Systems Library. Available online: https://github.com/python-control/python-control, (accessed on 10 December 2024).

[10] Piguet, Y. (2009). Sysquake 5: User manual. Laussane, Switzerland: Calerga Sarl.

[11] C. L. Phillips, R. D. Harbor. (2000). Feedback Control Systems, 4th ed, Prentice Hall International Inc.,

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

A Robust Practical Fixed-Time Torch Height Control by Applying Arc Voltage Feedback for CNC Plasma Machines

Varin Cholahan and Tassaphan Suwannatat*

EEC Networking of Mechatronics Excellent Center, School of Engineering and Innovation,
Rajamangala University of Technology Tawan-ok
E-mail: varin@pmc.co.th, tassaphan.su@rmutto.ac.th*

Abstract

This article study a control problem for the Torch Height Control (THC) of CNC Plasma Arc Machines (PAM) which is directly relating to cutting quality. To regulate Arc Voltage, a famous Robust Fixed-Time Sliding Mode Control (FTSMC) is introduce to maintain Torch-to-Work distance invariably. Firstly, a novel sliding surface is chosen. Then, a practical fixed-time algorithm is proposed and stability analysis method of Lyapunov function is presented to demonstrate the system stability. Eventually, the numerical simulations are illustrated to verify our control scheme.

Keywords: Practical Fixed-Time control, Nonlinear control, Torch Height Control (THC), Plasma Arc Machines (PAM).

1. Introduction

Modern manufacturing industry focuses on cutting sheet materials accurately and quickly due to the increasing demands of production and the need for higher quality. Previously, oxy-fuel cutting processes were used to cut sheet materials, but the production speed was not very high because of the need for good cut quality, so high cutting speeds could not be used. Later, the invention of the plasma arc machines (PAM) was initiative to solve this difficulty. PAM can cut high-strength materials accurately and quickly using gases such as O_2, N_2 or Ar [1]. PAM can provide faster production at a lower cost compared to other cutting processes. The PAM utilizes a plasma gas to cut the material. High-pressure plasma melt and eliminate material from the workpiece. High electrical current is used to produce a plasma jet between the electrode and workpiece with temperature about 20,000 degrees Celsius. Therefore, the characteristics of the plasma arc are complicated. Traditional linear control strategies are difficult to face the uncertainties of plasma cutting [2].

This research presents a novel algorithm to enhance the dynamic performance of cutting quality with more robustness without change in machine components. Although, the proposed control scheme needs an advance mathematical proof but it is not too sophisticated to implemented.

2. Preliminaries

2.1 Plasma Arc Machines' Torch

Torch Height Control (THC) consists of motion controller and sensor device. THC sensor measures arc voltage. Higher gab between the plasma torch and metal results in higher the voltage. So based on the measured voltage value we can manipulate a height of plasma torch to yield an unfluctuating Arc voltage. Torch Height Controller then sends control signals to compensates Torch movement. Fig. 1. is Arc profile from Plasma Arc Machine's Torch.

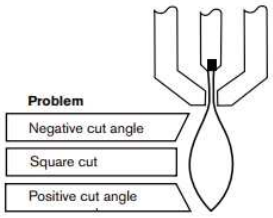


Fig. 1 Arc Profile from Plasma Arc Machines.

To have a cutting quality, controller needs to maintain the range of Square region to machine the steel plate under unpredictable sources of uncertainties and disturbances.

2.2 Fixed-Time Control

General form of second order dynamic system can be represented by

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= g(x)u + N(x) + d(x,t) \end{aligned} \tag{1}$$

where x is the state vector; $N(x)$ and $g(x)$ are continuous differentiable function and bounded by positive real number. Bounded disturbance and bounded input represent by $d(x,t)$ and u respectively.

Definition (i) The dynamic system (1) is a global finite-time stable if and only if it is Lyapunov stable, and for all $x_0 \in R^n$ there exists $T(x_0) \geq 0$ depending on the initial condition such that, for any $x(\cdot)$ solution of (1) with $x(0) = x_0, \lim_{t \to T(x_0)} \|x(t)\| = 0$, i.e., for all $t \geq T(x_0)$. The function T is called settling time.

Definition (ii) System (1) is global fixed-time stable if: *(I)* The system is globally finite-time stable. *(II)* Function T is upper bound where $T > 0$, for all $x_0 \in R^n$, $T(x_0) \le T$, and T is not dependent on initial values.

Definition (iii) For any $\alpha > 0$, $x \in R$, a nonlinear function is defined as: $sign^{\alpha}(x) = sign(x)|x|^{\alpha}$, $sign(x) = \{+1 \; or \; -1\}$.

Lemma 1: If there is a differentiable positive definite radially unbounded function $V : R^n \to R^+$ such that

$$\dot{V}(x) \le -\alpha_1 V(x)^{\kappa} - \alpha_2 V(x)^{\varphi} + \nu \qquad (2)$$

where $x \in R^n, a_1 > 0, a_2 > 0, \nu > 0$, and $0 < \kappa < 1 < \varphi$, then the system (1) is practical fixed-time stable. The reaching time is $T \le \frac{1}{\alpha_1 \varsigma(1-\kappa)} + \frac{1}{\alpha_2 \varsigma(\varphi - 1)}$ with $0 < \varsigma < 1$. The trajectory converges into the neighborhood residual sets described by $\Phi \in \left\{ V(x) \le (\frac{\nu}{(1-\varsigma)\alpha_1})^{1/\kappa}, (\frac{\nu}{(1-\varsigma)\alpha_2})^{1/\varphi} \right\}$.

Remark 1: the meaning of "practical" in Lemma 1 is a general idea that the tracking error does not approach to the zero ideally, but to a residual set of the neighborhoods of origin as in most application cases.

Lemma 2 [3]: Define the dynamical system as

$$\dot{x} = -\frac{1}{\Xi(x)} \left(\beta_1 sign(x)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(x)^{\frac{n_1}{m_1}} \right) \qquad (3)$$

where $sign(x)$ is complied with *Definition (iii);* $\Xi(x)$ is a time-varying gain function and is denoted as $\Xi(x) = a_1 + (1 - a_1)\exp(-b_1 |x|^{c_1})$, $\gamma_1 = \frac{q_1}{p_1}(1 + sign(|x| - 1))$; $\beta_1 > 0, \eta_1 > 0, 0 < a_1 < 1$ and $b_1 > 0$; c_1 is a positive even integer; m_1, n_1, p_1 and q_1 are positive odd integers with $n_1 < m_1$, $p_1 < q_1$.

By Lemma 1, the dynamic system (3) is fixed-time-stable system and its reaching time is shown below:

Proof: Letting $y = |x|^{\frac{m_1 - n_1}{m_1}}$ and combining (5), lead to the equation

$$\dot{y} = \frac{m_1 - n_1}{m_1 \Xi(x) sign(x)^{n_1/m_1}} \left(\beta_1 sign(x)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(x)^{\frac{n_1}{m_1}} \right) = \frac{m_1 - n_1}{m_1 \Xi(x)} \left(\beta_1 y^{1+\gamma_1 \frac{m_1 - n_1}{m_1}} + \eta_1 \right).$$

By computing (8), the convergence time is obtained by

$$T_a \le \frac{m_1}{m_1 - n_1} \left(\int_0^1 \frac{\Xi(x)}{\beta_1 y + \eta_1} dy + \int_0^{y_0} \frac{\Xi(x)}{\beta_1 y^{\varepsilon_1} + \eta_1} dy \right)$$

where $\varepsilon_1 = 1 + \frac{m_1 q_1}{p_1 (m_1 - n_1)}$. Because of $a_1 \le \Xi(x) \le 1$, the supremum of T_a is given by

$$T_a \le \frac{m_1}{m_1 - n_1} \left(\int_0^1 \frac{1}{\beta_1 y + \eta_1} dy + \int_0^{y_0} \frac{1}{\beta_1 y^{\varepsilon_1}} dy \right)$$

and resulting to

$$T_a \le \frac{m_1}{\beta_1 (m_1 - n_1)} \ln \left(\frac{\beta_1 + \eta_1}{\eta_1} \right) + \frac{p_1}{\beta_1 q_1}. \qquad (4)$$

It is emphasized that T_a is not related to the initial condition.

2.3 Plasma Torch Mathematical Model

The free body diagram of Plasma Machine's Torch is shown in Fig. 2. Torch is moving and subjected to uncertainties, load disturbances. It is equivalent to the nonlinear mass-spring system.

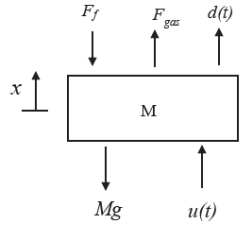


Fig. 2 Free body diagram of Plasma Machine's Torch.

The nonlinear mathematical model can be considered as

$$M\ddot{x}(t) + kx(t) + F_f + F_{gas} = u(t) \qquad (5)$$

In the above expressions, *x(t), u(t), k , g, M ,* μ and sgn(.) is the mass position, the system input, spring coefficient, gravity constant, mass value, friction coefficient and the signum function respectively. Under the uncertainties and disturbances, the nonlinear mass-spring system (5) in the state-space can be written as

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= N(x) + \Delta f(x) + g(x)u + d(x,t) \end{aligned} \qquad (6)$$

where $N(x) = -\frac{1}{M}\left(kx_1 + \mu g \, \mathrm{sgn}(x_2) + F_{gas} \right)$, x are state matrix, the nonlinear function *Δf(x)* and *d(x,t)* signifies uncertainties and external disturbances respectively. With small distance of movement, *Mg* can be neglected.

2.4 Controller Design

Tracking error can be defined as:

$$e = x - x_r \; . \qquad (7)$$

Torch's position is controlled. Therefore, (6) can be written as

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{M} U + \sigma(t) \\ \sigma(t) &= \frac{N(x) + \Delta f(x) + d(x,t)}{M} \end{aligned} \; . \qquad (8)$$

Double derivative (7) , yields

$$\begin{aligned}\ddot{e} &= \ddot{x} - \ddot{x}_r \\ &= \frac{1}{M}U + \sigma(t) - \ddot{x}_r \end{aligned} \quad (9)$$

Note that for the lumped term $\sigma(t)$ and its derivative are bounded by positive constants.

Proposition 1: The control signal proposed as:

$$U_{in} = M(U_{eq} + U_b - \delta) \quad (10a)$$

$$\begin{aligned}U_{eq} &= \ddot{x}_r \\ &-\frac{1}{\Xi(e)}\left(\beta_1(1+\gamma_1)diag(|e|)^{\gamma_1} + \frac{\eta_1 n_1}{m_1}diag(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right) \\ &+\frac{\dot{\Xi}(e)}{\Xi^2(e)}\left(\beta_1 sign(e)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right)\end{aligned} \quad (10b)$$

$$U_b = k_1 sign(s) + k_2 sign(s)^{1+\gamma_2} + k_3 sign(s)^{\frac{n_2}{m_2}} \quad (10c)$$

where $\gamma_1 = \frac{q_1}{2p_1}(1+sgn(|e|-1))$ under conditions m_1, n_1, p_1 and q_1 are positive odd integers, also $n_1 < m_1$, $p_1 < q_1$, $\beta_1 > 0, \eta_1 > 0$; $\gamma_2 = \frac{q_2}{2p_2}(1+sgn(|s|-1))$ under conditions m_2, n_2, p_2 and q_2 are positive odd integers and $n_2 < m_2$, $p_2 < q_2$ and $\delta \in R$.

Proposition 2 : By using Lemma 2, choosing the novel sliding mode surface as:

$$s = \dot{e} + \frac{1}{\Xi(e)}\left(\beta_1 sign(e)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right). \quad (11)$$

Derivative (11)

$$\begin{aligned}\dot{s} &= g(x_1, x_2)u + \sigma(t) - \ddot{x}_r \\ &+\frac{1}{\Xi(e)}\left(\beta_1(1+\gamma_1)diag(|e|)^{\gamma_1} + \frac{\eta_1 n_1}{m_1}diag(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right). \\ &-\frac{\dot{\Xi}(e)}{\Xi^2(e)}\left(\beta_1 sign(e)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right)\end{aligned} \quad (12)$$

Substituting (10a) into (12) yields:

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \frac{1}{M}\left[M(U_{eq} + U_b - \delta)\right] + \sigma(t) - \ddot{x}_r \\ &+\frac{1}{\Xi(e)}\left(\beta_1(1+\gamma_1)diag(|e|)^{\gamma_1} + \frac{\eta_1 n_1}{m_1}diag(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right). \\ &-\frac{\dot{\Xi}(e)}{\Xi^2(e)}\left(\beta_1 sign(e)^{1+\gamma_1} + \eta_1 sign(e)^{\frac{n_1}{m_1}}\right)\end{aligned} \quad (13)$$

Applying (10b)-(10c), equation (13) is actually

$$\dot{s} = -U_b + \Gamma(t) \quad (14)$$

where $|\sigma(t) - \delta| \le |\Gamma(t)|$ and $|\Gamma(t)|$ is bounded by ξ constant.

The close loop dynamical system illustrated in Fig. 3.

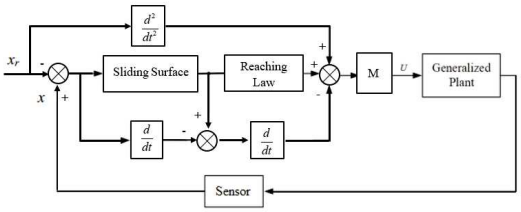


Fig. 3 The block diagram of Torch Height Controller.

2.5 Stability Proof

The dynamical system of Plasma's Torch is a practical fixed-time stable. The controller will draw the tracking error into a set neighborhood of origin. The complete proof can be found in [4].

Proof:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (15)$$

Taking the derivative of (15) along with (13) and recalling Definition (iii), this lead to

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(U_b + \Gamma(t))\end{aligned} \quad (16)$$

Substituting (10c) into (16), we have

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -s(k_1 sign(s) + k_2 sign(s)^{1+\gamma_2} + k_3 sign(s)^{\frac{n_2}{m_2}} + \Gamma(t)) \\ &\le -k_1 s - k_2 s^{\gamma_2+2} - k_3 s^{\frac{m_2+n_2}{m_2}} + \xi s \\ &\le -k_2 s^{\gamma_2+2} - k_3 s^{\frac{m_2+n_2}{m_2}} - (k_1 - \xi)s \\ &\le -\alpha_1 V^{\frac{\gamma_2+2}{2}} - \alpha_2 V^{\frac{m_2+n_2}{2m_2}} + \nu\end{aligned} \quad (17)$$

As long as $\alpha_1, \alpha_2 > 1$ and $k_1 > \xi$, (17) is satisfied.

From Lemma 1, s reaches for the region near origin as

$$\Phi_1 = s \le \min\left\{\left(\frac{\nu}{(1-\varsigma)\nu_1}\right)^{\frac{2}{\gamma_2+1}}, \left(\frac{\nu}{(1-\varsigma)\nu_2}\right)^{\frac{2m_2}{m_2+n_2}}\right\} \quad (18)$$

within a fixed-time given by

$$T_1 \le \frac{2}{\alpha_1 \varsigma \gamma_2} + \frac{2}{\alpha_2 \varsigma (m_2 - n_2)} \quad (19)$$

with $\varsigma \in (0,1)$.

From Lemma 2, e is toward to the set of Φ_2, where

$$\Phi_2 = |e| \le \max\left\{\left(\frac{\Xi\Omega'}{\beta_1}\right)^{\frac{1}{\gamma_1+1}}, \left(\frac{\Xi\Omega'}{\eta_1}\right)^{\frac{m_1}{n_1}}\right\}. \quad (20)$$

T_2 is the summation of both practical fixed time from (4) and system tracking error (7). A Fixed time response of dynamical system (14) is

$$T_2 \le \max\left\{\frac{n_1}{\beta_1^* m_1}+\frac{m_1}{m_1-n_1}\frac{1}{\beta_1^*}\ln\left(1+\frac{\beta_1^*}{\eta_1}\right), \frac{n_1}{\beta_1 m_1}+\frac{m_1}{m_1-n_1}\frac{1}{\beta_1}\ln\left(1+\frac{\beta}{\eta_1^*}\right)\right\} + \frac{2}{\alpha_1\varsigma\gamma_2}+\frac{2}{\alpha_2\varsigma(m_2-n_2)} \quad (22)$$

where $\beta_1^* \triangleq \beta_1 - \frac{\Xi(e)S}{sign(e)^{1+\gamma_1}} > 0$ and $\eta_1^* \triangleq \eta_1 - \frac{\Xi(e)S}{sign(e)^{n/m_1}} > 0$.

3. Simulation and Results

The simulations are provided to evaluate the the proposed strategy. We choose the fixed value of lump disturbances as $D = 0.2\sin(5t+0.4)$. A step disturbance has been penetrated at time 2 second. The control parameters are set as $q_1 = q_2 = 15$, $p_1 = p_2 = 11$, $n_1 = n_2 = 13$, $m_1 = m_2 = 14$, $\beta_1 = 1$, $\eta_1 = 2$, $a_1 = 0.6$, $b_1 = 18$, $c_1 = 13$, $\gamma_1 = 12$, $\gamma_2 = 5$, $\mu_1 = 2$ and $\mu_2 = 0.04$. The initial condition $\omega_0 = 0$, $\hat{\delta}_0 = 0$. In Fig. 4 - 5, the graphic comparisons are demonstrated. FTSMC shows the better performance than the high gain PID Controller. Experiment machine is setting up. Fig. 6 presents the experimental CNC Plasma Machine which is Hypertherm 26,000W Power source installed Arc voltage feedback

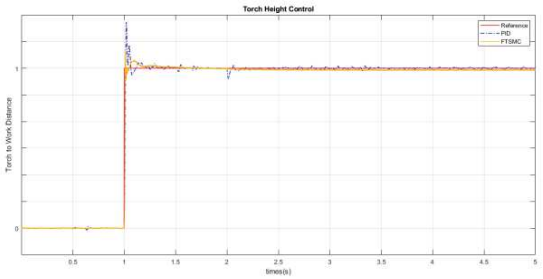


Fig. 4 Steady state response.

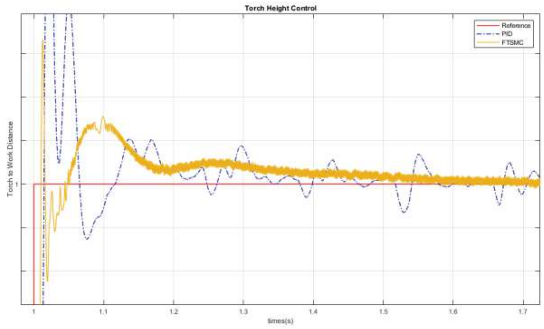


Fig. 5 Transient response.

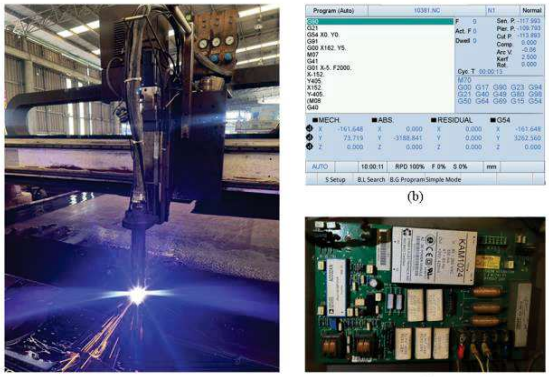


Fig. 6. (a) Plasma Machine's Torch; (b) Motion Control; (c) Arc Voltage Feedback Card.

4. Conclusion

In this article, a fixed-time controller is utilized for a THC to improve Plasma Arc performance , avoid singularity, against uncertainties. The stability is proved by well-known Lyapunov method. The reaching time towards a neighborhood of equilibrium is demonstrated. The residual sets are derived. By numerical simulations, the fixed-time controller shows better performance than PID Controller. FTSMC has a quick transient response, reduces chattering phenomenon , possesses strong robustness, singularity-free. This research uses fixed value of disturbances. For further study, observer can be used to estimate uncertainties and disturbances.

References

[1] D. K. Naik and K. Maity, "Experimental analysis of the effect of gas flow rate and nature on plasma arc cutting of hardox-400," *Welding in the World*. 2020, vol. 64, pp. 345 – 352.

[2] J. Deli, Y. Bo and Z. Fengjing, "Decoupling Control based on PID Neural Network for Plasma Cutting System," *27th Chinese Control Conference.* 2008, pp. 659 – 662.

[3] J. Ni, L. Liu, C. Liu, X. Hu and S. Li, " Fast fixed-time nonsingular terminal sliding mode control and its application to chaos suppression in power system," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs* . 2017, vol. 64, pp. 151–155.

[4] V. Cholahan, N. Wongvanich and W. Tangsrirat , "A Novel Practical Fixed-Time Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors," *4th ICA-SYMP. 2025*, pp. 74-79.

การพัฒนาระบบควบคุมน้ำและปุ๋ยอัตโนมัติในแปลงหญ้าสนามกอล์ฟร่วมกับระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Development of Automatic Water and Fertilizer Control System in Golf Course Lawns Combined with Internet of Things System.

นิคม ศรีหะมงคล[1] กาญจน์ กันปัญญา[2] เจษฎา สารสุข[3] และ บุญเติม อุ่นวิเศษ[4]

[1]สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
[2,3,4]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

*corresponding author: jassadat77@npu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและเวลา ในการให้น้ำและปุ๋ยเป็นสิ่งที่เกษตรกรให้ความสำคัญมากและสนใจในปัจจุบัน บทความวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการพัฒนาระบบการควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยอัตโนมัติสำหรับพันธุ์หญ้าด้วยระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง(IoT) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino วิธีการวิจัยใช้การลองแบบ Randomized Completed Block Design (RCBD) ทดลองปลูกหญ้า 4 ชนิด คือ คือ หญ้านวลน้อย หญ้ามาเลเซีย หญ้าญี่ปุ่น และหญ้าเบอร์มิวด้า บนพื้นที่ขนาด 1 ตารางเมตร 16 แปลง ผลการทดสอบระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยแบบอัตโนมัติ พบว่าการเจริญเติบโตของหญ้าเบอร์มิวด้าเติบโตแผ่ขยายดีที่สุด 51.77 ตร.ซม. รองลงมาคือหญ้าญี่ปุ่น 48.92 ตร.ซม.หญ้ามาเลเซีย 45.62 ตร.ซม. และหญ้านวลน้อย 27.85 ตร.ซม. การพัฒนาระบบควบคุมสามารถลดต้นทุนด้านแรงงานและเวลา สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรมเชิงพาณิชย์ได้

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ, อินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

The rising costs associated with labor, fertilizers, and water for grass cultivation are significant concerns for farmers. This study aims to address these issues by developing an automated control system for water and fertilizer application using Randomized Complete Block Design (RCBD) and Internet of Things (IoT) technology integrated with Arduino. The experiment involved planting four types of grass: Nuan Noi grass, Malaysian grass, Japanese grass, and Bermuda grass in 16 plots, each measuring 1 square meter. The automated control system was implemented to manage water and fertilizer distribution efficiently.

The experimental results revealed that Bermuda grass exhibited the highest spreading rate at 51.77 square centimeters, followed by Japanese grass at 48.92 square centimeters, Malaysian grass at 45.62 square centimeters, and Nuan Noi grass at 27.85 square centimeters. The developed system demonstrated its potential to reduce labor and resource costs significantly. This research highlights the feasibility of applying automated control systems in commercial agriculture to optimize grass cultivation and resource management.

Keywords: Automation, IoT

1. บทนำ

ในปัจจุบัน วิกฤตภัยแล้งกำลังทวีความรุนแรง ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำธรรมชาติที่เป็นทรัพยากรสำคัญ ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการอนุรักษ์และใช้อย่างมีเหตุผล วิกฤตภัยแล้งรุนแรงขึ้น ส่งผลต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ ภาคเกษตรใช้น้ำปริมาณมาก โดยเฉพาะการผลิตหญ้าสำหรับอาหารสัตว์และพื้นที่สันทนาการการจัดการน้ำและปุ๋ยที่ไม่เหมาะสมทำให้สูญเสียทรัพยากรแนวทางแก้ไขนำเทคโนโลยี IoT มาใช้ผ่าน NodeMCU ESP8266ตรวจสอบความชื้นดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์แบบเรียลไทม์พัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับหญ้า 4 สายพันธุ์ในจังหวัดนครพนมหญ้านวลน้อยหญ้ามาเลเซียหญ้าญี่ปุ่นหญ้าเบอร์มิวด้า ระบบที่พัฒนาควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ทโฟนออกแบบให้เหมาะสมกับชุดดินนครพนมศึกษาความต้องการน้ำและปุ๋ยที่แท้จริงของหญ้าแต่ละชนิดประโยชน์ที่ได้รับลดการสูญเสียน้ำและพลังงานเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการหญ้าสามารถประยุกต์ใช้ในพื้นที่เกษตรขนาดใหญ่และสถานที่สาธารณะสนามกอล์ฟสนามฟุตบอล พื้นที่สวนสาธารณะผลลัพธ์ที่คาดหวังการอนุรักษ์น้ำอย่างมีประสิทธิภาพการจัดการหญ้าให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเป็นแนวทางสำหรับการเกษตรสมัยใหม่ในภาวะขาดแคลนน้ำ**2.**

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. การจัดการหญ้าสนาม

การเลือกหญ้าให้เหมาะกับพื้นที่ควรพิจารณาจาก 4 สายพันธุ์หลักหญ้านวลน้อย ปลูกง่าย ทนแดดจัด ฟื้นตัวเร็ว เหมาะสำหรับสวนหย่อมและสนามกอล์ฟหญ้ามาเลเซีย ชอบแดดรำไรถึงจัด ควรปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ต้องการน้ำสม่ำเสมอหญ้าญี่ปุ่น ใบเล็ก ขึ้นหนาแน่น ทนเหยียบ แต่ต้องการแดดรำไรและน้ำมาก เหมาะสำหรับหน้าหนาวหญ้า

เบอร์มิวด้า (หญ้าแพรก) ทนแล้งดีที่สุด ชอบแดดจ้า เหมาะปลูกกลางแจ้ง (อรวิมล แก้วเกลี้ยง และคณะ, 2556)

2.2 หลักการรดน้ำสนามหญ้า

การรดน้ำสนามหญ้าที่ถูกต้องควรคำนึงถึงปัจจัยสำคัญ 3 ประการ เวลาที่เหมาะสมเวลาที่แนะนำ: เช้ามืดถึงก่อน 8.00 น. (Karcher et al., 2020)หลีกเลี่ยงการรดน้ำตอนกลางคืนเพื่อป้องกันโรคเชื้อราไม่ควรรดน้ำตอนแดดจัด (หลัง 10.00 น. ถึงก่อน 16.00 น.) ความถี่และปริมาณสนามหญ้าทั่วไป: 2-3 ครั้ง/สัปดาห์ (ปริมาณ 2.5-3.5 ซม./สัปดาห์)หน้าฝน: ลดความถี่ลง 50% ฤดูแล้ง: เพิ่มความถี่แต่ลดปริมาณลง (Beard, 2018) เทคนิคการรดน้ำควรให้น้ำลึกถึงราก (15-20 ซม.)ใช้ระบบสปริงเกอร์แบบหมุน (rotary sprinkler) สำหรับพื้นที่กว้างตรวจสอบความชื้นดินก่อนรดน้ำเสมอ เทคนิคพิเศษการรดน้ำหญ้าปลูกใหม่10 วันแรก: วันละ 2 ครั้ง (เช้า-เย็น)10-20 วัน: วันละ 1 ครั้งหลังจาก 20 วัน: ปรับตามสภาพอากาศ (Turgeon, 2019)การประหยัดน้ำใช้ระบบน้ำหยดสำหรับสนามขนาดเล็กติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นดินเลือกพันธุ์หญ้าทนแล้งในพื้นที่ขาดแคลนน้ำปัญหาที่พบบ่อยน้ำขังสาเหตุ: ดินไม่ระบายน้ำแก้ไข: เพิ่มอินทรียวัตถุในดินหญ้าเหลืองสาเหตุ: รดน้ำไม่เพียงพอหรือมากเกินไปแก้ไข: ตรวจสอบความชื้นดินก่อนรดน้ำ (กรมส่งเสริมการเกษตร,2563)

2.3การเขียนออกแบบคำสั่งในการใช้งาน

งานวิจัยนี้ใช้ ชิป STM32 จาก STMicroelectronics เป็นแกนหลัก โดยมีคุณสมบัติเด่นดังนี้คุณสมบัติหลักสถาปัตยกรรม ARM Cortex-M3 (32-bit)ความเร็ว 72 MHzหน่วยความจำ: Flash 64 KB, RAM 20 KB พอร์ต GPIO 37 ขาADC 12-bit (10 ช่อง)รองรับ SPI, I2C, UART, CANข้อได้เปรียบช่วงแรงดันใช้งานกว้าง (2.0–3.6V)เข้ากันได้กับ Arduino Library (พัฒนาโค้ดง่าย)ประสิทธิภาพสูงกว่า Arduino Uno R3 การประยุกต์ใช้ในงานวิจัยประมวลผลคำสั่งซับซ้อนจัดการโค้ดขนาดใหญ่ทำงานแบบ Real-time ด้วยความแม่นยำสูงการเลือก STM32 นี้เน้นประสิทธิภาพและรองรับการขยายระบบในอนาคต

2.4 ขั้นตอนการแสดงผล

Blynk: แอปพลิเคชัน IoT สำหรับเกษตรอัจฉริยะคุณสมบัติหลักรองรับฮาร์ดแวร์หลากหลาย (Arduino, NodeMCU, ESP8266)ใช้งานได้ทั้ง iOS และ Androidออกแบบสำหรับอุปกรณ์ IoT ทั่วไปสถาปัตยกรรมระบบ:ใช้เซิร์ฟเวอร์กลางจัดการการเชื่อมต่อมีระบบเก็บข้อมูลออฟไลน์เมื่อขาดการเชื่อมต่อพัฒนาด้วย Java แบบ open-source การสื่อสารใช้โปรโตคอลไบนารีเฉพาะขนาดข้อมูลเล็กและเร็วเชื่อมต่อผ่าน TCP/IP socketการประยุกต์ใช้ทางการเกษตรตรวจสอบความชื้นดินและอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ควบคุมระบบให้น้ำอัตโนมัติแสดงผลผ่านแอปมือถือจุดเด่นใช้งานง่ายรองรับหลายแพลตฟอร์มติดตั้งเซิร์ฟเวอร์ส่วนตัวได้ในงานวิจัยนี้ Blynk ทำหน้าที่เป็นอินเทอร์เฟซหลัก ช่วยให้เกษตรกรสามารถตรวจสอบและควบคุมระบบผ่านสมาร์ทโฟนได้อย่างสะดวก

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย

3.1ออกแบบโปรแกรมและอัลกอริทึม สำหรับควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยในหญ้าที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ออกแบบฮาร์ดแวร์ระบบควบคุมน้ำและปุ๋ยแบบอัตโนมัติสำหรับพันธุ์หญ้าด้วยระบบอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยหญ้าอัตโนมัติ

จากรูปที่1 ชุดฮาร์ดแวร์ประกอบ ชุด Sensor ตรวจวัดอุณหภูมิ ชุดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ประกอบด้วยชุด ESP8266 SmartRealy Shield 4CH Relay/4 Input , DS3231 RTC + EEPROM 256kb, จอแสดงผล LCD 1602 I2C interface , ชุด sensor ความชื้น module AM2302 sensor สามารถส่งสัญญาณไร้สายเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ต ESP-07 : ESP8266 Wi-Fi Module



รูปที่ 2 Application การควบคุมและแสดงผลผ่านระบบสมาร์ทโฟน

3.3 การทดลองโดยนำชุดฮาร์ดแวร์การให้น้ำและปุ๋ยหญ้าโดยวางแผนการทดลองแบบ (RCBD) หญ้าที่ใช้ในการทดลองปลูกประกอบด้วยหญ้า 4 ชนิดคือ คือ นวลน้อย หญ้ามาเลเซีย หญ้าญี่ปุ่น และหญ้าเบอร์มิวด้าหรือหญ้าแพรก ปลูกในแปลงทดลองขนาด 1 ตารางเมตร 16 แปลง

โดยการให้ปุ๋ยตามสภาพดินแต่ละแปลงให้เหมาะสม ทำการเก็บและนำมาหาค่าอัตราการแพร่กระจายของหญ้า (เซนติเมตร) , ความสูง (เซนติเมตร), ความกว้างของใบ(เซนติเมตร) , ขนาดลำต้น(เซนติเมตร) และสีของใบ (การใช้เครื่องวัดคลอโรฟิลล์ในใบพืช CHLOROPHYLL METER) บันทึกและรายงานผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ทำการบันทึกข้อมูล อายุหญ้า 7, 14, 21, 28, 35วัน

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลจากการทดสอบระบบควบคุมในแปลงปลูกหญ้า

ผลการทดลองพบว่า ความสูงความกว้างของใบ, ขนาดลำต้นและสีของใบ (การใช้เครื่องวัดคลอโรฟิลล์ในใบพืช CHLOROPHYLL METER) ผลการทดลองดังตารางที่ 1-5 ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าเมื่ออายุครบ 7 วัน

พันธุ์หญ้า	อัตราการแพร่กระจายของหญ้า (เซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	ความกว้างของใบ มิลลิเมตร)	ขนาดลำต้น (มิลลิเมตร)	สีของใบ
หญ้านวลน้อย	7.05	6.35	2.50	0.40	16.17
หญ้ามาเลเซีย	7.47	**8.52**	**11.15**	**1.50**	**33.37**
หญ้าญี่ปุ่น	8.30	2.92	1.42	0.50	6.150
หญ้าเบอร์มิวด้า	**8.57**	5.87	2.30	0.85	10.62
F-test	*	*	*	*	*
CV%	1.87	1.56	1.89	1.25	3.15

ns = non significant * = significant at P<0.05 ** = significant at P<0.01

จากตารางที่ 1 พบว่าหญ้าเบอร์มิวด้ามีอัตราอัตราการแพร่กระจายของหญ้า มากที่สุด 8.57 เซนติเมตร ด้านความสูงหญ้ามาเลเซียมีความสูงมากที่สุด 8.52 เซนติเมตร ความกว้างของใบหญ้าหญ้ามาเลเซียมีความกว้างมากที่สุด 11.15 มิลิเมตร ขนาดของลำหญ้ามาเลเซียมีขนาดลำต้นมากที่สุด 1.50 มิลิเมตร สีของใบเมื่อวัดด้วย CHLOROPHYLL METER พบว่าหญ้ามาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 33.37

ตารางที่ 2 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าอายุครบ 14 วัน

พันธุ์หญ้า	อัตราการแพร่กระจายของหญ้า(เซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	ความกว้างของใบมิลลิเมตร)	ขนาดลำต้น (มิลลิเมตร)	สีของใบ
หญ้านวลน้อย	**14.07**	6.60	2.67	0.65	21.95
หญ้ามาเลเซีย	13.67	**9.15**	**11.40**	**1.52**	**39.80**
หญ้าญี่ปุ่น	10.97	4.22	1.52	0.70	9.77
หญ้าเบอร์มิวด้า	12.07	7.17	2.42	0.90	26.85
F-test	*	*	*	*	*
CV%	11.87	1.02	1.25	0.13	4.04

ns = non significant * = significant at P<0.05 ** = significant at P<0.01

จากตารางที่ 2 พบว่าหญ้านวลน้อยมีอัตราอัตราการแพร่กระจายของหญ้ามากที่สุด 14.07เซนติเมตร ด้านความสูงหญ้ามาเลเซียมีความสูงมากที่สุด 9.15 เซนติเมตร ความกว้างของใบหญ้าหญ้ามาเลเซียมีความกว้างมากที่สุด 11.40 มิลิเมตร ขนาดของลำหญ้ามาเลเซียมีขนาดลำต้นมากที่สุด 1.52 มิลิเมตร สีของใบเมื่อวัดด้วย CHLOROPHYLL METER พบว่าหญ้ามาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 39.80

ตารางที่ 3 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าอายุครบ 21 วัน

พันธุ์หญ้า	อัตราการแพร่กระจายของหญ้า(เซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	ความกว้างของใบ(มิลลิเมตร)	ขนาดลำต้น (มิลลิเมตร)	สีของใบ
หญ้านวลน้อย	16.80	7.50	2.65	0.77	21.27
หญ้ามาเลเซีย	**26.87**	**10.45**	**11.45**	**1.57**	**44.40**
หญ้าญี่ปุ่น	21.02	5.00	8.35	0.77	9.60
หญ้าเบอร์มิวด้า	21.50	8.50	3.65	0.68	23.60
F-test	*	*	*	*	*
CV%	13.95	1.25	18.15	2.04	1.76

ns = non significant * = significant at P<0.05 ** = significant at P<0.01

จากตารางที่ 3 พบว่าหญ้ามาเลเซียมีอัตราอัตราการแพร่กระจายของหญ้ามากที่สุด 26.87 เซนติเมตร ด้านความสูงหญ้ามาเลเซียมีความสูงมากที่สุด 10.45 เซนติเมตร ความกว้างของใบหญ้าหญ้ามาเลเซียมีความกว้างมากที่สุด 11.45 มิลิเมตร ขนาดของลำหญ้ามาเลเซียมีขนาดลำต้นมากที่สุด 1.57 มิลิเมตร สีของใบเมื่อวัดด้วย CHLOROPHYLL METER พบว่าหญ้ามาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 44.40

ตารางที่ 4 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าอายุครบ 28 วัน

พันธุ์หญ้า	อัตราการแพร่กระจายของหญ้า(เซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	ความกว้างของใบ มิลลิเมตร)	ขนาดลำต้น (มิลลิเมตร)	สีของใบ
หญ้านวลน้อย	19.12	7.85	2.67	0.78	22.47
หญ้ามาเลเซีย	**35.72**	**11.05**	**11.55**	**1.60**	**43.67**
หญ้าญี่ปุ่น	33.77	6.07	8.35	0.98	10.22
หญ้าเบอร์มิวด้า	33.77	9.55	3.60	0.78	19.25
F-test	*	*	*	*	*
CV%	24.03	1.46	0.18	2.05	41.08

ns = non significant * = significant at P<0.05 ** = significant at P<0.01

จากตารางที่ 4 พบว่าเมื่อหญ้าแต่ละสายพันธุ์อายุครบ 28 วัน พบว่าหญ้าญี่ปุ่นมีอัตราอัตราการแพร่กระจายของหญ้ามากที่สุด 35.72

เซนติเมตร ด้านความสูงหญ้ามาเลเซียมีความสูงมากที่สุด 11.05 เซนติเมตร ความกว้างของใบหญ้าหญ้ามาเลเซียมีความกว้างมากที่สุด 11.55 มิลิเมตร ขนาดของลำหญ้ามาเลเซียมีขนาดลำต้นมากที่สุด 1.60 มิลิเมตร สีของใบเมื่อวัดด้วย CHLOROPHYLL METER พบว่าหญ้ามาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 43.67

ตารางที่ 5 ผลการเจริญเติบโตของหญ้าแต่งละสายพันธุ์ อายุครบ 35 วันหลังปลูก

พันธุ์หญ้า	อัตราการแพร่กระจายของหญ้า(เซนติเมตร)	ความสูง (เซนติเมตร)	ความกว้างของใบ (มิลิเมตร)	ขนาดลำต้น (มิลลิเมตร)	สีของใบ
หญ้านวลน้อย	22.75	8.00	2.67	1.02	21.55
หญ้ามาเลเซีย	41.32	**11.37**	**11.87**	**1.57**	**42.30**
หญ้าญี่ปุ่น	**41.60**	6.40	4.95	0.95	10.02
หญ้าเบอร์มิวด้า	33.55	9.75	2.70	0.95	26.45
F-test	*	*	*	*	*
CV%	11.54	1.32	10.19	0.10	2.26

ns = non significant * = significant at P<0.05 ** = significant at P<0.01

จากตารางที่ 5 พบว่าผลการทดลองในการปลูกหญ้าเมื่อหญ้าแต่ละสายพันธุ์อายุครบ 35 วัน พบว่าหญ้าญี่ปุ่นมีอัตราอัตราการแพร่กระจายของหญ้ามากที่สุด 41.60 เซนติเมตร ด้านความสูงหญ้ามาเลเซียมีความสูงมากที่สุด 11.37 เซนติเมตร ความกว้างของใบหญ้าหญ้ามาเลเซียมีความกว้างมากที่สุด 11.87 มิลิเมตร ขนาดของลำหญ้ามาเลเซียมีขนาดลำต้นมากที่สุด 1.57 มิลิเมตร สีของใบเมื่อวัดด้วย CHLOROPHYLL METER พบว่าหญ้ามาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 42.30
มาเลเซียมีความหนาแน่นมากที่สุด 42.12

5. สรุป

สรุปผลการทดลองการเจริญเติบโตของหญ้า 4 ชนิด: การแพร่กระจายพื้นที่หญ้าเบอร์มิวด้า 51.77 ตร.ซม. (สูงสุด)หญ้าญี่ปุ่น 48.92 ตร.ซม.หญ้ามาเลเซีย 45.62 ตร.ซม.หญ้านวลน้อย 27.85 ตร.ซม. ความสูงหญ้ามาเลเซีย 11.57 ซม. (สูงสุด)หญ้าเบอร์มิวด้า 10.00 ซม.หญ้านวลน้อย 8.25 ซม.หญ้าญี่ปุ่น 6.65 ซม.ความกว้างใบหญ้ามาเลเซีย 11.95 มม. (กว้างสุด)หญ้าญี่ปุ่น 4.92 มม.หญ้าเบอร์มิวด้า 2.80 มม.หญ้านวลน้อย 2.70 มม.ขนาดลำต้น:หญ้ามาเลเซีย 1.57 มม. (ใหญ่สุด)หญ้าเบอร์มิวด้า 0.98 มม.หญ้านวลน้อย 0.95 มม.หญ้าญี่ปุ่น 0.95 มม.ความเขียวใบ (ค่าคลอโรฟิลล์)หญ้ามาเลเซีย 42.12 (สูงสุด)หญ้าเบอร์มิวด้า 27.92หญ้านวลน้อย 23.40หญ้าญี่ปุ่น 10.42ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหญ้าเบอร์มิวด้ามีการแพร่กระจายพื้นที่ได้ดีที่สุดหญ้ามาเลเซียโดดเด่นในด้านความสูง ความกว้างใบ ขนาดลำต้น และความเขียวของใบ พารามิเตอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานเกษตรกรรมขนาดใหญ่ได้ ระบบควบคุมน้ำและปุ๋ยอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดต้นทุนแรงงานและเวลา และส่งเสริมการเจริญเติบโตของหญ้าได้ดี โดยเฉพาะหญ้าเบอร์มิวด้าที่มีอัตราการแพร่กระจายดีที่สุด และหญ้ามาเลเซียที่มีความสูงและขนาดใบใหญ่ที่สุด อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดในด้านฟังก์ชันการทำงาน ดังนั้นในอนาคตควรมีการพัฒนาระบบให้สามารถเชื่อมโยงกับ Big Data และเพิ่มฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายขึ้น เพื่อใช้ในระบบการเกษตรอัจฉริยะต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] Beard, J. B. (2018). Turfgrass water conservation. John Wiley & Sons.

[2]Karcher, D. E., et al. (2020). "Optimizing irrigation frequency for turfgrass health." Journal of Environmental Horticulture, 38(2), 45-52.

[3] Samsuri, S., Ahmad, R. F. M., & Hussein, M. (2010). Development of nutrient solution mixing process on time-based drip fertigation system. In *AMS2010: Asia Modelling Symposium 2010 - 4th International Conference on Mathematical Modelling and Computer Simulation* (pp. 615–619). Kota Kinabalu, Malaysia.

[4] Steidle, N., Zolnier, S., & de Carvalho, L. D. (2014). Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*, *104*,1725. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.03.005

[1]Turgeon, A. J. (2019). Turfgrass management (10th ed.). Pearson Education.

[5] Yu, W., Jin, W., & Cao, X. (2015). Research and application of intelligent water and fertilizer irrigation system. *Jiangsu Agricultural Sciences*, *43*(6), 415–418.

[6] Wang, Z., & Ma, R. (2013). Discussion on the problems and countermeasures of developing precision agriculture in China. *Chinese Journal of Agricultural Machinery*, *34*(5), 6–19.

[7] Deng, X., & Weng, S. (2014). Design of intelligent water and fertilizer irrigation system based on Android platform. *Guangdong Agricultural Sciences*, *41*(9), 203–206.

[8] Zeng, W., Wu, Q., & Zhang, Y. (2017). Design of automatic fertigation system and research on data acquisition for citrus. *Henan Science*, *35*(1), 28–32.

[9] กรมส่งเสริมการเกษตร. (2563). คู่มือการดูแลสนามหญ้า. สำนักพิมพ์กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

[10] กรพัฒน์ ไชยพร, เอ็จ สโรบล, วิจารณ์ วิชชุกิจ, ปาริชาติ พรหมโชติ, & นพ ตัณมุขยกุล. (2015). การเปรียบเทียบการตอบสนองทางสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยาต่อสภาวะแล้งของหญ้าสมัท (Sporobolus indicus) และหญ้าประดับพันธุ์ต่างๆ ในสนามกอล์ฟ. *วารสารวิทยาการเกษตร*, *47*(3), 329–338.

[11] อรวิมล แก้วเกลี้ยง, สุพัตรา เปรมใจ, & วิไลลักษณ์ จันทร์ฉาย. (2556). ผลของปุ๋ยคอกมูลไก่และปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตของหญ้าหวาน Effects of chicken manure and chemical fertilizers on sweet grass growth. วารสารเกษตรศาสตร์, 35(2), 45-52.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบคลาวด์บริการสำหรับจัดการและติดตามอุปกรณ์ด้านมาตรวิทยา

Cloud Service for Equipment Management and Tracking Metrology System

สุนันติยา พาระนา[1*] นิติธร เคนโยธา[1] นรินทร์ จันทวงศ์[1,2] และ จริยา บัวเจริญ[1,2]
[1] ศูนย์การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย
[2] ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย
E-mail: sunantiyap@nimt.or.th[*]

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ได้พัฒนาระบบการจัดการและติดตามอุปกรณ์มาตรวิทยา (EMTs) ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับการจัดเก็บและติดตามข้อมูลผลการสอบเทียบในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล ระบบ EMTs มีฟังก์ชันหลักในการบริหารจัดการผู้ใช้งานและอุปกรณ์ พร้อมกับการบันทึกและติดตามสถานะการสอบเทียบและบำรุงรักษาเครื่องมือ ระบบนี้ช่วยให้การค้นหาเอกสารสะดวกขึ้น ลดข้อผิดพลาดจากการป้อนข้อมูลด้วยตนเอง และรองรับการจัดการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ระบบ EMTs จึงเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในภาคอุตสาหกรรมไทย เพื่อยกระดับการจัดการข้อมูลด้านมาตรวิทยาให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยยิ่งขึ้น พร้อมรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่ยุคดิจิทัลในอนาคต

คำสำคัญ: แพลตฟอร์มดิจิทัล, ความถูกต้อง, ความปลอดภัย, มาตรวิทยา, ยุคดิจิทัล

Abstract

Currently, the National Institute of Metrology Thailand (NIMT) has developed the Equipment Management and Tracking System (EMTs), a digital platform for storing and tracking calibration results in electronic form. This system is designed in accordance with ISO/IEC 17025 standards to ensure data accuracy and security. The main functionalities of EMTs include user and equipment management, as well as recording and tracking the calibration and maintenance status of instruments. The system improves document retrieval efficiency, reduces errors from manual data entry, and supports effective data management. Furthermore, EMTs serves as a model that can be applied in Thailand's industrial sector to enhance the efficiency and security of metrological data management, while also facilitating the transition to a digital era in the future.

Keywords: Digital Platform, Accuracy, Security, Metrological, Digital Era

1. บทนำ

การก้าวเข้ามามีบทบาทของเทคโนโลยีดิจิทัลได้เปลี่ยนแปลงวิธีการดำเนินงานในอุตสาหกรรมมาตรวิทยาหลายด้านอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเทคโนโลยีดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการยกระดับความแม่นยำ การตรวจสอบย้อนกลับ และประสิทธิภาพในการบริหารจัดการข้อมูลมาตรวิทยาให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญของการควบคุมคุณภาพและการพัฒนามาตรฐานการผลิตในภาคอุตสาหกรรม [1-2] โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจและมีพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ก็คือ ระบบการจัดการข้อมูลแบบคลาวด์ (Cloud Data Management System)โดยมีข้อดีในด้านการเข้าถึงข้อมูลได้สะดวก การขยายพื้นที่จัดเก็บข้อมูลอย่างยืดหยุ่นและการรักษาความปลอดภัยที่เข้มงวด นอกจากนี้ ระบบคลาวด์ยังช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนข้อมูลด้วยตนเองผ่านการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ และการบูรณาการข้อมูลแบบเรียลไทม์ [3] ทาง Mignonette B. Tungcul และ Marifel Grace C. Kummer ได้พัฒนาระบบ SEIMTMs ขึ้นเพื่อใช้ในแผนกจัดซื้อและจัดเก็บสินค้า โดยเปลี่ยนการจัดเก็บข้อมูลแบบเดิมที่ใช้กระดาษมาเป็นระบบดิจิทัล ซึ่งระบบนี้ช่วยให้เจ้าหน้าที่จัดซื้อและผู้บริหารสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลต่อการตัดสินใจและการจัดสรรงบประมาณที่แม่นยำและเหมาะสมยิ่งขึ้น [4]

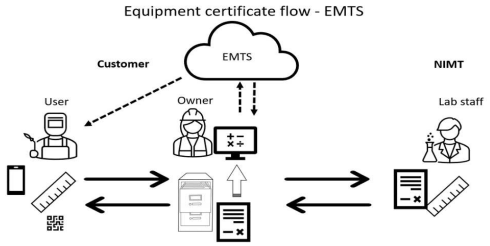
ปัจจุบันการจัดการและประมวลผลข้อมูลการสอบเทียบของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ส่วนใหญ่ที่ยังอาศัยกระบวนการแบบดั้งเดิม นั่นคือ ข้อมูลมักถูกเก็บไว้ในรูปแบบเอกสาร กระดาษ หรือระบบ

ฐานข้อมูลแบบรวมศูนย์ (Centralized Database) ซึ่งมีข้อจำกัดหลายประการ ส่งผลให้ความล่าช้าในการเข้าถึงข้อมูล การสูญหายของข้อมูล เนื่องจากการค้นหาเอกสารนั้นขึ้นอยู่กับทักษะของแต่ละบุคคล ซึ่งอาจมีข้อผิดพลาดของมนุษย์ในการค้นหา [5-6] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้ทางกลุ่มวิจัย มว. จึงได้พัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับจัดการฐานข้อมูลและติดตามสถานะในการจัดเก็บข้อมูลอุปกรณ์วัดต่าง ๆ ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาที่เรียกว่า ระบบจัดการและติดตามอุปกรณ์มาตรวิทยา (Equipment Management and Tracking System; EMTs) ซึ่งการออกแบบระบบ EMTs ถูกอ้างอิงตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO/IEC 17025: 2017 ที่ประกอบไปด้วย ไม่ว่าจะเป็น ชื่อเจ้าของเครื่องมือ วันที่เริ่มทำการสอบเทียบหรือวันที่สิ้นสุดการสอบเทียบ เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อกำหนดทั่วไปสำหรับความสามารถของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ [7] โดยระบบ EMTs เป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับแก้ปัญหาการจัดเก็บใบรับรองการสอบเทียบ วัตถุประสงค์หลักของระบบ EMTs คือ การจัดเก็บใบรับรองการสอบเทียบของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ และยังเป็นระบบที่เพิ่มความสะดวก ลดความยุ่งยากในการจัดเก็บเอกสาร นอกจากนี้ยังลดเวลาค้นหาเอกสารง่าย เพิ่มความเป็นส่วนตัว และความปลอดภัยของข้อมูล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบฐานข้อมูลบนแพลตฟอร์มคลาวด์ สำหรับการบริหารจัดการใบรับรองการสอบเทียบในงานอุตสาหกรรมมาตรวิทยา เพื่อเป็นต้นแบบที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรมของไทย ให้สอดรับกับการพัฒนาเศรษฐกิจยุคใหม่ ทั้งนี้ การพัฒนาระบบ EMTs ต้องอาศัยหลักการจัดการข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อกำหนดโครงสร้างข้อมูลและวิธีการจัดเก็บอย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

2. กลไกการทำงานของระบบ EMTs

ระบบ EMTs เป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลที่พัฒนาโดย มว. ซึ่งเป็นระบบที่เปิดให้ใช้งานในรูปแบบโอเพนซอร์ส เพื่ออำนวยความสะดวกในการจัดเก็บข้อมูลผลการสอบเทียบและข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องมือวัดในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ทั้งในหน่วยงานภาครัฐและเอกชน ภายใต้การกำกับดูแลของ มว. การออกแบบดังกล่าวสอดคล้องกับ ISO/IEC 17025: 2017 เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่แสดงในระบบมีความถูกต้องและครบถ้วนตามหลักวิชาการ [7-8] รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างการจัดการข้อมูลของระบบ โดยหลังจากที่เจ้าของอุปกรณ์ได้รับอุปกรณ์พร้อมเอกสารรับรองผลการสอบเทียบแล้ว จะทำการบันทึกเอกสารและข้อมูลดังกล่าวในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ลงในระบบ EMTs จากนั้นจึงส่งอุปกรณ์ไปยังผู้ใช้งาน หากผู้ใช้งานที่มีสิทธิ์เข้าถึงข้อมูลต้องการตรวจสอบผลการสอบเทียบ ก็สามารถเข้าสู่ระบบ EMTs และค้นหาข้อมูลของเครื่องมือวัดที่ต้องการได้ ประโยชน์ของระบบนี้ ได้แก่ การค้นหาเอกสารที่สะดวกและรวดเร็ว รวมถึงการรักษาความเป็นส่วนตัวและความปลอดภัยของข้อมูล [8]

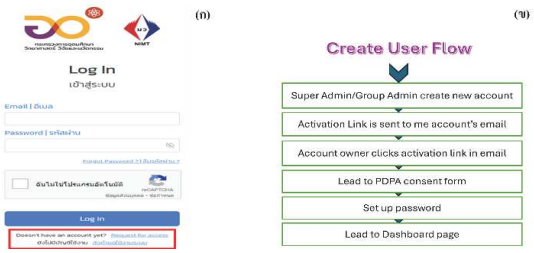


รูปที่ 1 ระบบการจัดการการจัดเก็บข้อมูลของระบบ EMTs

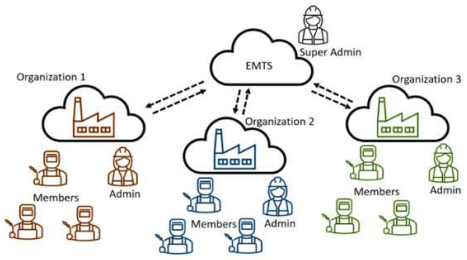
3. การใช้งานกระบวนการของระบบ EMTs

การใช้งานกระบวนการของระบบ EMTs ผู้ใช้จะต้องทำการลงทะเบียน EMTs ซึ่งผู้เขียนจะอธิบายแนวทางการทำงานของระบบดังต่อไปนี้ [9-10]

1. การขอเข้าถึงการใช้งานระบบ EMTs: ผู้ใช้จะต้องกรอกข้อมูลคำขอในแบบฟอร์มผ่านเว็บไซต์ https://emt.nimt.or.th การเข้าถึงจะปรากฏบนหน้าเข้าสู่ระบบของระบบดังที่แสดงใน รูปที่ 2 (ก) จากนั้นผู้ดูแลระบบจะทำการสร้างบัญชีให้แก่ผู้ใช้ และผู้ใช้จะได้รับอีเมลยืนยันตัวตนและสามารถเข้าสู่ระบบเพื่อเข้าใช้งาน ตามที่แสดงใน รูปที่ 2 (ข)



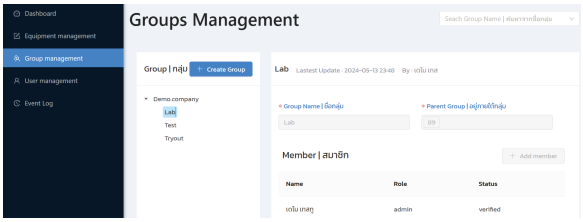
รูปที่ 2 (ก) ลิงก์สำหรับขอเข้าถึงการใช้งานระบบ EMTs และ (ข) แผนภาพการสร้างบัญชีผู้ใช้



รูปที่ 3 แผนภาพผู้ใช้งานภายใต้ระบบ EMTs

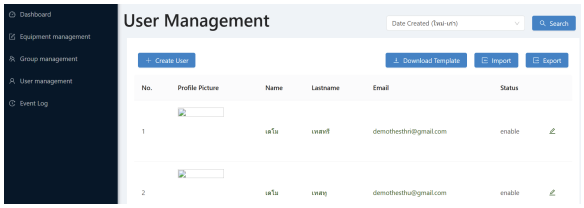
ระบบ EMTs มีบทบาทโครงสร้างกลุ่มที่สร้างในระบบดังที่แสดงใน รูปที่ 3 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1. ผู้ดูแลระบบขั้นสูง (Super Admin) คือเจ้าหน้าที่จาก มว. ที่จะดูแลภาพรวมของระบบ EMTs นอกจากนี้ยังต้องรับคำขอจากองค์กรต่างๆ และต้องมอบหมายบทบาทผู้ดูแลระบบ (Admin) ให้กับแต่ละองค์กร 2. ผู้ดูแล (Admin) พนักงานหรือเจ้าหน้าที่ขององค์กรที่เข้าถึงระบบ EMTs พวกเขาจะสามารถสร้างและแก้ไขกลุ่มของตน บัญชีผู้ใช้ และอุปกรณ์ของกลุ่มตน รวมถึงการจัดการกลุ่มย่อย และ 3. สมาชิก (Member) คือ พนักงานหรือเจ้าหน้าที่ขององค์กรที่เข้าถึงระบบ EMTs พวกเขาจะสามารถดูอุปกรณ์ของกลุ่มตนและอุปกรณ์ของกลุ่มย่อยได้เท่านั้น แต่หากเป็นสมาชิกที่รับผิดชอบ จะสามารถแก้ไขข้อมูลอุปกรณ์ได้ [10]

2. การจัดการกลุ่ม (Group Management): ฟังก์ชันการจัดการกลุ่มเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการบริหารจัดการโครงสร้างกลุ่มภายในองค์กร โดยผู้ใช้สามารถสร้างกลุ่มใหม่ แก้ไขข้อมูล เพิ่มหรือลบสมาชิก และปรับเปลี่ยนรายละเอียดต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมของหน่วยงาน นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการแบ่งกลุ่มย่อยในรูปแบบลำดับชั้น (Hierarchy) เพื่อให้การบริหารจัดการมีความยืดหยุ่นและเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ฟังก์ชันดังกล่าวมีบทบาทสำคัญในการช่วยควบคุมการเข้าถึงข้อมูลและสนับสนุนการดำเนินงานขององค์กรให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยยิ่งขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4



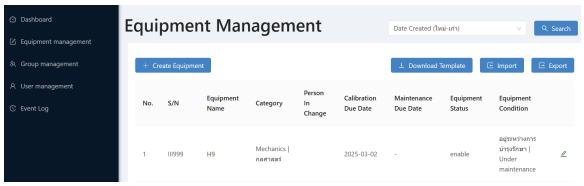
รูปที่ 4 รายละเอียดการบริหารจัดการกลุ่ม

3. การจัดการผู้ใช้งานระบบ (User Management): ฟังก์ชันนี้ใช้สำหรับจัดการบัญชีผู้ใช้งาน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้ดูแลระบบสามารถบริหารจัดการบัญชีผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ฟังก์ชันหลักประกอบด้วยการสร้างบัญชี การแสดงรายชื่อผู้ใช้งาน การปรับเปลี่ยนและลบบัญชีผู้ใช้งาน รวมถึงการตรวจสอบการใช้งาน ทั้งนี้ ระบบจะกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงให้เหมาะสมกับบทบาทของผู้ใช้งานเพื่อลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต ฟังก์ชันการจัดการผู้ใช้งานจึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยเสริมสร้างความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล โดยเฉพาะในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับมาตรวิทยา ซึ่งต้องอาศัยความน่าเชื่อถือของข้อมูลเป็นหลัก ดังแสดงในรูปที่ 5



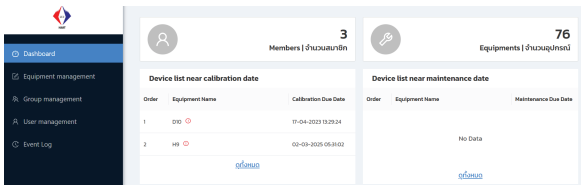
รูปที่ 5 รายละเอียดการจัดการผู้ใช้งานระบบ

4. การจัดการเครื่องมือ (Equipment Management): ฟังก์ชันการนี้มีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในองค์กร การจัดการเครื่องมือช่วยให้องค์กรสามารถเก็บข้อมูลและติดตามสถานะของเครื่องมือแต่ละรายการอย่างเป็นระบบ องค์ประกอบหลักของระบบการจัดการเครื่องมือประกอบด้วย การบันทึกข้อมูลเครื่องมือ การติดตามสถานะการสอบเทียบ การวางแผนและติดตามการบำรุงรักษา การตรวจสอบสถานะของเครื่องมือ การค้นหาข้อมูลเครื่องมือ และการสร้างรายงานต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบและติดตามการบำรุงรักษาและสอบเทียบได้อย่างแม่นยำ รวมถึงการให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการตัดสินใจและการวางแผนการดำเนินงานในองค์กร นอกจากนี้ ฟังก์ชันนี้ของระบบการจัดการเครื่องมือช่วยลดความเสี่ยงจากการขาดการสอบเทียบหรือบำรุงรักษา ดังที่แสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 รายละเอียดการจัดการเครื่องมือ

5. หน้าจอแสดงข้อมูลภาพรวม (Dashboard): ฟังก์ชันนี้แสดงข้อมูลสรุปสถานะปัจจุบันของระบบ เช่น จำนวนสมาชิก จำนวนอุปกรณ์ อุปกรณ์ที่ใกล้ครบกำหนดสอบเทียบหรือบำรุงรักษา รวมถึงการจำแนกอุปกรณ์ตามสถานะการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 รายละเอียดหน้าจอแสดงข้อมูลภาพรวมของระบบ EMTs

ระบบนี้ได้มีการทดสอบการยอมรับจากผู้ใช้งาน จำนวน 50 คน จากชมรมมาตรวิทยา (หน่วยงานเอกชน) ผลการตอบกลับแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้งานระบบ แสดงรายละเอียดตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการตอบกลับแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้ใช้งานระบบ

รายการแบบสอบถาม	ค่าเฉลี่ย	คุณภาพ
1. ระบบมีความรวดเร็วในการค้นหา	4	ดี
2. ฟังก์ชันเพียงพอต่อการใช้งาน	4	ดี
3. การจัดรูปแบบระบบง่ายต่อการใช้งาน	4	ดี
4. ระบบมีความทันสมัย น่าสนใจ	3.5	ปานกลาง
5. ระบบมีความรวดเร็วในการแสดงข้อมูล	5	ดีมาก
6. ระบบมีการใช้ภาษาที่ง่ายต่อการใช้งาน	3.5	ปานกลาง

จากการวิเคราะห์แบบตอบกลับของผู้ใช้งาน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพดี โดยเฉพาะด้านความรวดเร็วในการค้นหาและแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งเป็นจุดแข็งของเทคโนโลยีคลาวด์ ฟังก์ชันการใช้งานครบถ้วน ใช้งานง่าย เหมาะสมกับงานด้านมาตรวิทยาที่ต้องการความแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อเสนอแนะให้ปรับปรุงการใช้ภาษาบางส่วนให้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยรวมถือว่าเป็นระบบที่ตอบโจทย์และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุป

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้พัฒนาระบบ EMTs เป็นแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับบริหารจัดการและติดตามข้อมูลอุปกรณ์มาตรวิทยา โดยมีเป้าหมายเพื่อแก้ปัญหาการจัดเก็บใบรับรองการสอบเทียบแบบเดิม ระบบช่วยจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 เพิ่มความถูกต้องและปลอดภัยในการใช้งาน มีฟังก์ชันบริหารจัดการผู้ใช้และอุปกรณ์แบบลำดับชั้น พร้อม Dashboard ที่ใช้งานสะดวก แม้ยังมีบางจุดที่ควรปรับปรุงด้านภาษา แต่โดยรวมถือเป็นต้นแบบที่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม และรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่งานมาตรวิทยายุคดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Hess, C. Matt, A. Benlian and F. Wiesböck. "Options for Formulating a Digital Transformation Strategy," MIS Q. Executive, vol. 15(2), pp. 123–139, 2016.

[2] L. Benavides, J. Tamayo Arias, M. Arango Serna, B. Branch and D. Burgos. "Digital Transformation in Higher Education Institutions: A Systematic Literature Review," Sensors, vol. 20(11): 3291, 2020.

[3] J. I. Maletic, and A. Marcus. "Data cleansing: Beyond integrity analysis," In Proceedings of the Conference on Information Quality (IQ2000), pp. 200-209, 2000.

[4] Tungkul, M. B., and Marifel Grace C. Kummer. "Supplies and equipment inventory, monitoring and tracking management system using data mining techniques." International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) 10.2 (2021): 81-85.

[5] H. Müller, and J. C. Freytag. "Problems, methods, and challenges in comprehensive data cleansing," Humboldt-Universität zu Berlin, 10099, 2005.

[6] J. L. Guasch, J. L. Racine, I. Sanchez and M. Diop. "Quality Systems and Standards for a Competitive Edge," The World Bank: Washington, DC, USA, 2007.

[7] S. Parana, P. Thongluang, N. Chanthawong and J. Buajarern. "Analyzing the Conformance of DCC Prototype Architecture to Calibration Laboratory Expectations Report," Proceeding of 3rd International DCC Conference, pp. 471-479, 2023.

[8] O. Alexander, E. Samuel, E. John, B. Thomas, B. Matthias, N. Rolf, H. Wiebke, B. Oksana and B. Clifford. "Digital Transformation in Metrology: Building a Metrological Service Ecosystem," 3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Procedia Computer Science, vol. 200, pp. 308-317, 2022.

[9] SmartCom, 2018. SmartCom - Communication and validation of smart data in IoT-networks. Online document https://www.ptb.de/empir2018/smartcom/project/.

[10] DIN EN ISO/IEC 17025, 2000. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Standard. International Organization for Standardization. Geneva, CH.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประยุกต์ใช้ระบบการรู้จำอักขระด้วยแสงสำหรับบันทึกผลและเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ

Application of Optical Character Recognition system for recording and comparing temperature values in laboratory

พิทยา จุฬาเต่า[1,*] นฤสรณ์ แน่นหนา[1] นิติธร เคนโยธา[1] นรินทร์ จันทวงศ์[1,2] และ จริยา บัวเจริญ[1]
[1]ศูนย์การเปลี่ยนแปลงด้านดิจิทัล ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
[2]กลุ่มงานมาตรวิทยานาโน ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
E-mail: pithayaj@nimt.or.th[*]

บทคัดย่อ

การควบคุมอุณหภูมิมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเชื่อถือของการสอบเทียบ ในงานนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการด้วยเทคโนโลยีการรู้จำอักขระด้วยแสงและทำการเปรียบเทียบข้อมูลของอุณหภูมิจากตัววัดอุณหภูมิมาตรฐานและตัววัดอุณหภูมิเปรียบเทียบ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการสอบเทียบ และลดภาระงานภายในห้องปฏิบัติการ จากผลการศึกษาพบว่าสามารถช่วยลดขั้นตอนการทำงานและลดข้อผิดพลาดพลาดในการบันทึกข้อมูล โดยมีความแม่นยำในสภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุมที่ 100% และมีความแม่นยำในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมที่ 74%

คำสำคัญ: การรู้จำอักขระด้วยแสง, การเปรียบเทียบ, มาตรวิทยา

Abstract

Temperature control is crucial for the reliability of calibration. This study aims to develop a data recording system for laboratory temperature using Optical Character Recognition (OCR) technology and to compare temperature data from a standard temperature sensor and a reference temperature sensor. The goal is to enhance the efficiency of the calibration process and reduce the workload within the laboratory. The study results indicate that the system can streamline workflow and minimize recording errors, achieving 100% accuracy in controlled environments and 74% accuracy in uncontrolled environments.

Keywords: optical character recognition, comparison, metrology

1. บทนำ

ปัจจุบันในห้องปฏิบัติการมาตรวิทยา การตรวจสอบและบันทึกสภาพแวดล้อมอย่างเช่นอุณหภูมิ มีบทบาทสำคัญในต่อการสอบเทียบและการรับรองความถูกต้อง รวมถึงความน่าเชื่อถือของกระบวนการสอบเทียบ ในการสอบเทียบต่างๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอาจส่งผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องมือที่ละเอียดอ่อน และความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูลอาจนำไปสู่ข้อผิดพลาดในการสอบเทียบและผลการทดลองที่ลดลง โดยทั่วไปบุคลากรในห้องปฏิบัติการจะอาศัยวิธีการแบบแมนนวล เป็นแนวทางที่มีความเสี่ยงต่อข้อผิดพลาดของมนุษย์และส่งผลต่ออุณหภูมิที่แท้จริงของห้องปฏิบัติการนั้นๆ ข้อผิดพลาดในการบันทึก ซึ่งเป็นหนึ่งในประเด็นสำคัญของการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบการสอบเทียบภายในห้องปฏิบัติการทดสอบ [1]

ความก้าวหน้าด้านเทคโนโลยีดิจิทัลได้นำทางไปสู่การผสานรวมระบบอัตโนมัติเพื่อตอบรับกับความท้าทายนี้ แนวทางหนึ่งที่มีแนวโน้มอย่างดีคือการใช้เทคโนโลยีการรู้จำอักขระด้วยแสง (Optical Character Recognition หรือ OCR) ซึ่งช่วยให้สามารถแปลงข้อความเป็นข้อมูลที่อ่านได้ ระบบ OCR นำเสนอแนวทางที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการจับค่าอุณหภูมิโดยอัตโนมัติโดยตรงจากจอแสดงผลการวัดหรือบันทึก ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาการป้อนข้อมูลด้วยมือและลดข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องได้มากขึ้นจากเดิม [2] โดยระบบ OCR ถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการต่างๆ เช่น การรู้จำอักขระด้วยแสงช่วยให้สามารถรู้จำอักขระข้อความจากภาพดิจิทัล เอกสารที่สแกนที่เป็นภาษาอาหรับ [3] หรือ การตรวจสอบที่จำเป็นสำหรับระบบการรู้จำอักขระด้วยแสงสำหรับการใช้งานในยานพาหนะ [4]

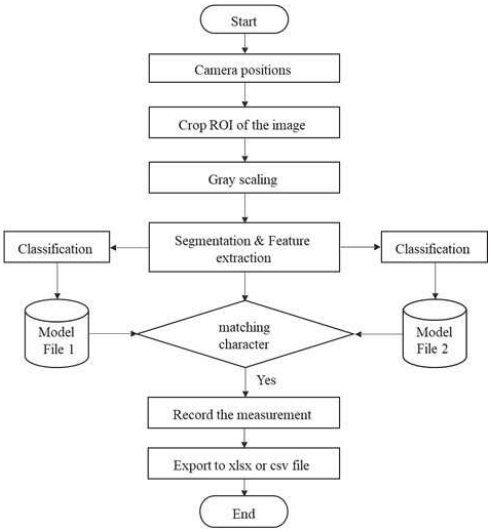
บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำระบบ OCR มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ โดยมุ่งเน้นการทำให้เกิดการทำงานแบบอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ

ห้องปฏิบัติการมาตรวิทยา และให้สอดคล้องตามมาตรฐานสากล ISO/IEC 17025 สำหรับห้องปฏิบัติการสอบเทียบ [5] ในการพัฒนาและนำระบบนี้ไปใช้ในห้องปฏิบัติการ

2. การออกแบบและกระบวนการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

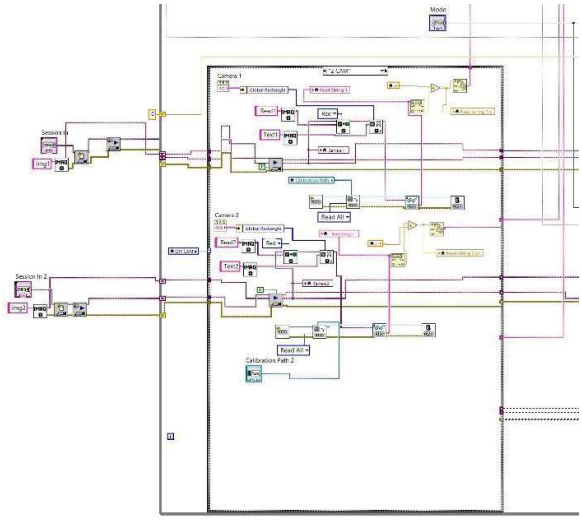
กระบวนการนี้เริ่มต้นด้วยการเตรียมระบบกล้องคู่และการตั้งค่าโปรแกรม LabVIEW ให้สามารถรับข้อมูลจากกล้องทั้งสองได้พร้อมกัน หลังจากนั้นจะทำการเชื่อมต่อกล้องและฝึกฝนระบบให้สามารถอ่านและรู้จำอักขระได้ถูกต้อง ซึ่งรวมไปถึงกระบวนการประมวลผลภาพ (Image Processing) ที่ช่วยลดข้อผิดพลาดในการบันทึกข้อมูลจากสิ่งรบกวนภายนอก เช่น แสงสะท้อน เป็นต้น เมื่อระบบพร้อมแล้ว จะทำการอ่านค่าจากกล้องทั้งสอง เปรียบเทียบค่าที่ได้ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างเครื่องมือมาตรฐานกับเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบ และสุดท้ายบันทึกผลลัพธ์ลงในไฟล์ Excel หรือ CSV แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการดำเนินการในการออกแบบและการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการ

2.2 การออกแบบโปรแกรมสำหรับอ่านหน้าจอและบันทึกค่า

ในส่วนของการออกแบบนั้นได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อให้สามารถจับภาพและสามารถอ่านค่าออกมาได้ แสดงดังรูปที่ 2 โดยการเชื่อมต่อกับกล้องได้อย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นกล้องสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กล้องโทรศัพท์มือถือ หรือกล้องในรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์พกพาได้ อีกทั้งยังสามารถออกแบบให้ระบบนี้ทำงานแบบ Real-Time หรือเก็บข้อมูลภาพไว้สำหรับวิเคราะห์ภายหลัง เพื่อวิเคราะห์ในภายหลังได้อีกด้วย



รูปที่ 2 การออกแบบโปรแกรมอ่านค่า 2 หน้าจอด้วย LabVIEW

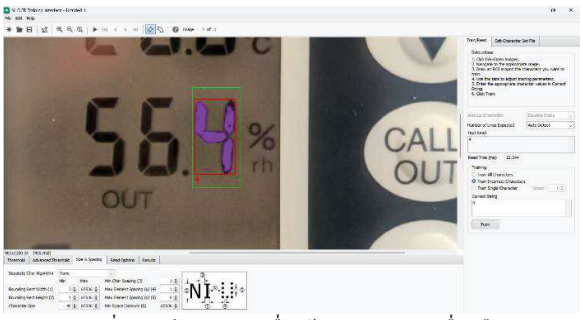
แสดงส่วนของการออกแบบโปรแกรม LabVIEW สำหรับการอ่านค่าจากกล้อง 2 ตัว โดยแต่ละกล้องจะมีการกำหนดพื้นที่สนใจ (ROI - Global Rectangle) เพื่ออ่านค่าบางอย่าง (Read String) โดยในการวิจัยครั้งนี้ให้อ่านค่าของตัวเลขที่เป็นเซเว่นเซกเมนต์ จากหน้าจอที่กล้องนั้นๆ จับภาพได้ ข้อมูลที่อ่านได้จากแต่ละกล้อง (Text1 IMAQ, Text2 IMAQ) จะถูกนำไปเปรียบเทียบค่าและบันทึกลงในระบบ ซึ่งจะออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel

2.3 รูปแบบการเก็บข้อมูลด้วย Excel

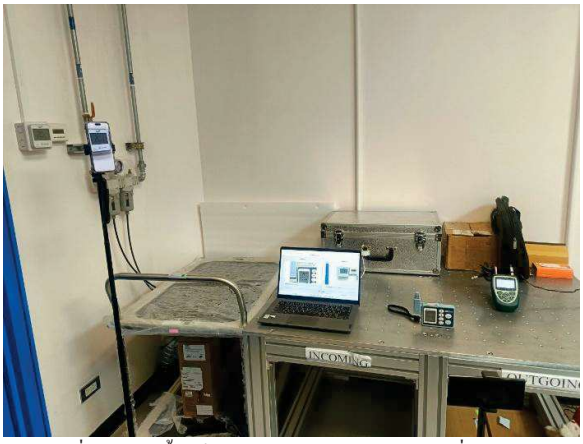
เนื่องจาก มว. ได้มีการออกใบรับรองผลในรูปแบบของไฟล์ Excel เป็นส่วนใหญ่อยู่แล้ว เพื่อให้สอดคล้องต่อการพัฒนาและการนำไปใช้งานต่อได้อย่างสะดวกมากขึ้น จึงออกมาในรูปแบบของไฟล์ Excel และ CSV อีกทั้งการใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่น: Excel และ CSV เป็นรูปแบบไฟล์มาตรฐานที่โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูล, โปรแกรมสถิติ, โปรแกรมทำรายงาน, หรือแม้แต่โปรแกรมสำนักงานทั่วไปสามารถเปิดและใช้งานได้อย่างง่ายดาย ทำให้ผู้ใช้สามารถนำข้อมูลที่ได้จาก LabVIEW ไปวิเคราะห์หรือประมวลผลต่อได้อย่างสะดวก ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นและอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้งานในการจัดการและนำข้อมูลที่ได้จากการวัดและควบคุมไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย

2.4 การฝึกตัวอักษรเพื่อให้โปรแกรมสามารถอ่านค่าของเครื่องมือวัด

ในการฝึกตัวอักษรสำหรับโปรแกรม LabVIEW เพื่ออ่านค่าจากเครื่องมือและสร้างเป็นไฟล์ข้อมูลเกี่ยวข้องกับการสอนให้ระบบ Vision ของ LabVIEW แสดงดังรูปที่ 3 สามารถจดจำและตีความสัญลักษณ์หรือตัวอักษรที่ปรากฏบนหน้าจอหรือแสดงผลของเครื่องมือได้อย่างถูกต้องตามที่อุปกรณ์จัดไว้แสดงดังรูปที่ 4 โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะเก็บจากเลข 0-9 และจากนั้นก็กำหนดจำนวนตำแหน่งที่จะแสดงผล เช่น 2 ตำแหน่ง 3 ตำแหน่ง หรือ 4 ตำแหน่ง ภาพต่อนาทีจากนั้นนำคุณสมบัตินี้ไปสร้างเป็นโมเดลหรือไฟล์ต้นแบบ (Template) โดยความสามารถในการอ่านตัวอักษรของโปรแกรมนั้นจะขึ้นกับระบบประมวลผล (Processing Hardware) ที่ใช้ในการดำเนินงานและการกำหนดค่าความเร็วในการอ่านที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการอ่านหรือตรวจจับขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ในการตรวจจับด้วย เช่น กล้อง เป็นต้น หากมีความสามารถในการตรวจจับภาพที่สูง (frame rate capture) ก็จะสามารถตรวจจับได้ในการทำงานที่ต้องใช้ความเร็วในการตรวจจับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่ต่อการนำไปใช้ในแต่ละเครื่องมือ



รูปที่ 3 การฝึกตัวอักษรเพื่อใช้สำหรับอ่านค่าเครื่องมือ



รูปที่ 4 การติดตั้งกล้องสำหรับอ่านค่าอุณหภูมิจากเครื่องมือวัด

2.5 สมการสำหรับการเปรียบเทียบค่าการวัด

สำหรับกระบวนการในการเปรียบเทียบค่าจากการอ่านค่าด้วยโปรแกรมผ่านสมการ (1) โดยการอ่านค่าจากกล้องที่ 1และ กล้องที่ 2 นำมาเปรียบเทียบกัน

$$S - UUC = C \quad (1)$$

Standard (S) หมายถึง ค่าที่อ่านได้จากกล้องตัวที่ 1 เป็นที่ค่าที่เครื่องมือมาตรฐานอ่านค่าได้

Unit Under Calibration (UUC) หมายถึง ค่าที่อ่านได้จากกล้องตัวที่ 2 เป็นค่าที่เครื่องมือที่นำมาสอบเทียบอ่านได้

Comparison (C) หมายถึง ผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบ ค่าที่ได้จากกล้องทั้งสอง

3. ผลการทดสอบ

จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากกล้อง 1 และกล้อง 2 โดยโปรแกรม LabVIEW พบว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากทั้งสองเครื่องมีความสอดคล้องกันและมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงเวลาที่ทำการบันทึกข้อมูล แสดงให้เห็นว่าระบบการอ่านค่าอุณหภูมิจากทั้งสองกล้องให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกันในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการอ่านค่าด้วยโปรแกรม LabVIEW

Date	Camera 1	Camera 2
03/18/2025 09:30	20.8	20.8
03/18/2025 09:32	20.9	20.7
03/18/2025 09:34	20.5	20.4
03/18/2025 09:36	20.5	20.4
03/18/2025 09:38	20.3	20.4
03/18/2025 09:40	20.3	20.1
03/18/2025 09:42	20.1	20.1
03/18/2025 09:44	20.0	20.1
03/18/2025 09:46	20.2	20.2
03/18/2025 09:48	20.1	20.3
03/18/2025 09:50	20.3	20.4
03/18/2025 09:52	20.5	20.6
03/18/2025 09:54	20.7	20.7
03/18/2025 09:56	20.5	20.5
03/18/2025 09:58	20.3	20.4

นอกจากนั้นจึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวัดด้วยระบบ OCR โดยได้ทำการสุ่มภาพที่มีค่าผลการวัดขึ้นมา 50 ภาพ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและประเมินประสิทธิภาพการทำงาน ซึ่งได้ทำการประเมินจากสภาวะแวดล้อมของการวัด ได้แก่ การควบคุมสภาวะแวดล้อมในการวัด และการไม่ควบคุมสภาวะแวดล้อมในการวัด โดยการควบคุมสภาวะแวดล้อมคือการเพิ่มแสงที่จุดวัด ขณะที่การไม่ควบคุมไม่ได้เพิ่มแหล่งแสง ซึ่งผลแสดงดังตารางที่ 2 โดยมีความแม่นยำที่สภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุมที่ 100% และมีความแม่นยำที่สภาวะแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมที่ 74%

ตารางที่ 2 การประเมินค่าความแม่นยำของการวัด

Controlled Environment	Uncontrolled Environment
100%	74%

4. สรุป

โดยสรุปงานวิจัยนี้เป็นการใช้งานร่วมกันของเทคโนโลยี OCR และขั้นตอนกระบวนการสอบเทียบด้วยการใช้กล้องเพื่ออ่านค่าของเครื่องมือวัดเพื่อลดเวลาและข้อผิดพลาดของการสอบเทียบ โดยจากผลการนำไปประยุกต์ใช้พบว่าสามารถช่วยลดความผิดพลาดแทนการจดบันทึกผลการวัดด้วยมือ และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของห้องปฏิบัติการด้านมาตรวิทยา อย่างไรก็ตามข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัดในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีการควบคุมจำเป็นที่จะต้องได้รับการแก้ไขในอนาคต ได้แก่ การเพิ่มชุดข้อมูลและสภาวะแวดล้อมในการฝึก การเพิ่มอุปกรณ์สำหรับลดสิ่งรบกวนในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น ทั้งนี้แนวทางการประยุกต์ใช้ยังสามารถพัฒนาต่อได้ทั้งในด้านของอุตสาหกรรมที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ หรือระบบ IoT สำหรับติดตามข้อมูลแบบเรียลไทม์ และในการเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการอ่านข้อมูลที่หลากหลายในอนาคตอาจมีการใช้งานร่วมกันกับ AI เพื่อใช้ในการปรับปรุงความแม่นยำและความสามารถของระบบ OCR ในการอ่านค่าจากอุปกรณ์ที่หลากหลาย หรือในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม(สกสว.) ปีงบประมาณ 2568

เอกสารอ้างอิง

[1] I. Task, Force E, “Guidelines for the Determination of Recalibration Intervals of Measuring Equipment Used in Testing Laboratories,” OIML International Document, No. 10, International Organization for Legal Metrology, Paris, France, 1984.

[2] Ray, S., & Banerjee, P., "Advancements in AI-Integrated OCR Technologies," International Journal of Computer Vision & AI, vol. 11, no. 3, pp. 120-134, 2021.

[3] Faizullah, S., Ayub, M. S., Hussain, S., & Khan, M. A., “A survey of OCR in Arabic language: applications” techniques, and challenges. Applied Sciences, vol. 13, no 7, pp 4584, 2023.

[4] Bansal, S., Gupta, M., & Tyagi, A. K.,"A necessary review on optical character recognition (OCR) system for vehicular applications" In 2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), pp. 918-922. IEEE.

[5] Honsa, J. D., & McIntyre, D. A., “ISO 17025: practical benefits of implementing a quality system” Journal of AOAC International, vol 86, No 5, 1038-1044, 2003.

Development of a Protocol for Particle Number Concentration Measurement Using Laser Scanning Confocal Microscopy

Benjarat Ngansalung * and Jariya Buajarern

Nanometrology Group, Department of Dimensional Metrology, National Institute of Metrology (Thailand), 3/4-5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand
E-mail: benjaratn@nimt.or.th *

Abstract

The accurate determination of particle number concentration is crucial in various fields, including clinical diagnostics, pharmaceutical quality control, and metrological standardization. Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) has emerged as a promising technique for particle concentration measurement due to its ability to provide high-resolution three-dimensional imaging. However, sample preparation and data analysis processes may introduce significant measurement biases and uncertainties.

This study aims to develop a protocol for sample preparation in LSCM particle number concentration measurements by systematically evaluating these key factors. Different sample preparation methods, magnification levels, and image processing techniques were assessed

Additionally, the results obtained using the developed protocol are compared with those from Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) to validate. Experimental results indicate that the developed protocol provides values within an acceptable range and aligns well with established standard techniques. This protocol will contribute to more reliable particle concentration measurements in biomedical and industrial applications.

Keywords: Laser Scanning Confocal Microscopy, Particle Number Concentration, Measurement Uncertainty

1. Introduction

Measurement of number concentration of cells and particles is widely used and has an important role in clinical diagnostics [1], pharmaceutical quality control, and metrological standardization. LSCM provides high-resolution three-dimensional imaging, making it a promising technique for particle measurement [2]. However, the effectiveness of LSCM in particle concentration measurement depends on several factors, such as sample preparation, magnification, and image processing techniques.

Proper sample preparation is essential to ensure accurate and repeatable measurements. Inconsistent particle distribution, aggregation, or excessive overlap can compromise measurement reliability. Similarly, selecting the appropriate magnification and illumination settings is crucial for minimizing background noise and improving particle visibility [3]. Without optimization, image artifacts and measurement biases may arise, reducing the validity of the results.

In this study, we investigate the influence of sample preparation methods, magnification selection, and image processing techniques on LSCM-based particle quantification. The study systematically evaluates the effects of these factors and develops a protocol for improving measurement accuracy. The proposed protocol is validated by comparing LSCM particle counts with those obtained using an established reference technique.

Although LSCM is primarily an imaging-based method, it can be quantitatively compared with other analytical techniques such as Nanoparticle Tracking Analysis (NTA), Flow Cytometry, or Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), depending on the measurement objective. In this study, ICP-MS was selected as the reference method due to its high sensitivity, precision, and widespread acceptance as a gold standard in quantitative elemental analysis

The comparison allows for evaluating the accuracy of LSCM measurements and confirming that the particle concentrations obtained fall within an acceptable range of uncertainty. The results contribute to the advancement of LSCM-based methodologies for precise particle quantification in various scientific and industrial applications.

2. Material and method

2.1 Material

2.1.1 Polystyrene particles

This study utilizes polystyrene latex (PSL) particle size 50 µm as the primary material, which consists of a suspension of uniformly sized spherical particles. Nominal particle number concentration at 0.5×10^{6} g^{-1} to 1.5×10^{6} g^{-1}. The PSL suspension is stored in a clean environment at a temperature of 4°C, ensuring that the container remains tightly closed and protected from direct sunlight. It is crucial to prevent the suspension from freezing to maintain the integrity of the particle properties.

2.1.2 Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM)

Sample imaging and analysis are conducted using the LEXT OLS5100 (SKU: lext-ols5100) laser scanning confocal microscope, an advanced imaging system capable of generating high-resolution 3D images of PSL particles.

2.2 Measurement method

2.2.1 Sample preparation

To determine an optimal preparation method for PSL particles of 50 µm, samples were prepared in both dry and suspension conditions to assess the suitability of particle counting under varying conditions. Additionally, different volumes of suspension were tested to establish the most appropriate sample preparation quantity.

For dry-state preparation, 1 µL, 2 µL and 10 µL of PSL suspension were placed on a clean glass slide using a micropipette and left to dry in desiccator at clean environment for 5 hours before measurement. The PSL particles were prepared at a concentration of 10^6 particles per milliliter, allowing for an evaluation of how concentration affects particle distribution and image quality.

2.2.2 Measurement Using LSCM

Image acquisition with LSCM requires careful consideration of particle clarity to distinguish PSL particles from contaminants such as water stains or dust. Images were captured at magnifications of 5x, 10x, 20x and 50x to examine the effects of different magnification levels on image clarity and particle analysis.

Image quality is influenced by lighting conditions and contrast adjustments, which must be optimized based on the sample characteristics. The user is responsible for appropriately adjusting these settings to achieve the best possible image quality.

For high-resolution imaging, the single-area mode is used to adjust the initial focus, while the stitching mode is applied to capture a broader field of view covering the dispersed particles. Since LSCM enables scanning along the Z-axis, it is essential to define the minimum and maximum Z-axis positions before initiating scanning to obtain a sharp 3D image.

2.2.3 Image processing and counting using ImageJ

Images acquired using the stitching mode are initially divided into smaller sections using the crop function in Python to facilitate further analysis. Each image undergoes a series of image processing steps before being analyzed using ImageJ software. Image processing and particle counting using ImageJ involve several key steps. First, the image is opened and, if necessary, converted to an 8-bit grayscale format. Thresholding is then applied to segment the particles from the background, followed by conversion to a binary image. Noise reduction techniques, such as outlier removal, help refine the image before particle analysis. The Analyze Particles function is used to count and measure particles based on size and shape criteria. Manual validation, verify whether the software correctly identifies actual particles. If noise is mistakenly counted as particles, manually remove those points to ensure accuracy. Finally, the results can be exported as a CSV file for further analysis.

2.2.4 Statistical analysis and evaluation

The particle concentration is reported as number concentration in units of particles per milliliter (mL^{-1}). Initially, results are obtained in particles per microliter (μL^{-1}). To ensure statistical reliability, replication performed five times, mean of measurement result are calculated

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (1)$$

where n is the number of replication, and x_i represents measurement value.
Standard deviation calculated

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (2)$$

Measurement uncertainty calculated according to guideline specified in the JCGM 100:2008 [5]

Additionally, measurement results are compared against ICP-MS results using the En ratio for evaluation

$$En = \frac{|x_{lab} - x_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \qquad (3)$$

where x_{lab} is the measurement value, x_{ref} is the reference value, U_{lab} and U_{ref} are the expanded uncertainties of the laboratory and reference. The satisfactory performance will give $|\,En\,|$ value within 1 [6].

3. Results and discussion

3.1 Effect of preparation

Sample preparation plays a crucial role in determining the accuracy of particle counting and distribution analysis. The comparison between suspension and dry state preparations are show in figure 1.

For the suspension method, PSL particles dispersed in the liquid medium as show in figure 1(A). However, due to Brownian motion [4], continuous movement of the particles resulted in image blurring, figure 1(b), making it difficult to accurately count individual particles. Furthermore, the suspension method led to the formation of multiple overlapping layers, which hindered precise particle identification and quantification.

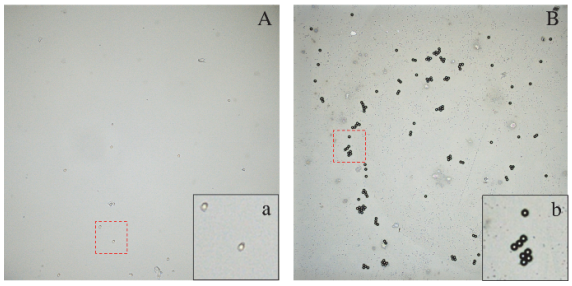


Figure 1. PSL particles suspended in aqueous (A) and dry state preparation (B) under magnification 20X

In contrast, the dry state preparation has clearer images with stationary particles minimizing motion artifacts, allowing for more accurate counting. Although some of particle aggregation was observed, figure 1(b). The capabilities of LSCM enabled effective differentiation of individual particles. This method provided a more suitable approach for particle quantification due to its ability to minimize movement artifacts and overlapping effects. Based on these findings, the dry-state preparation was determined to be the optimal method for PSL particle analysis using LSCM.

Another critical factor in sample preparation is the volume of PSL suspension deposited onto the glass slide. The study examined 1 µL, 2 µL, and 10 µL sample volumes, with results shown in figure 2. In LSCM stitching mode, image acquisition occurs over a large field of view, leading to an extended scanning time when larger sample areas are analyzed. Additionally, defining the Z-axis scanning range for depth imaging can be challenging if the sample area is too large, potentially causing inconsistencies in focus across different regions of the image.

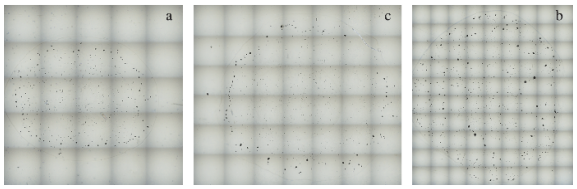


Figure 2. PSL particles sample volumes 1 µL, 2 µL, and 10 µL under dry state preparation at magnification 20X a

The results indicated that using 1 µL to 2 µL was the most appropriate volume range, as it reduced imaging time while maintaining an adequate distribution of particles. Although smaller volumes require repeated measurements to ensure statistical reliability. Thus, to optimize both efficiency and accuracy, 1 µL to 2 µL was identified as the preferred sample volume.

3.2 Effect of magnification

The magnification significantly impacts the clarity and accuracy of particle analysis. As shown in Figure 3, higher magnifications enhance the resolution, enabling better differentiation between particles and contaminants. However, increasing magnification also leading to longer scanning times.

At 5X and 10X magnification, Figure A and B, PSL particles were visible but lacked of resolution to distinguish particles from background noise, such as dust or residual stains. This limitation increased the risk of misclassification, reducing the accuracy of particle counting. In contrast, at 20X and 50X magnification, particles were distinctly identifiable, allowing for precise analysis. However, 50X magnification significantly increased scanning time 2 hours from 10 minutes at 20X, making it less practical for large-area imaging.

Considering the balance between resolution and efficiency, 20X magnification was determined to be the most effective setting. It provided sufficient clarity for accurate particle identification while minimizing scanning time, making it the optimal choice for LSCM-based PSL particle analysis.

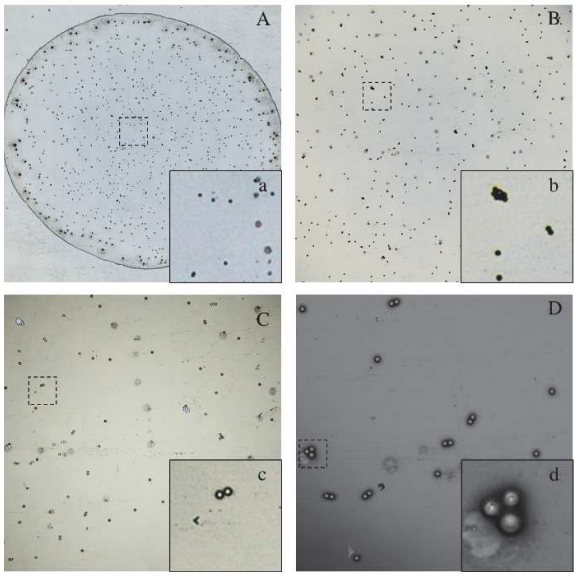


Figure 3. PSL under dry state observed at different magnifications: 5X, 10X, 20X, and 50X corresponding to (A), (B), (C), and (D), respectively. Insets (a), (b), (c), and (d) show the image sharpness at each magnification: 5X, 10X, 20X, and 50X, respectively.

3.3 Image processing and counting particle

The images obtained from the LSCM can be displayed in both 2D and 3D formats. The 2D image is shown in Figure 4a. These images are then subjected to image processing and noise reduction. The processed images, displayed in figure 4(b) and figure 4(c), show clearer particles, making it easier for both software analysis and manual inspection.

Particle concentration analysis was performed based on five replicate measurements. The mean particle concentration, calculated using equation (1), was found to be 0.95×10^{6} mL^{-1}, The standard deviation was determined

using equation (2), and the standard uncertainty was evaluated in accordance with JCGM 100:2008 guidelines, yielding a value of 2.7×10^4 mL^{-1}. The expanded uncertainty, calculated at a 95% confidence level, was 5.4×10^4 mL^{-1}.

3.4 Statistical analysis

In the measurement evaluation, the result from LSCM technique was use as the measurement value with particle concentration 0.95×10^6 mL^{-1}, with expanded uncertainty is 5.4×10^4 mL^{-1}. This result was obtained from the sample prepared using 1 µL of PSL suspension, imaged under 20X magnification, and five replicates. The result was compared with the reference value obtained from ICP-MS which reported a concentration of 1.02×10^6 g^{-1} with an expanded uncertainty of $1.2\times10^5 g^{-1}$ at a 95% confidence level. The En ratio was calculated by using equation (3) as 0.532. Since $|En|\leq1$, the measurement is considered acceptable within the combined uncertainty of both the laboratory measurement and the reference value.

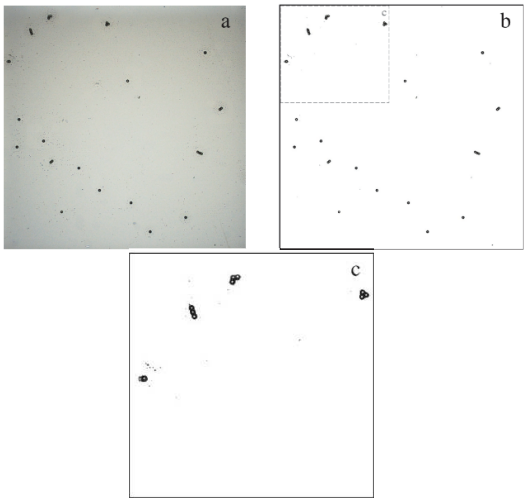


Figure 4. 2D image of PSL obtained using LSCM technique (a), and the image after processing with ImageJ (b). Image (c) shows the cropped region from (b), highlighting the enhanced clarity and detail after image processing.

4. Conclusion

This study highlights the importance of sample preparation for accurate particle concentration measurements using LSCM. Dry-state preparation provides more reliable results by minimizing motion artifacts, while wet-state preparation faces challenges from particle movement during imaging. Tools like glass-bottom chamber slides may improve stability in wet conditions. Compared to ICP-MS, LSCM offers detailed morphological and spatial data at the single-particle level without sample destruction, but it is limited by field of view and particle size. ICP-MS provides highly accurate bulk measurements but lacks spatial resolution. LSCM is ideal for image-based analysis, while ICP-MS is better suited for bulk quantification.

Magnification settings also affect particle analysis, with 20X magnification identified as optimal. The En ratio confirms that measurements are within the acceptable uncertainty range, ensuring the results' reliability for further analysis in biomedical and industrial research.

Acknowledgements

Innovation (TSRI) for the fiscal year 2025 and the National Institute of Metrology (NIMT).

References

[1] Gaudin, R., & Barteneva, N. S. (2015). Sorting of small infectious virus particles by flow virometry reveals distinct infectivity profiles. Nature communications, 6(1), 6022.
[2] Neoptolemou, P., Vetter, T., Cruz-Cabeza, A. J., & Rajagopalan, A. K. (2023). Combined imaging and chromatic confocal microscopy technique to characterize size and shape of ensembles of cuboidal particles. Powder Technology, 430, 119032.
[3] Kurinomaru, T., Takeda, K., Onaka, M., Kuruma, Y., Takahata, K., Takahashi, K., & Uchiyama, S. (2023). Optimization of Flow Imaging Microscopy Setting Using Spherical Beads with Optical Properties Similar to Those of Biopharmaceuticals. Journal of Pharmaceutical Sciences, 112(12), 3248-3255.
[4] Mortensen, K. I., Flyvbjerg, H., & Pedersen, J. N. (2021). Confined Brownian motion tracked with motion blur: estimating diffusion coefficient and size of confining space. Frontiers in Physics, 8, 583202.
[5] Joint committee for Guides in Metrology (JCGM) 2008 JCGM 100: 2008 Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (BIPM).
[6] International Organization for Standardization (ISO) 2015 ISO13528: 2015 Statistical Methods for use in
[7] Proficiency Testing by Interlaboratory Comparison (2nd ed). ISO.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่นด้วย MATLAB/SIMULINK

3-Phase Inverter Model Using Space Vector Pulse Width Modulation Technique MATLAB/SIMULINK

สิษฐ รัตนคำ[1*] ปิยะ ศิริขันธ์[1] นิวัทธ์ วรรณวงศ์[1] และประกาศิต ปราบพาล[2]

[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1

E-mail: sidtha@techsakon.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการออกแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์ มอดูเลชั่นด้วย MATLAB/SIMULINK ซึ่งอินเวอร์เตอร์แบบนี้เป็นการควบคุมในรูปแบบเวกเตอร์โดยจะทำการควบคุมทั้งขนาดและเฟสของกระแสหรือแรงดัน จะพบว่าเทคนิคสเปซเวกเตอร์จะให้ช่วงกว้างของแรงดันและกระแสเพิ่มขึ้นและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่แรงดันที่จ่ายให้อินเวอร์เตอร์มากขึ้น จากการทดลองแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์ มอดูเลชั่นด้วย MATLAB/SIMULINK พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Modulation index จะทำให้ค่าแรงดันและกระแสด้านออกสูงขึ้น ผลการจำลองที่ทดสอบกับโหลดความต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ มีลักษณะตรงตามทฤษฎีสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) ดังนั้นแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสโดยใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์ มอดูเลชั่นด้วย MATLAB/SIMULINK สามารถนำไปใช้ในการสร้างอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสได้

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส, Modulation index, สเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น

Abstract

This article presents the design of a 3-phase inverter model using Space Vector Pulse Width Modulation technique with MATLAB /SIMULINK. This type of inverter employs vector control where both the magnitude and phase of the current or voltage are controlled. It is observed that the Space Vector technique widens the range of voltage and current, thus enhancing the efficiency of the supplied voltage to the inverter. Result experimental simulations of a 3-phase inverter model using Space Vector Pulse Width Modulation technique with MATLAB/SIMULINK, it is found that increasing the modulation index results in higher output voltage and current values. The simulation results tested against load resistance and inductance characteristics consistent with Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) theory. Thus, the 3-phase inverter model utilizing Space Vector Pulse Width Modulation technique with MATLAB/SIMULINK can be effectively used in constructing 3-phase inverters.

Keywords: 3-Phase Inverter, modulation index, Space Vector Pulse Width Modulation

1. บทนำ

ในการสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับระบบโซล่าร์เซลล์เพื่อการจ่ายไฟฟ้าให้ภายในบ้านนั้นเป็นระบบอินเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟส ซึ่งสามารถใช้ได้กับโหลดระบบไฟฟ้า 1 เฟส และเมื่อนำมาจ่ายให้กับโหลดที่เป็นประเภทเครื่องกลไฟฟ้าที่มีใช้ภายในบ้านพักทั่วไปจะเกิดปัญหาเรื่องกำลังไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากการสร้างอินเวอร์เตอร์จะใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบคลื่นไซน์ การขับมอเตอร์โดยอินเวอร์เตอร์หรือคอนเวอร์เตอร์มักใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆเข้ามาช่วยในการควบคุมโดยปกติจะใช้การมอดูเลตด้วยคลื่นไซน์ (SPWM)[1-3] ซึ่งง่ายต่อการควบคุมสัญญาณและการสวิทช์ ทำให้สะดวกกับการออกแบบวงจรกรองด้านออกได้ง่ายและมีขนาดเล็ก แต่มีข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือแรงดันด้านออกที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าต่ำ จึงมีวิธีการเพิ่มแรงดันระหว่างสายที่ความถี่หลักมูลในระบบ 3 เฟสซึ่งทำได้โดยการมอดูเลตที่ไม่จำเป็นต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ แต่เมื่อมีการหาผลต่างระหว่างสายจะต้องมีสัญญาณเป็นคลื่นไซน์ซึ่งทำได้โดยการคำนึงถึงความต่างเฟสกันที่ 120 องศา ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลตดังนี้

1.ฮาโมนิคอินเจคชั่นมอดูเลชั่น (Harmonic Injection Pulse Width Modulation : HIPWM)

2.สเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (Space Vector Pulse Width Modulation : SVPWM)

3. ดิสคอนทินูอัสพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (Discontinuous Pulse Width Modulation)(DPWM)

4. เดลต้ามอดูเลชั่น (Delta Modulation) (DM)

ในทางปฏิบัติจะมีเทคนิคอื่นนอกเหนือจากที่กล่าวไปข้างต้น เช่น แทรปไซดอลมอดูเลชั่นและสแตรแคสมอดูเลชั่น เป็นต้น แต่ไม่มีข้อเด่นทางสมรรถนะทางไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค ทั้ง 4 ข้อดังกล่าว

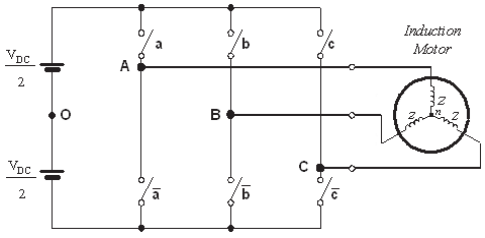
บทความนี้จะทำการศึกษาสเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (SVPWM) ซึ่งปัจจุบันนี้สเปซเวกเตอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (SVPWM) เป็นวิธีที่นิยมมากในการที่จะใช้ 3 เฟส อินเวอร์เตอร์ (Inverter) [4-5] ในการขับมอเตอร์กระแสสลับ และการขับโหลดไฟฟ้าที่ใช้ภายในบ้าน เพราะสเปซเวกเตอร์เป็นวิธีการ ที่มีความสามารถเหมือนกับการพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น ง่ายในการแก้ปัญหาและผลออกมาดี

2. อินเวอร์เตอร์และสเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น

อินเวอร์เตอร์ที่กล่าวถึงเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source) โดยการกำเนิดแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ในแต่ละเฟสทำได้โดยการสวิทช์อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิทช์คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่นไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ดังนั้นรูปแบบการสวิทช์อินเวอร์เตอร์นั้นขึ้นอยู่กับค่าที่คำนวณเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม

2.1 ระบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} ซึ่งได้มาจากวงจรเรียงกระแส (Rectifier) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัว ทำหน้าที่เปิดและปิดวงจรดังแสดงใน รูปที่ 1 เพื่อป้องกันการลัดวงจรของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสวิทช์ตัวที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องไม่ปิดวงจรพร้อมกัน ดังนั้นสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์ 2 ตัวในกิ่งเดียวกันจะทำให้เกิดสองสถานะคือ สถานะ “0” เมื่อสวิทช์ตัวบนเปิดวงจรตัวล่างปิดวงจร และสถานะ “1” เมื่อสวิทช์ตัวบนปิดวงจร ตัวล่างเปิดวงจร การเปิดปิดสวิทช์ทั้ง 6 ตัวทำให้เกิดสถานะแตกต่างกัน 8 สถานะ ซึ่งอาจจะเรียกชื่อได้เป็น V_0 ถึง V_7 ดังในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.2 สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (Space Vector Modulation)

สเปซเวกเตอร์มอดูเลชั่น (SVM) เป็นการนำสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่สเตเตอร์ (Stator) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากตัวควบคุมมาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ยที่ต้องการจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} แล้วนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมเพื่อทำการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ซึ่งจะได้สัญญาณไปขับสวิทช์ของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 6 ตัว เพื่อสั่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางที่ 1 รูปแบบสวิทช์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวตรอน (n) ของมอเตอร์

Name	a	b	c	V_{An}	V_{Bn}	V_{Cn}
V_0	0	0	0	0	0	0
V_1	1	0	0	$2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_2	1	1	0	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
V_3	0	1	0	$V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_4	0	1	1	$2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_5	0	1	1	$V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
V_6	1	0	1	$V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
V_7	1	1	1	0	0	0

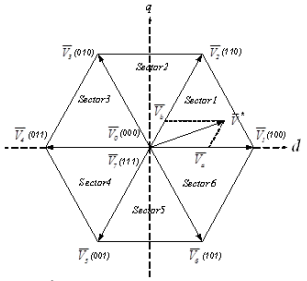
“0” = สวิทช์ตัวบนเปิด, “1” = สวิทช์ตัวบนปิด (สวิทช์ตัวล่างมีสถานะตรงข้ามกับตัวบน) $\frac{V_{DC}}{3V_2}$ จากตารางที่ 1 สามารถคำนวณหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่ภาพแบบการสวิทช์ต่างๆโดยใช้สมการดังนี้

$$\bar{V} = \frac{2}{3}[v]\vec{V} = \frac{2}{3}\left[V_{An} + aV_{Bn} + a^2V_{Cn}\right] \quad (1)$$

ตัวอย่างเช่น ที่ภาพแบบการสวิทช์ จะคำนวณหาสเปซเวกเตอร์ของแรงดัน ได้ดังนี้

$$\bar{V}_2 = \frac{2}{3}\left[\frac{V_{DC}}{3} + a\frac{V_{DC}}{3}a^2\frac{2V_{DC}}{3}\right] = \frac{2}{3}V_{DC} \times e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (2)$$

จะเห็นว่าสเปซเวกเตอร์ของแรงดันมี 8 สถานะ ซึ่งประกอบไปด้วยเวกเตอร์ที่ทำให้เกิดแรงดันสเตเตอร์ (Basic Vector) 6 เวกเตอร์ และเวกเตอร์ที่ทำให้แรงดันสเตเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์ (Zero Vector) 2 เวกเตอร์ โดยสเปซเวกเตอร์ของแรงดันที่รูปแบบการสวิทช์ต่างๆ ดังรูปที่ 2

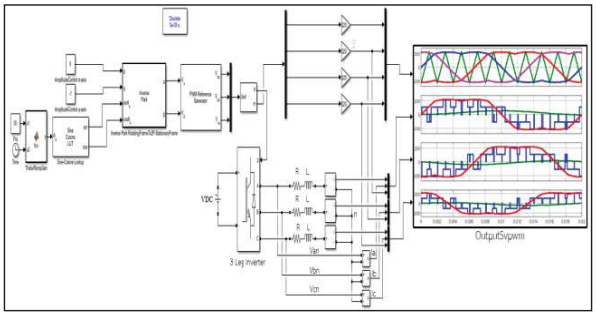


รูปที่ 2 สเปซเวกเตอร์ของแรงดัน

3. การจำลองด้วยโปรแกรม Simulink

ทำการทดลองโดยใช้โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและค่าความต้านทาน ความถี่ 50 เฮิรตซ์ และทำการวัดค่าแรงดัน กระแส ของอินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ในการสวิทช์ ($f_s = 10\,\text{kHz}$) ขั้นตอนการทดลองด้วยโปรแกรม Simulink

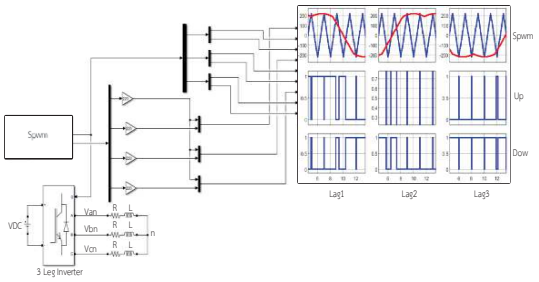
1. ทำการจำลองวงจรด้วยโปรแกรม Matlab ดังรูปที่ 3
2. จากนั้นทำการทดสอบโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เพื่อทำการทดสอบที่ความถี่สวิทช์ 10 kHz แรงดันดีซี 380-400 โวลต์ %mod=100 และแบบจำลองโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ 20 mH. และค่าความต้านทาน 0.05 Ω ความถี่ 50 Hz
3. ทำการจับสัญญาณ V phase, a และ I phase, a
4. ทำการจับสัญญาณ V line to line, a-b



รูปที่ 3 สัญญาณสเปสเวกเตอร์สำหรับการขับอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง

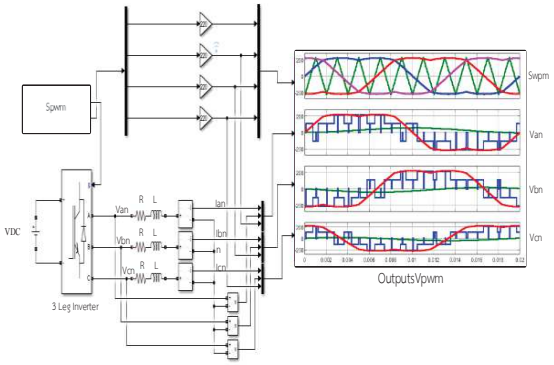
4. ผลการจำลอง

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองการขับอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง แบบสเปซเวกเตอร์จะได้สัญญาณการขับแบบพัลส์วิดท์มอดูเลทเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่งตามความถี่ที่กำหนดด้วยสัญญาณแคเรียร์ 10 kHz



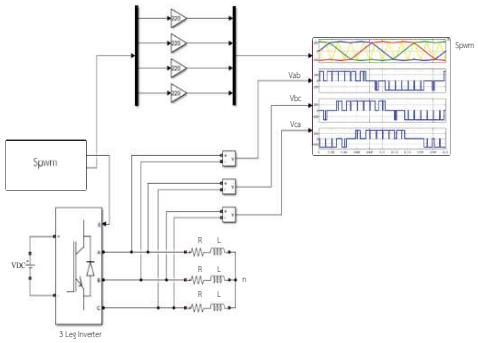
รูปที่ 4 สัญญาณสเปสเวกเตอร์สำหรับการขับอินเวอร์เตอร์แบบ 3 กิ่ง

การทดสอบวัดแรงดัน Van, Vbn และ Vcn เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันแบบสเปสเวกเตอร์ที่นำมามอดูเลทความกว้างกับสัญญาณแคเรียร์ รูปที่ 4 จะเห็นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 กิ่ง ที่เกิดจากการสวิทช์ของแต่ละเฟส ทำให้เกิดแรงดันเฟส 3 เฟส แบบสเปสเวกเตอร์ได้



รูปที่ 5 ทดสอบอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง แบบสเปสเวกเตอร์

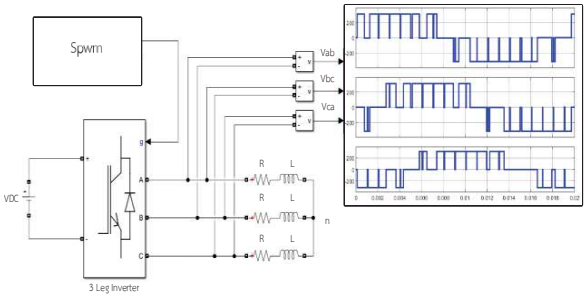
การทดสอบวัดกระแส I_{an}, I_{bn} และ I_{cn} เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันแบบสเปสเวกเตอร์ที่นำมามอดูเลทความกว้างกับสัญญาณแคเรียร์ จากรูปที่ 5 จะเห็นกระแสของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 กิ่งที่จ่ายให้โหลด RL แบบ 3 เฟส ข้อดีของการออกแบบอินเวอร์เตอร์แบบสเปสเวกเตอร์นั้นจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุดยอดของรูปคลื่นมากที่สุด เนื่องจากจุดยอดของสัญญาณสเปสเวกเตอร์ที่ทำการมอดูเลทกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่เป็นสัญญาณแคเรียร์นั้นยังคงมีการสวิทช์ได้ทำให้ไม่สูญเสียกำลังไฟฟ้าไปอันเนื่องจากพื้นที่บนจุดยอดกว้างกว่าการใช้สัญญาณไซน์



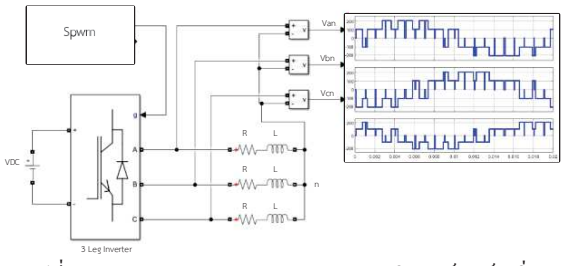
รูปที่ 6 แรงดัน Vab, Vbc และ Vca เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันแบบสเปสเวกเตอร์ที่นำมามอดูเลทความกว้างกับสัญญาณแคเรียร์

จากรูปที่ 6 เป็นการทดสอบวัดแรงดัน Vab, Vbc และ Vca เปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันแบบสเปสเวกเตอร์ที่นำมามอดูเลทความกว้างกับสัญญาณแคเรียร์ จะเห็นแรงดันเอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 กิ่งที่เกิดจากการสวิทช์ของแรงดันระหว่างเฟส แรงดัน Vab, Vbc และ Vca

จากรูปที่ 7 การวัดแรงดัน Line ของ Vab, Vbc และ Vca ของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

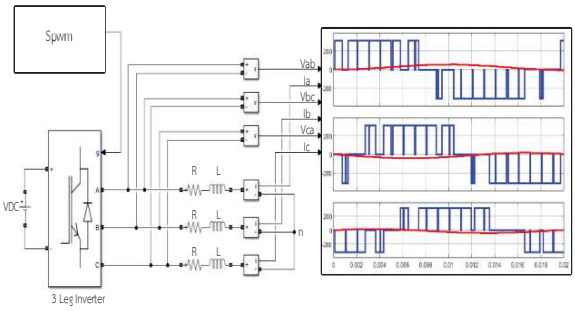


รูปที่ 7 การวัดแรงดันเฟส Vab, Vbc และ Vca ของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง



รูปที่ 8 การวัดแรงดัน Van, Vbn และ Vcn ของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง

จากรูปที่ 8 การวัดแรงดัน Phase ของ Van, Vbn และ Vcn ของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



รูปที่ 9 แรงดัน Line Vab, Vbc และ Vca เทียบกับกระแส Ia,Ib และ Ic

จากรูปที่ 9 การวัดกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่ง แบบสเปสเวกเตอร์ ที่จ่ายให้โหลด RL คือกระแส Ia, Ib และ Ic จะเห็นว่ากระแสที่ได้เป็นสัญญาณไซน์ 3 เฟส จึงแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 กิ่งแบบสเปสเวกเตอร์ที่ออกแบบ ดังในรูปที่ 9 สามารถใช้งานในการจ่ายแรงดัน 3 เฟสให้กับโหลดแบบ RL ได้

4. สรุปและอภิปรายผล

แบบจำลองการสร้างอินเวอร์เตอร์ที่สามารถใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) ช่วยในการสร้างอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส โดยสามารถนำไปใช้ได้กับโหลดภายในบ้านได้ทั้งแบบ 1 เฟส และ 3 เฟสได้ จากการทดลองการออกแบบการทำงานของอินเวอเตอร์ด้วยแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) จะทำให้เราได้ค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นจากการใช้เทคนิคแบบสัญญาณไซน์ (SPWM) ประมาณ 15% ของแรงดัน DC และสามารถนำไปใช้ได้กับโหลดความต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้ง 1 เฟส และ 3 เฟสแบบความถี่คงที่ได้ แบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เทคนิคสเปซเวกเตอร์ (SVPWM) เป็นการจำลองการสร้างอินเวอเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานจริงควรนำแบบจำลองที่ได้ไปทดสอบขับโหลดทางไฟฟ้าจริงต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Iqbal, A. Lamine, I. Ashraf and Mohibullah, "Matlab/Simulink Model of Space Vector PWM for Three-Phase Voltage Source Inverter," Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle upon Tyne, UK, 2006, pp. 1096-1100, doi: 10.1109/UPEC.2006.367646.

[2] A. Kumar and D. Chatterjee, "A survey on space vector pulse width modulation technique for a two-level inverter," 2017 National Power Electronics Conference (NPEC), Pune, India, 2017, pp. 78-83, doi: 10.1109/NPEC.2017.8310438.

[3] Tawfiq KB, Sergeant P, Mansour AS. Comparative Analysis of Space Vector Pulse-Width Modulation Techniques of Three-Phase Inverter to Minimize Common Mode Voltage and/or Switching Losses. Mathematics. 2024; 12(18):2832. https://doi.org/10.3390/math12182832

[4] A. Lewicki, I. C. Odeh, D. Kondratenko and M. Morawiec, "Hybridized Space-Vector Pulsewidth Modulation for Multiphase Two-Level Voltage Source Inverter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 7, pp. 7663-7674, July 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3145161.

[5] N. D. Tuyen, V. Van Minh, L. A. Nhuan, D. N. Phat, T. P. Hoa and N. D. Hung, "The General Carrier-based PWM Implementation based on Space Vector Analysis for Three-phase Three-level T-type NPC Inverter," 2022 6th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Nha Trang City, Vietnam, 2022, pp. 399-404, doi: 10.1109/GTSD54989.2022.9988757.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การสังเคราะห์ตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบลำดับเศษส่วนโดยใช้ขั้นตอนวิธี ACO/PSO แบบผสมผสาน

Synthesis of FOPID Controller for Fractional Order Systems Using A Hybrid PSO/ACO Algorithm

ฐาปนา นามประดิษฐ์[1*] ศักดาวุฒิ บุญตั้ว[1] และ ลัคนา เพิ่มพูล[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
E-mail: thapana_na@rmutto.ac.th*, sakdawut_bo@rmutto.ac.th, lukkana.po@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบลำดับเศษส่วนด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเมตาฮิวริสติก โดยนำขั้นตอนวิธีอาณานิคมของมด (ACO) ผสมผสานเข้ากับขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (PSO) โดยในแต่ละรอบของการวนซ้ำ ขั้นตอน PSO จะใช้คำตอบจากขั้นตอน ACO มาร่วมปรับปรุงความเร็วของอนุภาค จากนั้นจึงนำพารามิเตอร์ชุดที่ดีที่สุดของอนุภาคและกลุ่มอนุภาคที่ได้ มาใช้ปรับปรุงค่าฮิวริสติกของ ACO ก่อนจะทำขั้นตอน ACO ตามจำนวนรอบที่กำหนด การวนซ้ำระหว่างสองขั้นตอนช่วยส่งเสริมทั้งการสำรวจพื้นที่คำตอบใหม่และปรับแต่งค่าที่มีแนวโน้มดีที่สุดไปพร้อมกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้ผลการควบคุมที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ ACO หรือ PSO เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: ตัวควบคุม FOPID, ระบบลำดับเศษส่วน, ขั้นตอนวิธีอาณานิคมของมด, ขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค

Abstract

This study proposes a methodology for designing a Fractional Order Proportional-Integral-Derivative (FOPID) controller for fractional-order systems based on a hybrid metaheuristic optimization approach that combines Ant Colony Optimization (ACO) with Particle Swarm Optimization (PSO). In each iteration, PSO updates particle velocities using solutions obtained from ACO, followed by the refinement of the heuristic information in ACO using the best individual and global particle parameters before executing the ACO phase. The iterative cooperation between PSO and ACO enhances both global exploration and local exploitation capabilities. Experimental results confirm that the proposed approach effectively tunes FOPID controller parameters and yields superior control performance compared to using either ACO or PSO individually.

Keywords: FOPID controllers, fractional-order systems, ant colony optimization, particle swarm optimization

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบลำดับเศษส่วน (fractional-order systems) ได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีคุณสมบัติในการอธิบายพฤติกรรมของระบบได้แม่นยำกว่าระบบที่มีลำดับเต็ม (integer-order systems) [1] อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบประเภทนี้มีความซับซ้อนกว่าระบบทั่วไป สำหรับระบบลำดับเต็ม ตัวควบคุมที่ได้รับความนิยมและถูกใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรม คือ ตัวควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative controllers) เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่าย และให้ประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมทั้งระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ในกรณีของระบบลำดับเศษส่วนก็มีการใช้งานตัวควบคุม PID แบบลำดับเศษส่วน (Fractional-order PID: FOPID) ซึ่งเป็นการขยายแนวคิดโดยการเพิ่มพารามิเตอร์ลำดับเศษส่วนของอินทิกรัลและอนุพันธ์ทำให้สามารถปรับแต่งการตอบสนองของระบบวงปิดได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น และเป็นทางเลือกที่เหมาะสำหรับการควบคุมระบบลำดับเศษส่วน [1] อย่างไรก็ตาม การปรับแต่ง (tuning) พารามิเตอร์ 5 ค่าของตัวควบคุม FOPID ในระบบลำดับเศษส่วน ซึ่งเป็นโจทย์การหาค่าเหมาะที่สุดแบบพหุฐานนิยม (multi-modal optimization problem) จำเป็นต้องพึ่งพาขั้นตอนวิธีที่สามารถสำรวจพื้นที่ค้นหาไม่เชิงเส้นหลายมิติและหลีกเลี่ยงการติดกับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ (local optimum) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หนึ่งในวิธีฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมคือขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมอาณานิคมของมด (Ant Colony Optimization: ACO) ซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมของมดในการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยอาศัยการสะสมฟีโรโมน (pheromone) เพื่อนำทาง ขั้นตอนวิธี ACO ถูกนำมาใช้กับการออกแบบตัวควบคุม PID อย่างแพร่หลาย เช่น ในงานของ Chebli *et al.* [2] นำเสนอการใช้ ACO ปรับจูน PID เพื่อควบคุมความแออัดของเครือข่าย (congestion control) แบบหลายวัตถุประสงค์ (multi-

objective) และในงานของ Y. Dhieb *et al.* [3] ที่ใช้ ACO ปรับค่า PID สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตาม ACO มีข้อจำกัดที่สำคัญ ได้แก่ คำตอบมักจะลู่เข้าสู่ค่าเหมาะสมเฉพาะที่ และมีอัตราการลู่เข้าที่ช้าหากไม่มีการปรับปรุงกลไกการเรียนรู้ของมดอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในปัญหาที่มีลักษณะต่อเนื่องหรือมีความละเอียดของพารามิเตอร์สูง เช่นในกรณีของปัญหาการสังเคราะห์ตัวควบคุม PID และ FOPID

บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการสังเคราะห์ตัวควบคุม FOPID สำหรับระบบลำดับเศษส่วน โดยใช้การผสมผสานขั้นตอนวิธี ACO และ PSO เข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบ และหลีกเลี่ยงปัญหาที่พบในการใช้ ACO หรือ PSO เพียงอย่างเดียว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขั้นตอนวิธีอาณานิคมของมด

การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีอาณานิคมของมด หรือ ACO เป็นขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary algorithm) ที่จำลองพฤติกรรมของมดในการหาเส้นทางสั้นที่สุดจากรังไปยังแหล่งอาหาร โดยมดจะทิ้งฟีโรโมนไว้ตามเส้นทางที่เดินผ่าน และมดตัวอื่นมีแนวโน้มที่จะเลือกเดินตามเส้นทางที่มีฟีโรโมนเข้มข้นมากกว่า ขั้นตอนวิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Marco Dorigo ในปี ค.ศ.1992 เพื่อแก้ปัญหาการเดินทางของเซลส์แมน (Traveling Salesman Problem) ซึ่งเป็นปัญหาแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete problem) อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุม PID ซึ่งเป็นปัญหาที่มีลักษณะต่อเนื่อง (continuous problem) [2, 3]

ในการแก้ปัญหาด้วยวิธี ACO เราจะสร้างประชากรมดขึ้นมากลุ่มหนึ่ง มดแต่ละตัวจะเลือกค่าพารามิเตอร์โดยอิงจากเวกเตอร์ความน่าจะเป็นที่คำนวณจากค่าฟีโรโมนและฮิวริสติก (heuristic) ดังสมการ (1) ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (objective function) จากพารามิเตอร์ของมดแต่ละตัวจะถูกนำไปใช้ปรับปรุงค่าฟีโรโมนด้วยสมการ (2) โดยพารามิเตอร์ที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำกว่าจะมีความน่าสนใจมากกว่า และมดจะปล่อยฟีโรโมนตามเส้นทางนั้นมากกว่า จากนั้นค่าฮิวริสติกจะถูกปรับปรุงด้วยสมการ (3) และวนซ้ำเพื่อให้มดชุดใหม่ค้นหาคำตอบต่อไปจนกว่าจะครบรอบการวนซ้ำที่กำหนด ในที่สุดเราจะได้พารามิเตอร์ที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำสุดเป็นคำตอบ การระเหยของฟีโรโมนและการรีเซ็ตค่าฮิวริสติกเป็นกลไกที่ทำให้มดไม่ยึดติดกับคำตอบเดิมมากเกินไป เพื่อเปิดโอกาสให้มดสำรวจค่าใหม่ ๆ และไม่ติดอยู่กับจุดต่ำสุดเฉพาะที่

$$p_{ij} = \left([\tau_{ij}]^{\alpha} \cdot [\eta_{ij}]^{\beta}\right) / \sum_{k} [\tau_{ik}]^{\alpha} \cdot [\eta_{ik}]^{\beta} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = (1-\rho) \cdot \sum_{n} \Delta\tau_{ij}^{n} \quad (2)$$

$$\eta_{ij}^{n} = \frac{1}{J_n}(1 + \lambda_0 \cdot iter) \quad (3)$$

ในสมการ (1)–(3) p_{ij} คือ ความน่าจะเป็นที่มดจะเลือกเส้นทางจากโหนด i ไปยัง j, τ_{ij} คือ ปริมาณฟีโรโมนบนเส้นทางจากโหนด i ไปยัง j, η_{ij} คือ ค่าฮิวริสติกของเส้นทางจากโหนด i ไปยัง j, α คือ พารามิเตอร์ที่ควบคุมน้ำหนักของฟีโรโมน, β คือ พารามิเตอร์ที่ควบคุมน้ำหนักของฮิวริสติก, ρ คือ อัตราการระเหยของฟีโรโมน มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1, $\Delta\tau_{ij}^{n}$ คือ ปริมาณฟีโรโมนที่มดปล่อยเพิ่มบนเส้นทางจากโหนด i ไปยัง j ซึ่งคำนวณได้จาก $\Delta\tau_{ij}^{n} = Q/J_n$ เมื่อ Q คือ ค่าคงที่ปรับสัดส่วนและ J_n คือ ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ของเส้นทางที่มดตัวที่ n เลือก, λ_0 คือ ค่าคงที่ปรับสัดส่วน และ $iter$ คือ รอบที่ของการวนซ้ำ

ขั้นตอนวิธี ACO จะสะสมและส่งผ่านความรู้จากมดรุ่นหนึ่งไปสู่มดรุ่นถัดไปผ่านทางค่าฟีโรโมนและฮิวริสติก ดังนั้นการกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงค่าฟีโรโมนและฮิวริสติก จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการค้นหาด้วยวิธี ACO อย่างมาก

2.2 ขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค

ขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค หรือ PSO เป็นขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเมตาฮิวริสติกซึ่งได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการรวมกลุ่มของฝูงนกหรือฝูงปลาในการหาอาหาร ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Kennedy และ Eberhart ในปี ค.ศ. 1995 เพื่อใช้ในปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เชิงเส้นหลายมิติ ในวิธีนี้ อนุภาค (particle) จะเป็นตัวแทนของค่าพารามิเตอร์ชุดหนึ่ง (solution candidate) และการค้นหาจะเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ค้นหาคำตอบ (search space) เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำที่สุด โดยพิจารณาจาก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค ค่าที่ดีที่สุดของอนุภาคนั้น ($pBest$) และค่าที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาค ($gBest$) การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเป็นไปตามสมการ (4) และ (5)

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1\left(pBest_i - p_i(t)\right) + c_2 r_2\left(gBest - p_i(t)\right) \quad (4)$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1) \quad (5)$$

เมื่อ $p_i(t)$ คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t, $v_i(t)$ คือ ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t, $pBest_i$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาค i, $gBest$ คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดของอนุภาคทั้งหมดในฝูง, w คือ น้ำหนักความเฉื่อย (inertia weight) ใช้ควบคุมผลกระทบจากความเร็วในรอบก่อนหน้า, c_1, c_2 คือ ค่าอัตราการเรียนรู้จากประสบการณ์ของตนเอง (cognitive learning rate) และอัตราการเรียนรู้จากฝูง (social learning rate) และ r_1, r_2 คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1 ใช้เพื่อกระจายการสำรวจ

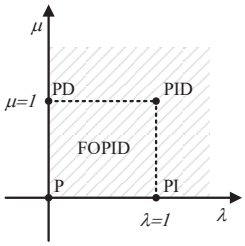
ขั้นตอนวิธี PSO จะสะสมและส่งผ่านความรู้ในแต่ละรอบผ่านทางค่าความเร็วของอนุภาค รวมถึง $pBest$ และ $gBest$ ข้อจำกัดของ PSO ก็คือ การลู่เข้าสู่คำตอบเฉพาะที่อย่างรวดเร็วในบางกรณี โดยเฉพาะปัญหาที่มีค่าต่ำสุดเฉพาะหลายจุดและพื้นที่ค้นหามีมิติสูง เนื่องจาก $pBest$ และ $gBest$ จะติดอยู่ที่จุดต่ำสุดเฉพาะที่ได้ง่าย

2.3 ตัวควบคุม FOPID

ตัวควบคุม FOPID เป็นการขยายรูปแบบของตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิมโดยใช้แนวคิดของแคลคูลัสลำดับเศษส่วน (fractional calculus) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการควบคุมระบบ โดยเฉพาะในกรณีที่ระบบมีพลวัตซับซ้อน หรือมีผลจากความจำ (memory effect) ซึ่งไม่สามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย PID ทั่วไป ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม FOPID นิยามได้ดังนี้

$$K(s) = K_P + \frac{K_I}{s^{\lambda}} + K_D s^{\mu} \tag{6}$$

เมื่อ K_p คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_i คือ อัตราขยายเชิงอินทิกรัล, K_d คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์, λ คือ ลำดับเศษส่วนของอินทิกรัล และ μ คือ ลำดับเศษส่วนของอนุพันธ์ เนื่องจากค่าของ λ และ μ ไม่จำเป็นต้องเป็นจำนวนเต็ม ทำให้ FOPID มีอิสระในการปรับค่าและครอบคลุมตัวควบคุม P, PI, PD และ PID ดังรูปที่ 1 โดยทั่วไปมักเลือก $\lambda, \mu \in [0,2]$



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวควบคุม P, PI, PD, PID และ FOPID

3. ขั้นตอนวิธี ACO/PSO แบบผสมผสาน

การค้นหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ที่นำเสนอใช้ขั้นตอนวิธี ACO/PSO แบบผสมผสาน โดยในระหว่างการวนซ้ำความรู้จะถูกถ่ายทอดจาก ACO ไปยัง PSO ผ่านค่า $aBest$ และจาก PSO ไปยัง ACO ผ่านค่าฮิวริสติกโดยมีแนวคิดสำคัญ ดังนี้

3.1 เฟส PSO (การสำรวจแบบฝูงอนุภาค)

อนุภาคแต่ละตัวแทนพารามิเตอร์ $K_P, K_I, K_D, \lambda, \mu$ หนึ่งชุด เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาคจะถูกปรับปรุงตามสมการ (7) โดยใช้ผลลัพธ์ของขั้นตอน ACO ก่อนหน้า ($aBest$) เป็นตัวดึงดูดทั่วไป (global attractor) เพื่อเสริมความสามารถในการลู่เข้าสู่คำตอบที่ดีขึ้น

$$\begin{aligned} v_i(t+1) = wv_i(t) &+ c_1 r_1 \left(pBest_i - p_i(t)\right) \\ &+ c_2 r_2 \left(gBest - p_i(t)\right) \\ &+ c_3 r_3 \left(aBest - p_i(t)\right) \end{aligned} \tag{7}$$

$$p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1) \tag{8}$$

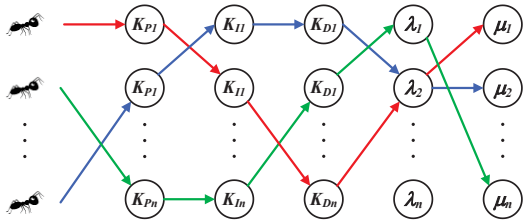
3.2 การอัปเดตฮิวริสติกจาก PSO

ตำแหน่งของ $pBest$ และ $gBest$ จากขั้นตอนวิธี PSO จะถูกใช้ปรับค่าฮิวริสติกโดยใช้เคอร์เนลแบบเกาส์เซียน (Gaussian kernel) ดังสมการ (9) และ (10) ค่าฮิวริสติกนี้จะถูกรีเซ็ตเมื่อผ่านไป N_{RESET} รอบ

$$\eta_k = \eta_k + \gamma_1 \cdot \exp\left(-(x_k - pBest_i)^2 / 2\sigma_1^2\right) \tag{9}$$

$$\eta_k = \eta_k + \gamma_2 \cdot \exp\left(-(x_k - gBest)^2 / 2\sigma_2^2\right) \tag{10}$$

เมื่อ γ_1, γ_2 คือ ค่าคงที่ปรับสัดส่วน, σ_1, σ_2 คือ ความกว้างของเคอร์เนลแบบเกาส์เซียน, η_k คือ ค่าฮิวริสติกของพารามิเตอร์ลำดับที่ k และ x_k คือ พารามิเตอร์ลำดับที่ k

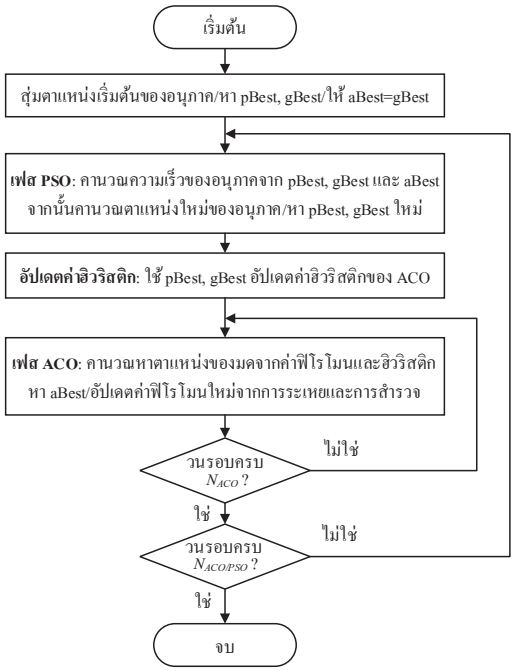


รูปที่ 2 ตัวอย่างการเลือกพารามิเตอร์ FOPID โดยใช้วิธี ACO/PSO

3.3 เฟส ACO (การค้นหาแบบมด)

มดแต่ละตัวเลือกเส้นทางผ่านโหนดพารามิเตอร์ในแต่ละชั้นของอัตราขยาย K_P, K_I, K_D, λ และ μ ดังรูปที่ 2 โดยใช้การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette wheel selection) ตามความน่าจะเป็น (1) จากนั้นปรับค่าฟีโรโมนโดยใช้สมการ (2) วนซ้ำในเฟสการค้นหาด้วย ACO ตามจำนวนรอบที่กำหนด (N_{ACO}) โดยไม่ปรับค่าฮิวริสติก

เมื่อวนซ้ำทั้ง 3 เฟสจนครบจำนวนรอบที่กำหนด ($N_{ACO/PSO}$) ตามแผนผังในรูปที่ 3 จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ที่ให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ต่ำที่สุดเป็นคำตอบ



รูปที่ 3 แผนผังขั้นตอนวิธี ACO/PSO แบบผสมผสาน

4. ผลการทดลอง

พิจารณาระบบลำดับเศษส่วนที่มีเวลาประวิง (time delay) ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน [4] ดังนี้

$$G(s) = \frac{e^{-0.5s}}{2s^{1.5}+1}$$

กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์เป็น $J = w_1 \cdot \text{IAE} + w_2 \cdot t_s + w_3 \cdot \%\text{OS}$ เมื่อ IAE คือ อินทิกรัลของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์, t_s คือ เวลาอยู่ตัว (settling time) ที่ $\pm 2\%$ และ %OS คือ เปอร์เซ็นต์ส่วนพุ่งเกิน (percent overshoot) เมื่อ $w_1 = w_2 = 0.3, w_3 = 0.4$ กำหนดขอบเขตของการค้นหาพารามิเตอร์ของ FOPID อยู่ในช่วง $K_P, K_I, K_D \in [0,10]$ และ $\lambda, \mu \in [0.5,1.5]$ และแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็น 1,000 ระดับ สังเคราะห์ตัวควบคุม 3 ขั้นตอนวิธีเพื่อเปรียบเทียบ ได้แก่ (1) วิธี ACO ด้วยจำนวนมด 50 ตัว วนซ้ำจำนวน 200 รอบ ($\alpha = 0.5, \beta = 5, \rho = 0.5, Q = 1$) (2) วิธี PSO ด้วยจำนวนอนุภาค 50 อนุภาค วนซ้ำจำนวน 200 รอบ ($w = 0.5, c_1 = c_2 = 1.5$) (3) วิธี ACO/PSO ด้วยจำนวนอนุภาค 50 อนุภาค และมดจำนวน 25 ตัว ($\gamma_1, \gamma_2 = 1, \sigma_1, \sigma_2 = 2.5, N_{ACO} = 5$, $N_{ACO/PSO} = 200, N_{RESET} = 5$ การจำลองผลตอบสนองเชิงเวลาใช้ FOMCON Toolbox สำหรับ MATLAB ผลการสังเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ (cost) พบว่า ACO/PSO ให้ค่าต่ำสุด ถัดมาคือ PSO และ ACO ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติของผลตอบสนองเชิงเวลาในตารางที่ 2 จะพบว่าคำตอบของ PSO มีค่า IAE ดีกว่าเล็กน้อย แต่ t_s สูงกว่า ทำให้ค่าฟังก์ชันจุดประสงค์สูงกว่าคำตอบของ ACO/PSO สมรรถนะของตัวควบคุมที่ออกแบบยืนยันด้วยผลตอบสนองเชิงเวลาต่ออินพุตแบบขั้นบันไดดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาถึงการลู่เข้าของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์จากวิธี ACO/PSO ดังรูปที่ 5 พบว่าทั้งเฟส ACO และ PSO มีค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ใกล้เคียงกันโดยสลับกันมีค่าต่ำกว่ากันเล็กน้อย และลดลงตามจำนวนรอบการวนซ้ำ การหาคำตอบด้วยวิธีที่นำเสนอมีข้อจำกัดในการปรับแต่งเนื่องจากพารามิเตอร์ของวิธีนี้มีจำนวนค่อนข้างมากและต้องใช้ความเข้าใจในการเลือกค่าที่เหมาะสม

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์จากการสังเคราะห์ตัวควบคุม FOPID

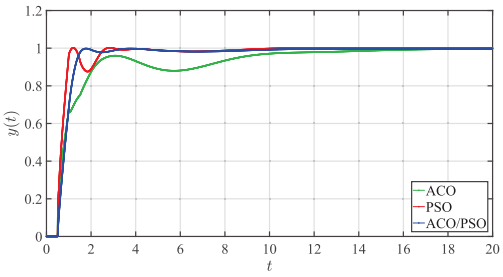
ตัวควบคุม	K_P	K_I	K_D	λ	μ	cost
ACO	1.6316	0.5305	1.0110	1.0175	1.1967	4.1776
PSO	1.5752	1.0474	1.8785	1.0268	0.9931	1.0608
ACO/PSO	0.6778	1.0880	1.7915	0.9712	0.7341	0.7774

ตารางที่ 2 สมบัติของผลตอบสนองเชิงเวลาต่ออินพุตแบบขั้นบันได

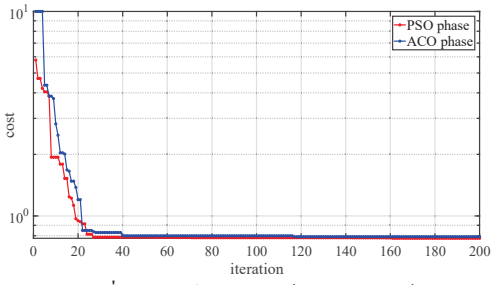
ตัวควบคุม	IAE	t_s (sec)	%OS
ACO	1.7200	12.2040	0.0011
PSO	0.8935	2.4816	0.1207
ACO/PSO	1.0508	1.5099	0.0229

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุม FOPID โดยผสมผสานขั้นตอนวิธี ACO เข้ากับ PSO ในรูปแบบการสลับกันหาค่าเหมาะที่สุด วิธีนี้สามารถหลีกเลี่ยงการลู่เข้าเร็วเกินไปและแก้ปัญหาการติดกับจุดต่ำสุดเฉพาะที่ซึ่งมักเกิดกับวิธี ACO และ PSO ได้ ผลการทดลองกับระบบตัวอย่างแสดงให้เห็นว่ากลยุทธ์แบบผสมผสานนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดี และสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบตัวควบคุม FOPID ได้



รูปที่ 4 ผลตอบสนองเชิงเวลาต่ออินพุตแบบขั้นบันได



รูปที่ 5 การลู่เข้าของค่าฟังก์ชันจุดประสงค์

เอกสารอ้างอิง

[1] C. Zhao, D. Xue and Y. Chen, "A Fractional Order PID Tuning Algorithm for A Class of Fractional Order Plants," Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, 2005, pp. 216–221.

[2] S. Chebli, A. Elakkary and N. Sefiani, "PID controller Tuning Using Multi-objective Ant Colony Optimization Applied to TCP/AQM Networks," Proceedings of International Conference on Automation and Computing (ICAC), 2017.

[3] Y. Dhieb, M. Yaich, A. Guermazi and M. Ghariani, "PID Controller Tuning Using Ant Colony Optimization for Induction Motor," J. Electrical Systems, vol. 15, no. 1, pp. 133–141, 2019.

[4] S. Das, I. Pan and S. Das, "Multi-objective LQR with Optimum Weight Selection to Design FOPID Controllers for Delayed Fractional Order Processes," ISA Transactions, vol. 58, pp. 35–49, 2015.

ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ ผ่านโปรแกรม LabVIEW และแอปพลิเคชัน LINE

Laboratory temperature and humidity monitoring system via LabVIEW and LINE Application

อรสา พุทธศรี[1] ธีวราพร เทพสุวรรณ[1] ดารารัตน์ มั่งคั่ง[1] ธมลวรรณ นัททีทอง[1] จุฑารัตน์ ทานะรมณ์[2] และ พลอยบุศรา โกมาสังข์[1*]
[1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
[2]ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
E-mail: gomasang_p@su.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบติดตามค่าอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ผ่านโปรแกรม LabVIEW และการแจ้งเตือนสภาวะแวดล้อมที่ผิดปกติผ่านแอปพลิเคชัน LINE และไซเรน ระบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้การวัดอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมี LabVIEW เป็นศูนย์กลางสำหรับสั่งการ การวัด วิเคราะห์ และควบคุมระบบ ซึ่งเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น SHT31 จากนั้นส่งข้อมูลการวัดไปยังบอร์ดควบคุม ESP8266 ซึ่งจะถ่ายโอนข้อมูลที่ประมวลผลแบบอัตโนมัติไปแสดงในรูปแบบกราฟและตัวเลขบนโปรแกรม LabVIEW แบบเรียลไทม์ โดยสามารถบันทึกข้อมูลและตรวจสอบย้อนกลับได้ และสามารถติดตามค่าอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์และค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่บันทึก (สูงสุด 120 นาที) ผ่านแอปพลิเคชัน LINE ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือ โดยมีความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิและความชื้น ±1 °C และ ±1.4 %RH ตามลำดับ และยังสามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดอื่นๆในอุตสาหกรรม ที่ทำงานผ่าน LabVIEW ได้

คำสำคัญ: อุณหภูมิ ความชื้น การสอบเทียบ โปรแกรม LabVIEW LINE แอพพลิเคชัน

Abstract

This work aims to develop a temperature and humidity real-time monitoring system for a laboratory using the LabVIEW program and notify of abnormal environmental conditions via the LINE application and siren. The system is designed to facilitate efficient measurement and data analysis of temperature and humidity of the laboratory. LabVIEW is the central interface for commanding, measuring, analyzing, and controlling the measurement system, which is connected to SHT31 temperature and humidity sensors. During the measurement process, the temperature and humidity are measured via SHT31 sensors and sent data to the ESP8266 board, which automatically transfers the processed data to display in real time as graphs and values on LabVIEW. All data can be saved and checked back via LabVIEW and. Laboratory staff can also track the real-time temperature and humidity values and the average of recorded data (up to 120 min.) via the LINE application. This temperature and humidity monitoring system is reliable ensuring with the uncertainties of ±1 °C and ±1.4 %RH for temperature and humidity measurements, respectively. This system is also compatible with other industrial measuring instruments that operate via LabVIEW.

Keywords: Temperature, Humidity, Calibration, LabVIEW, LINE notification.

1. บทนำ

การตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อใช้อ้างอิงสภาพแวดล้อมของห้องปฏิบัติการในขณะใช้งานเครื่องมือวัดตามข้อกำหนดจำเพาะของเครื่องมือวัด (Specification) และเพื่อความมั่นใจในการเก็บรักษาเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ

ที่ผ่านมามีการวิจัยและพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบเปิดและต้นทุนต่ำสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ ที่มีการบันทึกข้อมูลในการ์ดหน่วยความจำ [1] แต่ยังไม่รองรับการเรียกดูข้อมูลแบบเรียลไทม์ (real time) และมีงานวิจัยเครื่องมือเสมือนสำหรับการวัดความชื้นและอุณหภูมิโดยใช้ LabVIEW [2] ระบบนี้สามารถแสดงผลและเก็บข้อมูลได้ในลักษณะกราฟฟิกใน LabVIEW แต่ยังไม่มีการแสดงผลในกรณีที่ค่าที่วัดได้ผิดปกติหรือออกนอกขอบเขตที่กำหนด ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบการแจ้งเตือน และยังไม่สามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลังผ่านระบบได้

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบวัดอุณหภูมิและความชื้นที่สามารถวัด วิเคราะห์ และเรียกดูข้อมูลได้ทั้งแบบเรียลไทม์และย้อนหลัง ผ่านโปรแกรม LabVIEW และแอปพลิเคชัน LINE เป็นตัวกลางในการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลร่วมกับ NodeMCU ESP8266 และ เรียกดูข้อมูลผ่านระบบวัด โดยใช้เซนเซอร์ SHT31 [3] สำหรับวัดอุณหภูมิและ

ความชื้น จากนั้น LabVIEW จะดึงข้อมูลอัตโนมัติและทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ หากค่าที่วัดได้อยู่นอกขอบเขตที่กำหนดไว้ ระบบจะทำการแจ้งเตือนให้ผู้ดูแลทราบผ่าน 3 ช่องทาง ได้แก่ หน้าจอของโปรแกรม LabVIEW แอปพลิเคชัน LINE และแจ้งเตือนผ่านไซเรนที่ติดตั้งไว้หน้าห้องปฏิบัติการ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถรับรู้สถานะได้อย่างรวดเร็วและหาทางแก้ปัญหาได้ทันท่วงทีเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมือวัด นอกจากนี้ยังออกแบบให้สามารถติดตามข้อมูลย้อนหลังหรือดูแนวโน้มของอุณหภูมิและความชื้นได้สะดวกและรวดเร็ว

2.เครื่องมือและวิธีการ

2.1 หาจุดติดตั้งเซนเซอร์

เพื่อให้สภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบเหมาะสมสอดคล้องกับมาตรฐาน ISO/IEC 17025 [4] นั้น ในการกำหนดตำแหน่งสำหรับติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นอย่างเหมาะสมจึงต้องพิจารณาจากการสำรวจขนาดห้องและการตรวจสอบการกระจายของอุณภูมิภายในห้อง ในงานนี้เลือกใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอัตโนมัติที่สร้างขึ้นด้วยเซนเซอร์ RTD (Resistance Temperature Detector) เพื่อทำการวิเคราะห์สภาพแวดล้อมภายในห้องตัวอย่างขนาด 6.82×3.79×3.00 ตร.ม. ที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ 1 ตัว โดยจะทำการหาตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้วยการแบ่งตำแหน่งจากจุดกึ่งกลางห้องและกำหนดจุดวัดให้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดอย่างสมมาตร จากนั้นทำการเปรียบเทียบการวัดที่ระดับความสูง 2 ระดับ ได้แก่ ความสูงระดับโต๊ะทำงาน (สูงจากพื้น 0.75 เมตร) และความสูงเหนือศีรษะ (ต่ำจากเพดาน 0.5 เมตร) โดยตั้งอุณหภูมิที่เครื่องปรับอากาศเป็น 23 °C

2.2 ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ

ชุดวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในงานนี้เลือกใช้เซนเซอร์ SHT31 ดังรูปที่ 1 เพื่อติดตั้งถาวรในห้องปฏิบัติการ ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของซิลิคอนผ่านการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และทำการวัดความชื้นโดยใช้คุณสมบัติการเก็บประจุ (Capacitive) ทำการเชื่อมต่อเซนเซอร์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 เพื่อใช้ในการรับค่าจากเซนเซอร์ผ่านโปรโตคอล I^2C และใช้ Multiplexers TAC9548A ช่วยให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ I^2C หลายตัว เพื่อรองรับการใช้เซนเซอร์มากกว่า 1 ตัว มีการออกแบบระบบจ่ายไฟให้กับชุดวัด โดยใช้ Module DC-to-DC Step Down Converter สำหรับลดแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการใช้งานของ ESP8266 ซึ่งชุดวัดอุณหภูมิและความชื้นนี้ได้ถูกนำไปสอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยกำหนดจุดสอบเทียบให้ครอบคลุมกับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ ที่อุณหภูมิ 20 23 25 28 และ 30 °C และ ที่ความชื้น 40 50 60 70 80 และ 90 %RH ตามลำดับ

2.3 การแสดงผลและแจ้งเตือน

LabVIEW สามารถรับข้อมูลจากบอร์ดผ่านพอร์ต USB ทำการประมวลผลและแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นทั้งในรูปแบบกราฟและตัวเลข และสามารถบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ .CSV พร้อมระบุวันที่ และเวลาที่บันทึกในแต่ละช่วง เพื่อให้สามารถเรียกดูข้อมูลย้อนหลังได้อย่างสะดวก และผู้ใช้งานสามารถติดตามค่าอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชัน LINE และเรียกดูข้อมูลที่บันทึกไว้ก่อนหน้า โดยใช้ภาษา Python เป็นตัวกลางในการประมวลผลและสื่อสารระหว่างข้อมูลที่จัดเก็บไว้ในไฟล์ .CSV กับ LINE BOT เพื่อดึงข้อมูลไปแสดงเมื่อผู้ใช้กดเรียกดูจาก แถบริชเมนู (Rich menu)

นอกจากนั้นหากค่าอุณหภูมิและความชื้นอยู่นอกขอบเขตที่กำหนดหรือเกิดปัญหาการจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายหลักในสถานการณ์ที่ไฟฟ้าขัดข้อง จะมีการแจ้งเตือนผ่าน LINE และไซเรนที่ติดตั้งไว้หน้าห้อง โดยมีรีเลย์ 3.3 V เป็นสวิตช์ควบคุมการเปิด-ปิดวงจรไฟฟ้าของไซเรนในการแจ้งเตือน แสดงแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ดังรูปที่ 2

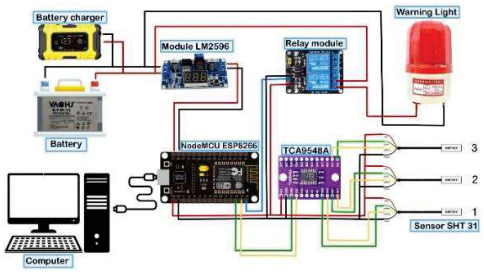
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

3.1 สรุปจุดติดตั้ง

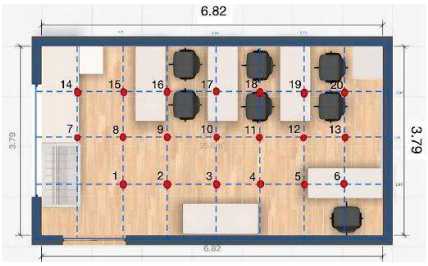
จากการวัดและวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องตัวอย่างจำนวน 20 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3 พบว่าสามารถแบ่งห้องออกเป็น 3 บริเวณ ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน (เนื่องจากตำแหน่งของเครื่องปรับอากาศ) โดยทุกจุดที่อยู่ในบริเวณเดียวกันที่ถูกแบ่งไว้จะมีอุณหภูมิต่างกันน้อยกว่า 1 °C จุดที่ 1–6 เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากลมจากเครื่องปรับอากาศตกกระทบโดยตรง จุดที่ 7–13 เป็นบริเวณที่อุณหภูมิเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมเย็นน้อยลง จุดที่ 14–20 เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง เนื่องจากอยู่ห่างจากเครื่องปรับอากาศและได้รับความร้อนสะสมจากภายในห้อง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 1 เซนเซอร์ SHT31



รูปที่ 2 แผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์



รูปที่ 3 ตำแหน่งจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิเพื่อหาจุดติดตั้งเซนเซอร์



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องตัวอย่างจำนวน 20 จุด โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ความสูงแตกต่างกัน 2 ระดับ

เพื่อให้การตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้เลือกติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น SHT31 ใน 3 ตำแหน่ง ที่ความสูงเหนือศีรษะ ได้แก่ จุดที่ 5 เป็นตัวแทนของบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากลมเย็นโดยตรง เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีการใช้งานจริง และมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด (จุดที่ 6) จุดที่ 10 เนื่องจากอยู่บริเวณกึ่งกลางของห้องและเป็นตัวแทนของอุณหภูมิระดับกลาง และจุดที่ 15 เป็นจุดที่ได้รับผลกระทบจากลมเย็นน้อยที่สุด และมีการสะสมความร้อนสูงสุด จึงใช้แทนบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงสุด โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์ ดังรูปที่ 5

3.2 ผลการสอบเทียบเซนเซอร์

จากใบรับรองผลการสอบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นทั้ง 3 ตัวพบว่ามีค่าความไม่แน่นอนสำหรับการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ ±1.0 °C และความชื้น ±1.4 %RH [5] ช่วยยืนยันว่าเครื่องมือที่ใช้สามารถวัดอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างแม่นยำ และสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์

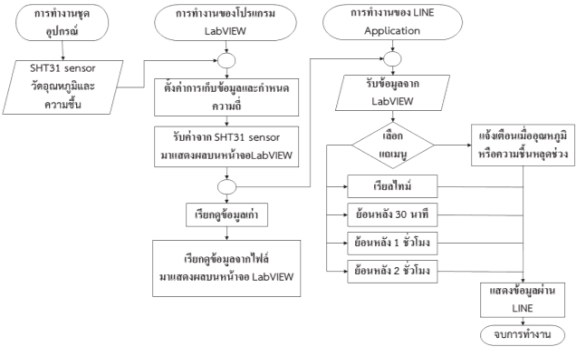


รูปที่ 5 จุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นทั้งหมด 3 จุด

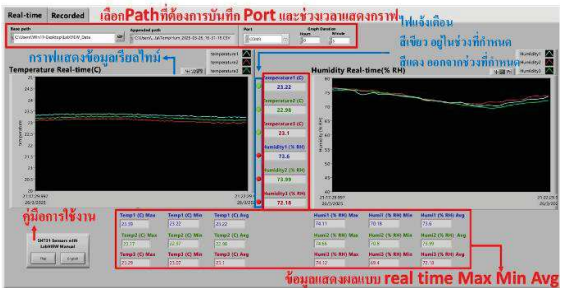
3.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

ภาพรวมหลักการทำงานของระบบการวัดอุณหภูมิและความชื้น ดังรูปที่ 6 ซึ่งมีทั้งการแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW และแจ้งเตือนผ่าน LINE โดยแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW ในโหมดเรียลไทม์ ดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยคำนวณค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ย รวมทั้งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นในรูปแบบกราฟ ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกในไฟล์ .CSV อัตโนมัติ ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างมีระเบียบและสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ ดังรูปที่ 8

การแจ้งเตือนผ่าน LINE สามารถติดตามค่าของอุณหภูมิและความชื้นแบบเรียลไทม์ และแบบย้อนหลัง 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง โดยการกดเรียกดูจาก แถบ Rich Menu ดังรูปที่ 9



รูปที่ 6 หลักการทำงานระบบการวัดอุณหภูมิและความชื้น



รูปที่ 7 การแสดงผลการทำงานโหมดเรียลไทม์ผ่าน LabVIEW



รูปที่ 8 การแสดงผลการทำงานโหมดการเรียกดูย้อนหลัง ผ่าน LabVIEW

นอกจากนี้หากค่าที่วัดได้อยู่นอกช่วงที่กำหนด ระบบจะทำการแจ้งผ่าน Boolean LED บน LabVIEW เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีแดง ณ ตำแหน่งของค่าที่อยู่นอกช่วงที่กำหนด แจ้งเป็นข้อความผ่าน LINE และไซเรนทำงาน

จากผลการทดสอบการแสดงผลผ่าน LabVIEW และการแจ้งเตือนผ่าน LINE พบว่าสามารถแจ้งเตือนข้อมูลได้ทันทีและให้ข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างถูกต้อง ณ เวลาที่มีการเรียกดู โดยแสดงตัวอย่างการ เรียกดูข้อมูลผ่าน LINE และ ข้อมูลในไฟล์ .CSV ที่บันทึกผ่าน LabVIEW ดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 แถบ Rich Menu ของแอปพลิเคชัน LINE

(ก)



(ข)

625	2025/03/28-17:28:39	23.28	67.26	23.15	67.43	23.2	66.88
626	2025/03/28-17:28:41	23.31	67.25	23.15	67.4	23.17	66.89
627	2025/03/28-17:28:43	23.29	67.21	23.15	67.4	23.19	66.89
628	2025/03/28-17:28:45	23.31	67.24	23.15	67.4	23.2	66.88
629	2025/03/28-17:28:48	23.31	67.2	23.17	67.36	23.21	66.84
630	2025/03/28-17:28:50	23.32	67.16	23.15	67.32	23.19	66.86
631	2025/03/28-17:28:52	23.31	67.12	23.17	67.31	23.2	66.85
632	2025/03/28-17:28:54	23.31	67.12	23.19	67.33	23.21	66.84
633	2025/03/28-17:28:56	23.32	67.12	23.18	67.3	23.21	66.82

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการแสดงผลผ่าน ก) แอปพลิเคชัน LINE และ ข) ข้อมูลในไฟล์ .CSV

4. สรุป

ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้นถูกออกแบบให้รับข้อมูลจากเซนเซอร์ SHT31 ที่ติดตั้งอยู่ต่ำกว่าเพดานในระยะ 0.5 เมตร ควบคุมการทำงานและการแสดงผลทั้งในรูปแบบตัวเลขและกราฟผ่านโปรแกรม LabVIEW และการเรียกดูข้อมูลแบบเรียลไทม์และย้อนหลังผ่านแอปพลิเคชัน LINE รวมถึงมีระบบแจ้งเตือนเมื่ออุณหภูมิหรือความชื้นออกนอกขอบเขตที่กำหนด ด้วย Boolean LED สีแดงบน LabVIEW ข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE และสัญญาณไฟจากไซเรนที่ติดตั้งไว้หน้าห้องจะทำงานทันที เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานรับรู้ถึงความผิดปกติและสามารถควบคุมหรือแก้ไขสถานการณ์ได้ทันท่วงที ซึ่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในระบบนี้ได้รับการสอบเทียบแล้ว และมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิและความชื้นที่ ±1.0 °C และ ±1.4 %RH ตามลำดับ ช่วยสร้างความมั่นใจและความน่าเชื่อถือของผลการวัดที่ทำขึ้นในห้องปฏิบัติการดังกล่าว และยังสามารถประยุกต์ใช้ระบบการวัดนี้กับการวัดค่าจากเครื่องมือวัดอื่นๆ ในอุตสาหกรรมที่ควบคุมผ่าน LabVIEW ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มงานถ่ายทอดค่ามาตรฐานและความชื้น ห้องปฏิบัติการความชื้น ฝ่ายมาตรวิทยาอุณหภูมิและแสง สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับสอบเทียบ และขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ส่งเสริมในการทำงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Rocha Ribeiro, E. Bauer, and R. Lameiras, “HIGROTERM: An open-source and low-cost temperature and humidity monitoring system for laboratory applications,” 2021.
[2] N. Nedev, Z. Nenova, and S. Ivanov, “Virtual instruments for humidity and temperature measurements,” Technical University of Gabrovo, 2025.
[3] Sensirion, “Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and temperature sensor, version 3,” Aug. 2016.
[4] T. Evans, “Environmental conditions for testing and calibration laboratories,” Accessed: Aug. 2024. [Online].Available: https://community.advisera.com/topic/requirements-for-temperature-humidity-and-room-type-in-house-calibration-lab/
[5] N. I. o. M. (Thailand), “Measurement Report THGP-25-0002,” 2025.


อรสา พุทธศรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร


ธีวราพร เทพสุวรรณ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร


ดารารัตน์ มั่งคั่ง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร


ธมลวรรณ นัทที่ทอง กำลังศึกษาระดับปริญญาโท ชั้นปีที่ 2 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร


จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ นักมาตรวิทยาชำนาญการ กลุ่มงานมาตรฐานปฐมภูมิไฟฟ้า เวลา และความถี่ ฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ


พลอยบุศรา โกมาสังข์ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร มีความสนใจด้านเครื่องมือวัดและการวัดทางไฟฟ้า

Digital Signal Processing

(DS)

ระบบประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

Adaptive Sigmoid-Based Low-light Image Enhancement

Thaweesak Trongtirakul[1*] Shiquan Wu[2] and Sos Agaian[3]

[1*]Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
[2]Institute of Advanced Displays and Imaging, Henan Academy of Sciences
[3]College of Staten Island and the Graduate Center, City University of New York (CUNY)
E-mail: thaweesak.tr@rmutp.ac.th[*]

Abstract

Low-light image enhancement encounters major challenges, frequently leading to artifacts such as color distortion and noise amplification. This paper presents a novel sigmoid-based adaptive approach to address these limitations, enhancing visibility and quality in poorly lit images. Our method dynamically modifies pixel values using a sigmoid function customized to local image characteristics. This content-aware processing adjusts to different regions within an image, improving dynamic range while preserving natural hues. Furthermore, we utilize a block-based algorithm in the *HSV* color space to increase local contrast. By operating in *HSV*, we enhance brightness and contrast without compromising color fidelity, a prevalent issue in existing methods. This approach effectively tackles non-uniform illumination, generating enhanced images with natural and realistic colors. Unlike previous methods that often oversaturate or amplify noise, our adaptive sigmoid function offers balanced enhancement, uncovering hidden details while maintaining a natural look. Experiments on the *LOL* dataset showcase our method's superiority over state-of-the-art techniques. Both qualitative and quantitative measures indicate improved shadow detail recovery, noise suppression, and color preservation, areas where traditional methods typically fall short.

Keywords: block-based image enhancement, low-light images, sigmoid-based image enhancement, non-uniform illumination

1. Introduction

Low-light image enhancement remains a critical challenge in computer vision, with applications such as autonomous navigation [1] and surveillance systems [2] to medical imaging [3, 4] and astronomical observation [5]. Images captured under insufficient illumination often suffer from poor visibility, color distortion, and amplified noise, which degrade the performance of computer and robot vision systems compared to well-lit conditions [6]. While existing enhancement methods have made significant progress [7], fundamental limitations persist in balancing detail preservation with noise suppression across diverse illumination scenarios [8].

Traditional Retinex-based approaches decompose images into reflection and illumination components through constrained optimization [9, 10]. The Multi-Scale Retinex (MSR) algorithm lead the direction by applying Gaussian filters at multiple scales to estimate illumination but often introduces halo artifacts near high-contrast edges due to improper scale selection [11, 12].

Recently, trailer-based low-light image enhancement approaches exploited the Retinex theory [13-16]. Fusion-based method for weakly illumination imagery (MF) attempted to combine multi-exposure inputs through reflection and illumination components [13]. While Low-light image enhancement with Semi-Decoupled Decomposition (LADD) method estimated the illumination component by using a Gaussian Total Variation model [14]. The reflection is estimated by jointly estimating its input image and the intermediate illumination. It demonstrates chrominance information. Adaptive Logarithmic Retinex (ALR) method utilizes a parametrized logarithmic model to visual details of visible imagery [15]. Finally, Adaptive Single Low-Light Image Enhancement (ASLLIE) method the logarithmic domain fractional stretching approach to estimate the reflectance component of the image based on the modified Retinex theory [16]. However, these approaches frequently amplify noise in dark regions and struggle with color fidelity preservation, particularly in scenes with non-uniform illumination

This paper presents a novel low-light image enhancement framework addressing these limitations through two key innovations. First, we develop an adaptive sigmoid-based low-light image enhancement function that dynamically adjust parameters based on the illumination of an image. Second, we introduce a block-based image enhancement that enhances local contrast and preserve chromatic fidelity.

The remainder of this paper details our technical details in Section 2, computer simulation validation in Section 3, and concludes in Section 4.

2. Proposed Method

The proposed method enhances low-light images using a multi-step processing pipeline based on the HSV color model, sigmoid-based contrast enhancement, and

adaptive contrast enhancement techniques. The steps involved in the method are as follows:

ALGORITHM 1: Adaptive Sigmoid-based Low-light image Enhancement (ASLE)

Input: Low-light image $I_{i,j,k}^{RGB}$ in RGB format.

Output: Enhanced image $E_{i,j,k}^{RGB}$ in RGB format.

Read the input low-light image, $I_{i,j,k}^{RGB}$.

$I_{i,j,k}^{HSV} \leftarrow HSV\left(I_{i,j,k}^{RGB}\right)$.

$V_{i,j}^{HSV} \leftarrow I_{i,j,k}^{HSV}; k = 3$.

$\tilde{V}_{i,j}^{HSV} \leftarrow \frac{V_{i,j}^{HSV} - \min\{V_{i,j}^{HSV}\}}{\max\{V_{i,j}^{HSV}\} - \min\{V_{i,j}^{HSV}\}}$.

Compute $\mu_{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}}$ and $\mu_{I_{i,j,k}^{RGB}}$.

$\alpha(\beta) \leftarrow \frac{\ln\left(\sigma_{I_{i,j,k}^{RGB}}\right)}{\ln\left(\mu_{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}} \cdot \sigma_{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}}\right)} \cdot \beta^{\ln\left(\mu_{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}} \cdot \sigma_{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}}\right)}$.

$\tilde{\boldsymbol{V}}_{i,j}^{HSV} \leftarrow f\left(V_{i,j}^{HSV}\right)$.

$\boldsymbol{V}_{i,j}^{HSV} \leftarrow \frac{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}}{\max\{\tilde{V}_{i,j}^{HSV}\}}$.

$\boldsymbol{I}_{i,j,k}^{HSV} \leftarrow \boldsymbol{V}_{i,j}^{HSV}; k = 3$.

$\boldsymbol{I}_{i,j,k}^{RGB} \leftarrow RGB\left(\boldsymbol{I}_{i,j,k}^{HSV}\right)$.

$\boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(\beta) \leftarrow E\left(\boldsymbol{I}_{i,j,k}^{RGB}\right)$.

$E_{i,j,k}^{RGB} \leftarrow \boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.0) + \boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.5) - \frac{\boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.0) \cdot \boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.5)}{\max\left\{\boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.0), \boldsymbol{E}_{i,j,k}^{RGB}(1.5)\right\}}$.

2.1 Adaptive Sigmoid-Based Image Enhancement

Adaptive Sigmoid-Based Image Enhancement aims to enhance image quality by dynamically adjusting pixel values through a sigmoid function designed for local image characteristics, ensuring consistent outcomes across different lighting conditions. This allows for content-aware processing, adapting differently to various regions within a single image. The primary goals include enhancing dynamic range and revealing details in shadows and highlights without an artificial look, preserving natural tones, increasing distinction between features while maintaining image coherence, and preserving or enhancing edges by controlling the function's slope to sharpen boundaries without halo artifacts. It also presents significant challenges in parameter selection, as the effectiveness depends heavily on choosing appropriate values for gain, offset, and scaling factors. Researchers have developed various approaches to automatic parameter estimation using image statistics or machine learning to predict optimal values, but finding the right balance between enhancement strength and natural appearance remains challenging.

Also, over-enhancement can create issues such as halo effects around high-contrast edges, noise amplification in uniform regions, and an artificial appearance. Sophisticated control mechanisms are needed to prevent these artifacts while achieving meaningful enhancement. Additional challenges include computational efficiency for real-time applications and developing objective quality metrics that correlate with subjective perception.

Applications span numerous fields including medical imaging, where diagnostic information must be preserved while improving visibility; satellite and remote sensing, which require enhancement across different scales while managing atmospheric distortion; and consumer photography, which must balance technical enhancement with aesthetic considerations to ensure images remain visually pleasing and natural.

Stevens' power law serves as the foundation of the model of brightness perception. According to this law, the perceived brightness is a power function of the luminance. The perceived brightness, $\psi(I)$, can be written as:

$$\psi(I) = I^k \tag{1}$$

where k is an exponent that dictates the rate at which perceived brightness increases as luminance changes. Furthermore, the Weber fraction can be approximated as an exponential function of the log-luminance. The exponent, k, can be modeled as an exponential function given as:

$$k(I) = \alpha\beta^{-\ln(I)} \tag{2}$$

where α and β are parameters that regulate the maximum value and the steepness of $k(I)$, respectively. The transformation function for perceived brightness, $\psi(I)$, is formulated as:

$$\psi(I) = L^{\alpha\beta^{-\ln(I)}} \tag{3}$$

To ensure mean-brightness preservation, the optimal value of α can be determined as:

$$\alpha_{\Phi} = \frac{\ln(\sigma(I))}{\ln(\sigma(\tilde{I})\mu(\tilde{I}))} \cdot \beta^{\ln(\sigma(\tilde{I})\mu(\tilde{I}))} \tag{4}$$

where $\sigma(\cdot)$ denotes the standard deviation of an image, $\mu(\cdot)$ represents the mean of an image, and $\tilde{I}$ refers to the normalized luminance. This formulation provides an adaptive image enhancement method that aligns with human visual perception, improving image quality while maintaining a natural brightness distribution as illustrated in Fig. 1.



(a) Given image (b) Sigmoid-enhanced image

Fig. 1 Comparison of original and sigmoid-enhanced images

2.2 Block-Based Image Enhancement

Let $I_{i,j,k}$ be an image of size i, j, k, where i represents the height, j represents the width, and k corresponds to the color component, including red, green, and blue. A transformation matrix B is constructed to reorganize these components for processing as follows:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_1 & k_2 & \cdots \\ k_3 & k_4 & k_3 & k_4 & \cdots \\ k_1 & k_2 & k_1 & k_2 & \cdots \\ k_3 & k_4 & k_3 & k_4 & \cdots \end{bmatrix}_{x \times y} \quad (5)$$

By reorganizing all color components, the enhanced color components undergo adaptive histogram equalization applied to the image, $\mathcal{I}_{i,j}$, which serves as input for contrast enhancement. The calculation can be expressed as:

$$\mathcal{J}_{i,j} = f_c\left(\mathcal{I}_{i,j}(\mathbf{B})\right) \quad (6)$$

where $\mathcal{I}_{i,j}(\mathbf{B})$ represents a pattern-structured image array, and $f_c(\cdot)$ is the adaptive histogram equalization function. The enhanced image can be transformed as:

$$E_{i,j,k} = \begin{cases} \mathcal{I}_{i,j}(\mathbf{B}), & \mathbf{B} = k_1 \\ \mathcal{I}_{i,j}(\mathbf{B}), & \mathbf{B} = k_2 \\ \mathcal{I}_{i,j}(\mathbf{B}), & \mathbf{B} = k_3 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 2 presents the enhanced image demonstrated in Fig. 1. The enhancement improves visual clarity and contrast, making finer details more distinguishable.



Fig. 2 Enhanced image of Fig. 1 using the proposed block-based image enhancement

3. Computer Simulation Results

Several hundred test images were taken from the LOL dataset [17] for the comparison of the proposed method with Low-Light Image Enhancement with Semi-Decoupled Decomposition (LSDD) [14], Fusion-based enhancement (MF) [13], Multi-Scale Retinex (MSR) [18], Adaptive Logarithmic Retinex (ALR) [15], and Adaptive Single Low-Light Image Enhancement (ASLLIE) [16]. The state-of-the-art methods were run with the default parameters suggested by the authors.

3.1 Objective Assessment

We utilized Lightness Order Error (LOE), Mean Squared Error (MSE), and Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) for evaluation. LOE estimates per-pixel lightness ordering errors in the Lab color model between the enhanced image and the low-light image. MSE estimates the deviation from the enhanced image compared with the ground truth image using the mean of the squared intensity errors at all pixels. PSNR estimates the power of the optimal image signal versus the power of the disturbance present in the image's representation.

Based on the results of the LOE, the proposed method results in the lowest LOE for all the images. MF and ASLLIE methods also have comparably low LOE with the remaining. Regarding the MSE performance, the proposed method results in the lowest MSE for all the images with the lowest distortion compared to the reference image. MF also demonstrates competitive MSE values, particularly in the Wok and Closet images. Regarding the PSNR, the proposed method results in the highest PSNR for all the images with the optimal combination of the reduction of the noise and the preservation of the details. MF also results in PSNR comparable to the proposed method, which is closely challenged in *Closet* and *Artwork*.

Table 1 Objective evaluation

Name	Method	LOE (↓)	MSE (↓)	PSNR (↑)
Wok	LSDD	406.1871	2,698.2580	13.8200
	MF	105.6174	775.6870	19.2339
	MSR	281.9548	1,769.5168	15.6523
	ALR	223.2808	1,272.4956	17.0842
	ASLLIE	169.3194	1,060.0726	17.8774
	Proposed	**78.2394**	**599.2004**	**20.3551**
Closet	LSDD	352.5137	2,008.0309	15.1031
	MF	94.6367	527.6742	20.9071
	MSR	196.1180	1,677.5868	15.8840
	ALR	94.2395	680.7467	19.8009
	ASLLIE	199.2656	1,561.8602	16.1944
	Proposed	**75.5468**	**501.1262**	**21.1313**
Artwork	LSDD	349.5060	2,275.2103	14.5606
	MF	96.2218	762.2293	19.3099
	MSR	405.6023	2,351.4322	14.4175
	ALR	155.1539	751.8023	19.3698
	ASLLIE	412.8974	2,455.2964	14.2298
	Proposed	**88.7824**	**723.5868**	**19.5359**

3.2 Subjective Assessment

Although an image holds more quantitative measures regarding other images, its subjective image quality is not necessarily correspondingly higher. Because of this, the following section contains examples of enhanced images for the subjective assessment of their image qualities as well as the comparison of the characteristics of the new approach with the traditional approach.

Fig. 3 demonstrates the enhanced images named *Wok*, *Closet*, and *Artwork* from the LOL database. Based on the visual assessment, LSDD and MF methods provide moderate brightness enhancement but lack contrast in shadowed areas. MSR illustrates good contrast, however, it generates a halo artifact. ALR method results in over-enhancement with unnatural brightness shifts, leading to possible loss of fine details and color distortion. ASLLIE improves visibility but introduces a slightly washed-out appearance. On the other hand, the proposed method achieves a well-balanced enhancement, maintaining

natural colors, appropriate contrast, and clear details without excessive brightness amplification.



(a) Input image [17] (b) Reference [17] (c) LSDD [14] (d) MF [13]



(e) MSR [18] (f) ALR [15] (g) ASLLIE [16] (h) Proposed method

Fig. 3 Enhanced images of *Wok*, *Closet*, and *Artwork* from the LOL database

4. Conclusion

In this study, we have addressed the challenges of non-uniform illumination in low-light imagery. Our approach involves transforming an input image into the *HSV* color-space and applying an image-dependent sigmoid-based image enhancement function. By adaptively adjusting the α and β parameters, we fuse the enhanced imaging components to normalized brightness and information. Furthermore, we visualize the contrast of the color image by performing local image enhancement on a pattern-structured image array. This technique significantly enhances the visual quality, effectively preserving both contrast and brightness, simultaneously.

Comparative evaluations against state-of-the-art methods demonstrate that our introduced framework achieves visually pleasing intrinsic components and outperforms competitive methods regarding subjective observations and objective image quality assessments. The proposed method exhibits adaptability in enhancing images with non-uniform illumination, resulting in natural-looking outputs.

References

[1] R. Sivapriyan *et at.*, "Low Light, Blurred Image Enhancement and Segmentation of Objects for Autonomous Navigation of Vehicles," in *2024 3rd International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, 6-8 Sept. 2024, pp. 1-8.

[2] S. Ai, and J. Kwon, "Extreme Low-Light Image Enhancement for Surveillance Cameras Using Attention U-Net," *Sensors*, vol. 20, no. 2, doi: 10.3390/s20020495.

[3] T. O. Takpor *et al.*, "Development of a Low-Intensity Light Imaging Probe for Childbirth Cervical Dilation Image Acquisition," *IEEE Access,* vol. 11, pp. 86149-86164, 2023.

[4] A. Oulefki *et al.*, "Enhancing Intubation Accuracy: Advanced Tracheal Segmentation Techniques In Video Endoscopy," in *2024 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 27-30 Oct. 2024, pp.2833-2838.

[5] Y. Liang *et al.*, "Stray Light Correction and Enhancement of Nocturnal Low-Light Image of Early-Morning-Orbiting Fengyun-3E Satellite," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* vol. 62, pp. 1-13, 2024.

[6] T. Trongtirakul, and S. Agaian, "New Retinex Model-Based Infrared Image Enhancement," in *Proc.SPIE Commercial Sensing and Defense*, 2023, vol. 12526, p. 1252606, doi: 10.1117/12.2661334.

[7] W. Wang *et al.*, "An Experiment-Based Review of Low-Light Image Enhancement Methods," *IEEE Access,* vol. 8, pp. 87884-87917, 2020.

[8] L. He *et al.*, "Detail-Preserving Noise Suppression Post-Processing for Low-Light Image Enhancement," *Displays,* vol. 83, p. 102738.

[9] E. H. Land, and J. J. McCann, "Lightness and Retinex Theory," *Journal Opt. Soc. Am.,* vol. 61, no. 1, pp. 1-11.

[10] E. H. Land, "The Retinex Theory of Color Vision," (in eng), *Sci Am.,* vol. 237, no. 6, pp. 108-28, Dec 1977.

[11] H. Tsutsui *et al.*, "Halo Artifacts Reduction Method for Variational Based Realtime Retinex Image Enhancement," in *Proc. 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, 3-6 Dec. 2012, pp. 1-6.

[12] C. Liu *et al.*, "Efficient Retinex-Based Framework for Low-Light Image Enhancement without Additional Networks," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology,* pp. 1-1, 2024.

[13] X. F. *et al.*, "A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images," *Signal Processing,* vol. 129, pp. 82-96, 1 December 2016.

[14] S. Hao *et al.*, "Low-Light Image Enhancement With Semi-Decoupled Decomposition," *IEEE Transactions on Multimedia,* vol. 22, no. 12, pp. 3025-3038, 2020.

[15] T. Trongtirakul *et al.*, "Adaptive logarithmic Retinex enhancement for iceberg detection in visible imagery," in *Proc.SPIE*, 2024, vol. 13033, p. 1303302.

[16] T. Trongtirakul, S. S. Agaian, and S. Wu, "Adaptive single low-light image enhancement by fractional stretching in logarithmic domain," *IEEE Access,* vol. 11, pp. 143936-143947, 2023.

[17] C. Wei *et. al*, "Deep retinex decomposition for low-light enhancement," *arXiv preprint arXiv:1808.04560,* 2018.

[18] M. Afifi *et al.*, "Learning Multi-Scale Photo Exposure Correction," in *2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 20-25 June 2021, pp. 9153-9163.

วงจรตรวจหาที่ทำงานด้วยมัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์น

An Multi-Layer Perceptron-Based Detector for Bit-Patterned Magnetic Recording Systems

สันติ กูลการขาย[1*] นิรัช ชัยหา[1] ชานนท์ วริสาร[2] สถาปัตย์ กิลาโส[3] และ ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]คณะเทคโนโลยีนวัตกรรมบูรณาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
[3]วิทยาลัยนวัตกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
E-mail: santi@npru.ac.th*

บทคัดย่อ

การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพที่จะมาแทนที่การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามการแทรกสอดระหว่างแทร็กเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง โดยเฉพาะเมื่อระบบทำงานที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง โดยทั่วไปเทคนิค PRML ถูกใช้ในการตรวจหาบิตที่ควรจะเป็นสูงสุด แต่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น บทความนี้ได้นำเสนอ วงจรตรวจหาที่ใช้มัลติเลเยอร์เพอร์เซปตรอนสำหรับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์นที่ใช้ 3 หัวอ่านเพื่อตรวจจับข้อมูล 1 แทร็ก ผลการทำแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอให้สมรรถนะดีกว่าระบบดั้งเดิม โดยเฉพาะที่ความหนาแน่นเชิงพื้นที่สูง อีกทั้งยังทนทานต่อผลกระทบจากการอ่านนอกแทร็กและสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกได้ดีกว่าระบบแบบดั้งเดิมอีกด้วย

คำสำคัญ: วงจรตรวจหา, เพอร์เซปตรอนหลายชั้น, การบันทึกเชิงแม่เหล็ก

Abstract

Bit-patterned magnetic recording is a promising technology that has the potential to replace the current perpendicular magnetic recording. However, inter-track interference is a major challenge that degrades system performance, particularly at high areal densities. Typically, partial response maximum likelihood is used for maximum-likelihood data detection, but its performance declines as areal density increases. Therefore, this paper proposes a multi-layer perceptron-based data detection for 3-head 1-track bit-patterned magnetic recording systems. Simulation results demonstrate that the proposed method outperforms conventional systems, especially at high areal densities. Additionally, it is more robust to track mis-registration and media noise than conventional systems.

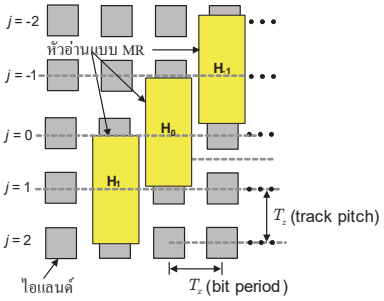
Keywords: data detection, multi-layer perceptron, magnetic recording

1. บทนำ

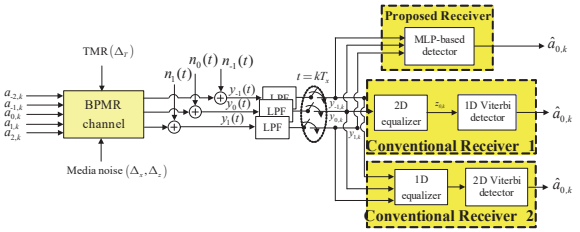
เทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording: PMR) ถูกใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน โดยสามารถบรรจุความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density; AD) สูงสุดที่ประมาณ 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tb/in²) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดจากปรากฏการณ์ซูเปอร์พาราแมกเนตริก (superparamagnetic limit) ทำให้เทคโนโลยี PMR ไม่สามารถเพิ่ม AD ได้สูงกว่านี้ ดังนั้นเพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ หนึ่งในนั้นคือเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบบิตแพทเทิร์น (bit-patterned magnetic recording; BPMR) ซึ่งสามารถเพิ่ม AD ได้สูงถึง 5 Tb/in² [1] ระบบ BPMR ทำงานโดยบันทึกข้อมูลบิตลงบนเกาะข้อมูลหรือเรียกว่า “ไอแลนด์ (island)” ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กและถูกล้อมรอบด้วยวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละไอแลนด์จะลักษณะที่เหมือนกันและถูกจัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ

อย่างไรก็ตาม ระบบ BPMR มีข้อจำกัดสำคัญที่เกิดจากการแทรกสอดระหว่างบิต (intersymbol interference; ISI) และการแทรกสอดระหว่างแทร็ก (intertrack interference; ITI) ซึ่งรวมกันเรียกว่า การแทรกสอดแบบสองมิติ (2D interference) ปัญหานี้มีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อความหนาแน่นเชิงพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากระยะบิต (bit period) และระยะแทร็ก (track pitch) ลดลง ส่งผลให้ ISI และ ITI เพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจาก ISI และ ITI แล้ว ระบบ BPMR ยังได้รับผลกระทบจากการอ่านนอกแทร็กหรือการเคลื่อนที่ของหัวอ่านในทิศทางข้ามแทร็ก (across track) ซึ่งเรียกว่า แทร็กมิสเรจิสเทรชัน (track mis-registration; TMR) รวมถึงความผันผวนของตำแหน่งและขนาดของไอแลนด์ ซึ่งก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึก (media noise) ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความแม่นยำและสมรรถนะของระบบ BPMR

ตัวอย่างงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กมีดังนี้ Nakthanom และคณะ [2] ได้ใช้อีควอไลเซอร์ (equalizer) ที่ทำงานด้วย MLP (multi-layer perceptron) ซึ่งให้สมรรถนะที่ดีกว่าอีควลอไลเซอร์ที่ออกแบบด้วยหลักการข้อผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (minimum mean squared error; MMSE) Nguyen และ Lee [3] ได้ใช้



รูปที่ 1 การจัดเรียงของไอแลนด์และหัวอ่านของระบบ BPMR



รูปที่ 2 แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR

LSTM (long short-term memory) เพื่อจัดการผลกระทบจากการแทรกสอดแบบสองมิติ (2D interference) ในระบบ BPMR นอกจากนี้ Jeong และ Lee [4] ได้ใช้อัลกอริทึม **K**-means ในการประมาณค่าความรุนแรงของ TMR เพื่อเลือกทาร์เก็ต (target) และอีควอไลเซอร์ให้เหมาะสมกับระดับของ TMR

บทความนี้จะนำเสนอวงจรตรวจหาสัญญาณที่ทำงานด้วย MLP กับระบบตรวจจับแบบสามหัวอ่านหนึ่งแทร็ก (3-head 1-track detection) โดยมีการจัดเรียงของไอแลนด์และหัวอ่านตามที่แสดงในรูปที่ 1 พร้อมทั้งเปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบที่ใช้เทคนิคผลตอบสนองบางส่วนควรจะเป็นมากสุด (partial response maximum likelihood: PRML) ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรอีควอไลเซอร์และวงจรตรวจหาวิเทอร์บิ (Viterbi detector) นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนจากสื่อบันทึกเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวงจรตรวจหาที่นำเสนอด้วย

2. แบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR

รูปที่ 2 เป็นแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR เมื่อกำหนดให้ $a_{j,k} \in \{\pm 1\}$ คือลำดับข้อมูลที่ถูกเขียนลงบนสื่อบันทึก โดยที่ $j \in \{\pm 2, \pm 1, 0\}$ คือลำดับของแทร็กและ k คือลำดับของบิต ที่ภาครับหัวอ่าน (read head) แบบ MR (magneto-resistive) จะตรวจจับสภาพความเป็นแม่เหล็กของแต่ละไอแลนด์ทำให้ได้สัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งจะเรียกว่าสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) $y_j(t)$ ของหัวอ่านที่ j ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y_j(t) = \sum_m \sum_n a_{m+j,n} H((m+j)T_z, t - nT_x) + n_j(t) \qquad (1)$$

เมื่อ $H(z,x)$ คือผลตอบสนองอิมพัลส์สองมิติ (2D impulse response) และ $n_j(t)$ คือสัญญาณรบกวนเกาส์สีขาวแบบบวก (additive white Gaussian noise; AWGN) สำหรับผลตอบสนองอิมพัลส์สองมิติสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ [5]

$$H(z,x) = A \exp\left\{-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{x+\Delta_x}{cW_x}\right)^2 + \left(\frac{z+\Delta_z+\Delta_T}{cW_z}\right)^2\right\}\right\} \qquad (2)$$

เมื่อ $A = 1$ คือค่านอร์มอไลซ์แอมพลิจูด (normalized amplitude) ของสัญญาณอ่านกลับ, $c \approx 0.42466$ คือค่าคงตัวที่ได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า PW_{50} และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟังก์ชันเกาส์, $\mathbf{W_x}$ = 19.44 nm คือค่า PW_{50} ในทิศทางตามแทร็ก, $\mathbf{W_z}$ = 24.8 nm คือค่า PW_{50} ในทิศทางข้ามแทร็ก, และ Δ_T คือระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านออกจากแทร็กในทิศทางข้ามแทร็ก โดยผลกระทบจาก TMR ในหน่วยเปอร์เซ็นต์สามารถคำนวณได้จาก

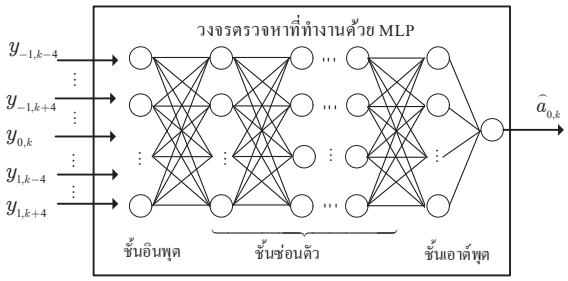
$$\text{TMR} = \frac{\Delta_T \times 100}{T_z} \ (\%) \qquad (3)$$

สำหรับสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจะถูกกำหนดโดย Δ_x และ Δ_z คือความผันผวนของตำแหน่งไอแลนด์ในทิศทางตามแทร็กและในทิศทางข้ามแทร็ก ตามลำดับ ซึ่งสัญญาณรบกวนสื่อบันทึกจะถูกจำลองในรูปแบบของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเกาส์ (Gaussian probability distribution function) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ_x^2 เมื่อ σ_x จะถูกกำหนดให้เป็นเปอร์เซ็นต์ของ T_x

ในช่องสัญญาณแบบทั่วไปสัญญาณอ่านกลับจะถูกส่งเข้าไปยังวงจรกรองต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธอันดับที่ 7 (7^{th} order Butterworth lowpass filter) เพื่อกำจัดสัญญาณนอกแถบความถี่ใช้งาน หลังจากนั้นสัญญาณที่ถูกกรองจะถูกส่งเข้าไปยังวงจรชักตัวอย่าง (sampler) ที่อัตราการชักตัวอย่างที่ $t = kT_x$ ทำให้ได้ลำดับข้อมูล $y_{j,k}$ โดยลำดับข้อมูล $y_{j,k}$ จะถูกปรับสัญญาณด้วยวงจรอีควอไลเซอร์ที่ออกแบบด้วยหลักการ MMSE [6] ให้เป็นไปตามทาร์เก็ตที่ต้องการ ซึ่งทาร์เก็ตนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างวงจรตรวจหาวิเทอร์บิ สัญญาณเอาต์พุตของวงจรอีควอไลเซอร์จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรตรวจหาวิเทอร์บิเพื่อหาค่าบิตที่ควรจะเป็นมากสุดของลำดับข้อมูลอินพุต $a_{0,k}$

3. วงจรตรวจหาที่ใช้ MLP

โดยทั่วไปแล้ว MLP จะถูกใช้สำหรับการแก้ปัญหาที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ที่อยู่ในแต่ละโนด (node) เช่นเดียวกับปัญหาที่ระบบ BPMR ที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นเช่นกัน โดยบทความนี้จะพิจารณาแบบจำลองช่องสัญญาณ BPMR ในรูปที่ 2 เมื่อ $\{y_{-1,k}, y_{0,k}, y_{1,k}\}$ คือลำดับข้อมูลสัญญาณอ่านกลับจาก



รูปที่ 3 โครงสร้างวงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP

ทั้ง 3 หัวอ่านที่จะถูกป้อนเข้าไปยังวงจรตรวจหาที่ใช้ MLP เพื่อตรวจหาลำดับข้อมูลอินพุต $\{a_{0,k}\}$ โดยที่ค $y_{0,k+4}, y_{1,k-4}, \ldots, y_{1,k+4}\}$ ขนาด 27 × 1 คือจำนวนโนดของชั้นอินพุต (input layer) สำหรับโครงสร้างของ MLP จะมี 4 ชั้นซ่อนตัว (hidden layer) แต่ละชั้นจะมีจำนวนโนดเท่ากับ 128, 64, 32 และ 16 ตามลำดับ แต่ละโนดจะใช้ไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ (hyperbolic tangent: tanh) เป็นฟังก์ชันกระตุ้น ซึ่งเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้คือ

$$f(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}} \tag{4}$$

เมื่อ x คืออินพุตของฟังก์ชันกระตุ้น สำหรับชั้นเอาต์พุต (output layer) จะมีเพียง 1 โนด และใช้ tanh เป็นฟังก์ชันกระตุ้นเช่นกัน ในกระบวนการเรียนรู้จะใช้อัลกอริทึม Adam เป็นตัวปรับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละโนดเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้อัตราการเรียนรู้ (learning rate) เท่ากับ 0.001 และใช้ชุดข้อมูลในการเรียนรู้ทั้งหมด 500 เซ็กเตอร์ (1 เซ็กเตอร์ มีข้อมูลจำนวน 4096 บิต) เมื่อระบบไม่มีผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

4. เงื่อนไขและผลของการทำแบบจำลอง

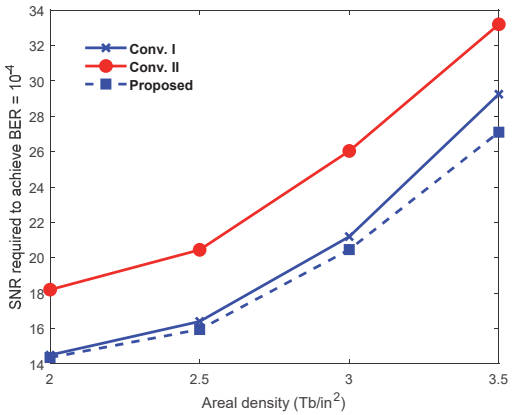
จากรูปที่ 2 ในการทำแบบจำลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของหัวอ่านและสื่อบันทึกตามที่แสดงในตารางที่ 1 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำแบบจำลอง และกำหนดให้อัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังของสัญญาณรบกวน (signal-to-noise ratio: SNR) มีค่าเท่ากับ

$$\text{SNR} = 20\log_{10}\left(\frac{A}{\sigma}\right) \text{ หน่วย dB} \tag{5}$$

รูปที่ 4 เป็นสมรรถนะของระบบต่าง ๆ ในรูปแบบของอัตราข้อผิดพลาดของบิต (bit-error rate: BER) ที่ค่า AD = 2, 2.5, 3 และ 3.5 Tb/in^2 ของระบบต่าง ๆ ดังนี้ “Proposed” คือระบบที่นำเสนอโดยการใช้ MLP ทำหน้าที่เป็นวงจรตรวจหา, “Conv. I” [5] คือระบบแบบทั่วไปที่ใช้อีควอไลเซอร์แบบสองมิติและวงจรตรวจหาวิเทอร์บิหนึ่งมิติ (ใช้ 3 หัวอ่านตรวจจับข้อมูล 1 แทร็ก),

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของไอแลนด์และหัวอ่าน [5]

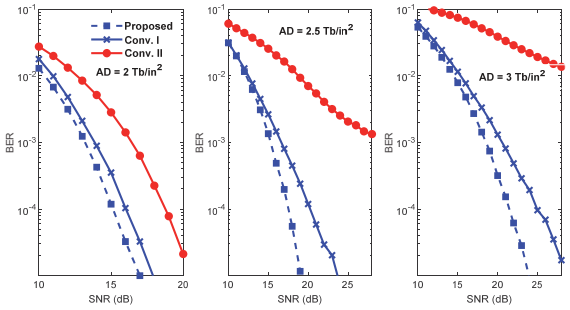
พารามิเตอร์	ค่า (nm)
ขนาดของไอแลนด์	11
ความหนาของสื่อบันทึก	10
ระยะบินของหัวอ่าน	10
ความหนาของหัวอ่านแบบ MR	4
ความกว้างของหัวอ่านแบบ MR	16
ความกว้างระหว่างช่องว่าง	16
PW_{50} ในทิศทางตามแทร็ก	19.8
PW_{50} ในทิศทางข้ามแทร็ก	24.8



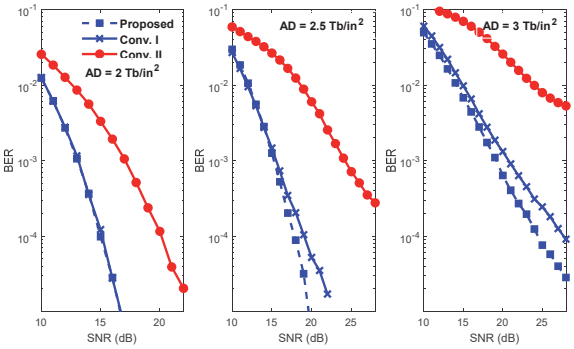
รูปที่ 4 สมรรถนะของระบบต่าง ๆ ในรูปแบบของ SNR ที่ทำให้เกิดค่า BER = 10^{-4} ณ ค่า AD = 2, 2.5, 3 และ 3.5 Tb/in^2 เมื่อระบบไม่มีผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก

และ “Conv. II” [7] คือระบบแบบทั่วไปที่ใช้อีควอไลเซอร์แบบหนึ่งมิติและวงจรตรวจหาวิเทอร์บิสองมิติที่ใช้ทาร์เก็ตสองมิติแบบไม่สมมาตร [7] (ใช้ 1 หัวอ่านตรวจจับข้อมูล 1 แทร็ก) จากผลการทำแบบจำลองจะเห็นว่าเมื่อ AD เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง เนื่องมาจากผลกระทบจาก ITI [5], [7]

สำหรับระบบ “Conv. I” และ “Conv. II” จะทำการออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ ณ SNR ที่ทำให้เกิด BER = 10^{-4} เมื่อระบบไม่มีผลกระทบจาก TMR และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก จากการทำแบบจำลองได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละวิธีที่ค่า BER = 10^{-4} และที่ AD = 2, 2.5, 3, 3.5 Tb/in^2 พบว่าวงจรตรวจหาที่นำเสนอให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบ “Conv. I” ประมาณ 0.14, 0.45, 0.74 และ 2.15 dB ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อค่า AD เพิ่มขึ้นระบบที่นำเสนอจะยิ่งให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบ “Conv. I” และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับระบบ “Conv. II” พบว่าจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าประมาณ 3.84, 4.5, 5.58 และ 6.1 dB ตามลำดับ



รูปที่ 5 สมรรถนะของระบบต่าง ๆ ที่ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 เมื่อมีผลกระทบจาก TMR 10%



รูปที่ 6 สมรรถนะของระบบต่าง ๆ ที่ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 เมื่อมีผลกระทบจากสื่อบันทึก 5%

รูปที่ 5 เป็นสมรรถนะของระบบต่าง ๆ ที่ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 เมื่อระบบมีผลกระทบจาก TMR 10% จากผลการทำแบบจำลองพบว่าระบบ “Proposed” จะทนทานต่อผลกระทบจาก TMR ได้ดีกว่าการใช้ “Conv. I” และ “Conv. II” โดยเฉพาะที่ค่า AD สูง ๆ และจากผลการทำพบว่าระบบ “Proposed” ให้อัตราการขยายดีกว่าระบบ “Conv. I” เท่ากับ 0.8, 2.75, 3.5 dB ที่ BER = 10^{-4} ณ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 ตามลำดับ และสำหรับระบบ “Conv. II” จะให้เกิดพื้นข้อผิดพลาด (error floor) เมื่อ AD มากกว่า 2.5 Tb/in^2

รูปที่ 6 เป็นสมรรถนะของระบบต่าง ๆ ที่ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 เมื่อมีผลกระทบจากสื่อบันทึก 5% จากผลการทำแบบจำลองพบว่าระบบ “Proposed” จะทนทานต่อผลกระทบจาก TMR ได้ดีกว่าการใช้ “Conv. I” และ “Conv. II” โดยเฉพาะที่ค่า AD สูง ๆ จะพบว่าระบบ “Proposed” จะให้อัตราการขยายดีกว่าระบบ “Conv. I” เท่ากับ 0.05, 1.2, 3.3 dB ที่ BER = 10^{-4} ณ AD = 2, 2.5 และ 3 Tb/in^2 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามระบบ “Proposed” จะใช้วงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP ซึ่งมีความซับซ้อนสูงมากกว่าระบบ “Conv. I” และ “Conv. II” ค่อนข้างมาก ซึ่งในตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบความซ้อนของวิธีต่าง ๆ สำหรับการตรวจหาข้อมูล 1 บิต ในรูปแบบของจำนวนตัวดำเนินการต่าง ๆ

ตารางที่ 2 ความซับซ้อนในการตรวจหาข้อมูล 1 บิต

ความซับซ้อน	Proposed	Conv. I	Conv. II
ตัวดำเนินการบวก/ลบ	14,928	32	583
ตัวดำเนินการคูณ/หาร	14,448	29	518
ฟังก์ชันและเปรียบเทียบ	240	8	512

จะพบว่าระบบ “Proposed” มีความซับซ้อนสูงสุด “Conv. II” และ “Conv. II” ตามลำดับ

5. สรุป

ITI เป็นปัญหาหลักของเทคโนโลยี BPMR โดยอย่างยิ่งที่ AD สูง ๆ [5] โดยทั่วไประบบ BPMR จะใช้เทคนิค PRML จะถูกใช้สำหรับการตรวจหาบิตข้อมูล ซึ่งจะอ่อนไหวต่อ TMR และสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก [7] บทความนี้ได้นำเสนอวงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP ซึ่งจากผลการทำแบบจำลองพบว่าวงจรตรวจหาที่ทำงานด้วย MLP ให้สมรรถนะที่กว่าวงจรตรวจหาแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มี AD สูง ๆ และผลกระทบจาก TMR หรือสัญญาณรบกวนสื่อบันทึก อย่างไรก็ตามการนำระบบที่นำเสนอมาใช้งานควรต้องประนีประนอมระหว่างสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นกับความซับซ้อนที่สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Shiroishi, **et al**. “Future options for HDD storage,” **IEEE Trans. Magn.**, vol. 45, no. 10, pp. 3816 – 3822, Oct. 2009.

[2] S. Nakthanom, S. Koonkarnkhai, and P. Kovintavewat, “An MLP-based equalization for bit-patterned magnetic recording systems,” in Proc. of **The 39th ITCCSCC-2024**, Okinawa, Japan, July 2 - 5, 2024.

[3] T. A. Nguyen and J. Lee, “Using long short-term memory to estimate the 2-D interference of bit-patterned media recording systems,” **IEEE Trans. Magn.**, vol. 60, no. 9, pp. 1-5, Sept. 2024.

[4] S. Jeong and J. Lee, “Track mis-registration estimator based on K-means algorithm for bit-patterned media recording,” **IEEE Trans. Magn.**, vol. 59, no. 3, pp. 1-5, March 2023.

[5] S. Nabavi, “**Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference**,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comp. Sci., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 2008.

[6] J. Moon and W. Zeng, “Equalization for maximum likelihood detector,” **IEEE Trans. Magn.**, vol. 31, no. 2, pp. 1083 – 1088, Mar. 1995.

[7] S. Koonkarnkhai, P. Keeratiwintakorn, and P. Kovintavewat “Target and equalizer design for high-density bit-patterned media recording,” **ECTI Trans. Comput. Inf. Technol.**, vol. 6, no. 2, pp. 175 – 182, Nov. 2012.

Energy and Conversation of Energy

(ES)

พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ชุดวัดพลังงานและประสิทธิภาพความเย็นของเครื่องปรับอากาศผ่านเครือข่ายไร้สาย

Wireless networked air conditioner power and energy efficiency ratio monitoring system

สมศักดิ์ วัชระคุปต์[1*] กาณฑ์ เกิดชื่น[1] ยุทธณา คงจีน[1] รุ่งเพชร ก่องนอก[1] และ นพณัฐ จิตกรียาน[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
E-mail: somsak.wa@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงเกี่ยวกับการสร้างชุดวัดพลังงานเครื่องปรับอากาศผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์มาใช้ในการติดตามและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งการรับรู้ปริมาณดังกล่าวสามารถนำไปสู่การวิเคราะห์ถึงการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศได้ โดยชุดวัดพลังงานเครื่องปรับอากาศนี้จะเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32 และโมดูลรับส่ง ข้อมูลไร้สาย ส่งข้อมูลไร้สายผ่านคลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz เพื่อรับส่งข้อมูล โดยใช้รับข้อมูลในจุดที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต และใช้เซ็นเซอร์วัดพลังงานแบบดิจิทัลผ่านโมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่ยูโน่ โดยใช้เป็นแบบเซ็นเซอร์โหนดวัดค่า จากการทดสอบชุดวัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศสามารถวัดค่าพารามิเตอร์และแสดงผลผ่านเครือข่ายไร้สายได้โดยเป็นไปตามวัตถุประสงค์

คำสำคัญ: การวัดพลังงาน, เครื่องปรับอากาศ, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper discusses the development of an energy measurement system for air conditioners via a wireless network by utilizing a microcontroller board for the monitoring and tracking of electrical parameters. The data obtained can facilitate an analysis of energy usage and the efficiency of the air conditioners. The energy measurement system employs an ESP32 microcontroller board and a wireless transmission module that communicates data over a 2.4 GHz radio frequency, enabling data transmission in areas without internet connectivity. A digital power measurement sensor is used in conjunction with an Arduino Uno microcontroller, configured as sensor nodes. Testing of the energy measurement system demonstrated its capability to accurately measure parameters and display results wirelessly, fulfilling the established objectives.

Keywords: energy measurement, air conditioning, microcontroller

1. บทนำ

เนื่องจากระบบปรับอากาศ เป็นส่วนที่ใช้พลังงานมากที่สุดในธุรกิจ ซึ่งในสภาพอากาศร้อนชื้น แบบประเทศไทย ระบบปรับอากาศมีสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าถึงประมาณ 60% ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของอาคาร ในระบบปรับอากาศ จะใช้สารทำความเย็นช่วยในการดูดความร้อนจากภายในห้องไปทิ้งที่ ภายนอกห้อง โดยใช้คอมเพรสเซอร์ในการขับเคลื่อนสารทำความเย็น ซึ่งจะทำให้ห้องมีอุณหภูมิเย็นกว่าภายนอกห้อง และทำให้ผู้อยู่อาศัยในอาคารรู้สึกสบาย แต่ในบรรยากาศภายนอกมีสภาวะ แปรเปลี่ยนตลอดเวลา จึงจำเป็นต้องอยู่ในห้องที่สามารถปรับสภาวะอากาศได้ ซึ่งหาก เครื่องปรับอากาศถูกใช้งานเป็นระยะเวลายาวนานก็จะเกิดการเสื่อมสภาพในอุปกรณ์ของ เครื่องปรับอากาศ ประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องปรับอากาศก็จะลดลงด้วยลดลง วิธีที่จะช่วย ประหยัดพลังงานได้คือการวางแผนอนุรักษ์พลังงาน แต่เครื่องปรับอากาศในท้องตลาดปัจจุบันไม่ สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและเก็บข้อมูลได้ จึงทำให้ไม่สามารถวางแผนการประหยัดพลังงานได้ ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองและไม่สามารถควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสม

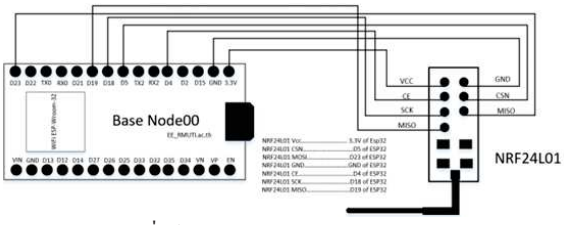
จากปัญหาดังกล่าว จึงมีแนวทางการแก้ไขปัญหาในการวัดและเก็บค่าพารามิเตอร์เพื่อ วางแผนอนุรักษ์พลังงานเครื่องปรับอากาศ เนื่องจากเครื่องมือวัดพื้นฐานทางไฟฟ้าไม่สามารถจัดเก็บ ข้อมูลได้ และเครื่องมือที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้ที่มีตามท้องตลาดจะมีราคาที่ค่อนข้างสูง ไม่คุ้มค่ากับการนำมาใช้งาน จึงนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามามีบทบาทในการเก็บข้อมูลและอ่าน ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปรับอากาศและส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต

2. การออกแบบระบบชุดวัดพลังงาน

การออกแบบระบบชุดวัดพลังงานเครื่องปรับอากาศผ่านเครือข่ายไร้สายนั้น จะใช้โหนดเอ็มซียูในการควบคุมระบบเซ็นเซอร์ ในระบบโหนดจะประกอบไปด้วย สถานีฐาน (Base Station) และเซ็นเซอร์โหนด โดยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

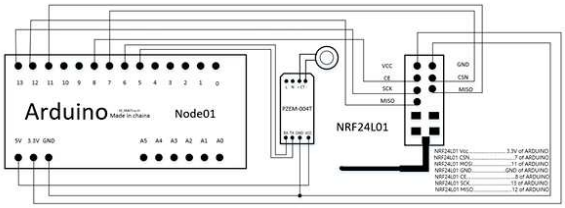
2.1 ระบบสถานีฐานและเซ็นเซอร์โหนด

ในระบบสถานีฐานนี้จะประกอบไปด้วย บอร์ดอีเอสพี 32 (ESP32) และโมดูลสื่อสารไร้สายเอ็นอาร์เอฟ24แอล01 (NRF24L01) โดยระบบสถานีฐานนี้จะทำหน้าที่รับข้อมูลด้วยคลื่นความถี่ 2.4 GHz ที่ส่งมาจากเซ็นเซอร์โหนด และจะทำการส่งข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ขึ้นไปยังระบบคลาวด์คอมพิวติง เพื่อทำการแสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ในการต่อไดอะแกรมวงจรของระบบสถานีฐาน จะต้องทำการเชื่อมต่อบอร์ดอีเอสพี 32 กับโมดูลสื่อสารไร้สายเอ็นอาร์เอฟ24แอล01 โดยจะเชื่อมต่อระหว่างขาที่ D23 – MISO, D19 – MISO, D18 – SCK, D5 – CSN, D4 – CE, GND – GND, 3.3V – VCC ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการต่อวงจรสถานีฐาน

เซ็นเซอร์โหนดนี้จะประกอบไปด้วย บอร์ดอาร์ดูโน เซ็นเซอร์ PZEM-004T และโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 ระบบเซ็นเซอร์โหนดที่จะทำหน้าที่อ่านค่าพารามิเตอร์ และส่งข้อมูลไปยังสถานีฐานด้วยความถี่ 2.4 GHz ในการต่อไดอะแกรมวงจรของระบบเซ็นเซอร์โหนดจะต้องทำการเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดอีเอสพี32 กับเซ็นเซอร์ PZEM-004T โดยจะเชื่อมต่อระหว่างขาที่ 6 – Rx, 5 – Tx, GND – GND, 5V – VCC และทำการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์ PZEM-004T กับโมดูลสื่อสารไร้สาย NRF24L01 โดยจะเชื่อมต่อระหว่างขาที่ 13 – SCK, 12 – MISO, 11 – MISO, 8 – CE, 7 – CSN, 3.3V – VCC, GND – GND ดังแสดงในรูปที่ 2

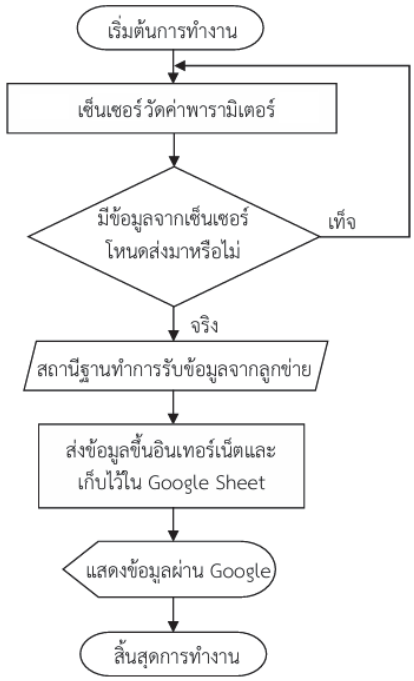


รูปที่ 2 ไดอะแกรมการต่อระบบเซ็นเซอร์โหนด

2.2. เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของโหนดเอ็มซียู

การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของโหนดเอ็มซียูสำหรับชุดวัดพลังงานเครื่องปรับอากาศจะใช้บอร์ดอีเอสพี 32 และบอร์ดอาร์ดูโนในการเชื่อมต่อเซ็นเซอร์เครือข่ายไร้สาย ซึ่งการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมบอร์ดทั้งสองบอร์ดนี้จะใช้ภาษาซีพลัสพลัส (C++) ในการเขียนโปรแกรม

วิธีการทำงานของโปรแกรมควบคุมการทำงานของโหนดเอ็มซียูจะเริ่มต้นจากการที่เซ็นเซอร์โหนดของแต่ละโหนดทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปรับอากาศ และทำการตรวจสอบว่ามีค่าพารามิเตอร์ส่งมาหรือไม่ผ่านเครือข่ายไร้สาย หากไม่มีข้อมูลส่งเข้ามาจะต้องทำการวัดค่าใหม่อีกครั้งวนลูปไปเรื่อยๆ แต่หากมีข้อมูลส่งเข้ามาโหนดเซ็นเซอร์ทั้งสองโหนดจะส่งข้อมูลมาที่สถานีฐาน สถานีฐานจะทำการรับข้อมูลจากลูกข่ายและส่งข้อมูลขึ้นไปบนฐานข้อมูลอินเทอร์เน็ตและเก็บข้อมูลไว้ในกูเกิลชีท (Google Sheet) จากนั้นจะแสดงผลข้อมูลผ่านเว็บไซต์ดิงค์สปีด แล้วสิ้นสุดการทำงานดังแสดงในภาพที่ 3

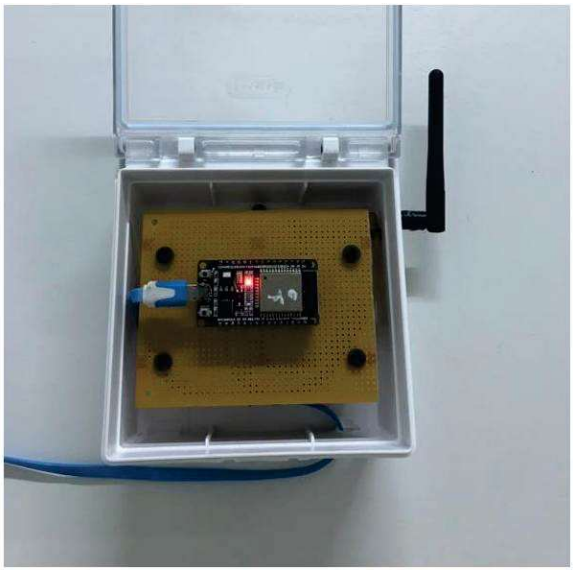


รูปที่ 3 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมโหนดเอ็มซียู

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบระบบของชุดวัดพลังงานเครื่องปรับอากาศขนาด 12,000 BTU จะใช้อุปกรณ์ทดสอบที่จัดทำขึ้นมาและเครื่องมือวัดทางไฟฟ้ามาทำการทดสอบ โดยอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ทดสอบ คือ

อุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนด และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โวลต์มิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ และเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงการทดลอง อุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนดที่นำใช้ทดสอบแสดงภาพสถานีฐานได้ดังภาพที่ 4 และอุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนดได้ดังภาพที่ 5



รูปที่ 4 สถานีฐาน



รูปที่ 5 อุปกรณ์เซ็นเซอร์โหนด

โดยก่อนจะทำการทดสอบจะต้องทำการตรวจวัดสารทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องปรับอากาศมีสารทำความเย็นในระดับที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการทำความเย็นในการทดสอบ อุปกรณ์ที่ใช้คือเกจวัดความดันสารทำความเย็นแสดงดังภาพที่ 6



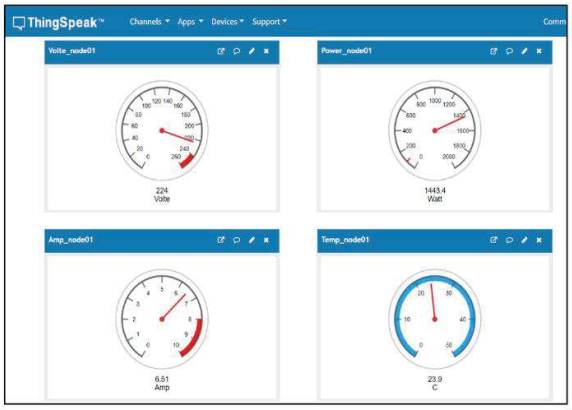
รูปที่ 6 เกจวัดความดันสารทำความเย็น

4. ผลการทดสอบ

ในการตรวจวัดสารทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ โดยใช้เกจวัดความดันสารทำความเย็นโดยเครื่องปรับอากาศ และเป็นเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ใช้น้ำยาทำความเย็นแบบ R22 ได้ค่าความดันสารทำความเย็นความดันสูงเป็น 245 psi และความดันต่ำเป็น 60 psi ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดสำหรับการทำงานของเครื่องปรับอากาศ สะท้อนให้เห็นว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การแสดงค่าพารามิเตอร์บนเว็บไซต์ติงค์สปีคในการสร้างชุดวัดพลังงานนี้สามารถดูค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปรับอากาศแบบเรียลไทม์ได้ผ่านเว็ปไซต์ https://ThingSpeak.mathworks.com/ โดยจะสามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิ ค่า EER และค่า COP ทั้งยังสามารถแสดงกราฟค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดแบบเรียลไทม์ได้อีกด้วย ค่าพารามิเตอร์บนเว็บไซต์ติงค์สปีคแสดงดังภาพที่ 7 โดยจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิ

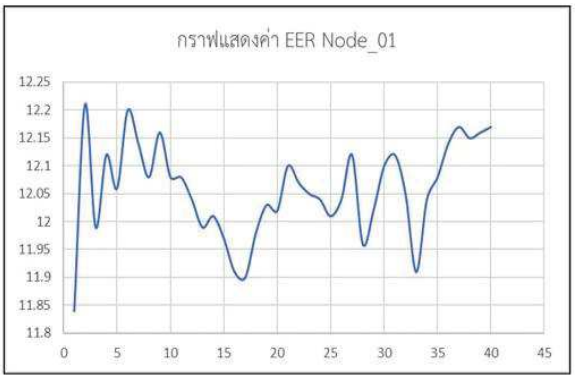
การแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะและการทำงานของเครื่องปรับอากาศได้ทันที ซึ่งสามารถช่วยในการตรวจจับปัญหาที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วบนเว็บไซต์ติงค์สปีคสามารถดูกราฟแบบเรียลไทม์ของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้ โดยในชุดวัดพลังงานนี้ จะแสดงกราฟค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิกราฟค่าพารามิเตอร์โหนดที่ 1 บนเว็บไซต์ติงค์สปีคแสดงดังภาพที่ 8



รูปที่ 7 ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิ แสดงผ่านเว็บไซต์ติงค์สปีค



รูปที่ 8 กราฟค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิ แสดงผ่านเว็บไซต์ติงค์สปีค



รูปที่ 9 กราฟค่า EER แสดงผ่านเว็บไซต์ติงค์สปีค

ประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศ EER (Energy Efficiency Ratio) คือ สัดส่วนของความเย็นที่ผลิตได้ต่อชั่วโมงและต่อพลังงานที่ใช้ (BTU/hr)/W ในการทำงานของเครื่องปรับอากาศหรือระบบทำความเย็น ค่า EER เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องปรับอากาศ โดยยิ่งค่า EER สูง ยิ่งหมายถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีกว่า กราฟค่า EER ที่อุณหภูมิ 25 องศาแสดงดังภาพที่ 9

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการออกแบบสร้างชุดวัดพลังงานแล้วนำไปติดตั้งเพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปรับอากาศ โดยผลการทดสอบการทำงานของชุดวัดพลังงานสามารถอ่านค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิและความชื้นของเครื่องปรับอากาศและค่อนข้างที่จะมีความแม่นยำตรงตามเครื่องมือวัดมาตรฐาน ทั้งยังสามารถดูประสิทธิภาพของ เครื่องปรับอากาศแต่ละเครื่องได้อย่างเรียลไทม์บนเว็ปไซต์ติงค์สปีคและดูเกิลชีทได้อีกด้วย โดยผลการทดสอบพบว่าเครื่องปรับอากาศมีค่า EER เฉลี่ยอยู่ที่ 12.15 และมีค่า COP เฉลี่ยอยู่ที่ 3.56 ซึ่ง COP = Qc / W โดย Qc คือความเย็นที่ได้ (kW) และ W คือกำลังไฟฟ้า (kW) จึงได้ข้อสรุปว่า เครื่องปรับอากาศนั้น มีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

เอกสารอ้างอิง

[1] โครงสร้างของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน สืบค้นจาก http://energyauditorthai.com/wp-content/uploads/2017/01/06.

[2] แพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สืบค้นเมื่อจาก https://btfp.nbtc.go.th/getattachment/portfolio/2558/1185/.pdf.aspx.

[3] องค์ประกอบระบบไอโอที สืบค้นเมื่อ กรกฎาคม 6, 2567, จาก https://www.datal.com.ar/ iot/.

[4] ระบบคลาวด์คอมพิวติง สืบค้นเมื่อ กรกฎาคม 8, 2567, จาก https://sc2.kku.ac.th/office/sciit/index.php/29-cloud-computing.html

[5] เว็ปไซต์ติงค์สปีค สืบค้นจากhttps://automation360blog. wordpress.com/ 2017/11/25/what-is-ThingSpeak/

[6] หน้าเว็บ ThingSpeak.com สืบค้นจาก https://automation360blog.wordpress.com/2017/11/25/what-is-ThingSpeak/

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาผลกระทบทางเทคนิคด้วยวิธีควบคุมโหลดโดยตรง เพื่อศึกษาการตอบสนองของโหลดมอเตอร์ของจักรยานไฟฟ้า

A Study of the Technical Impacts of Direct Load Control on the Load Response of Electric Bicycle Motors

วัฒนา มาคำ[1] เกษม ตรีภาค[1] ตระการ ยอดดำเนิน[2] กฤษดา ทัศกานิเวศน์[2] ชุติพร นิลแนม[2] กวีวัฒน์ ทัติวงศ์[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีล้านนา ลำปาง
200 หมู่ที่ 17 ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 5200 โทรศัพท์ 054 342 5478[1]
โทรศัพท์ 065 751 3991[1] E-mail : arm_q@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการตอบสนองของโหลดมอเตอร์สำหรับจักรยานไฟฟ้าโดยใช้ความต้านทานในการทดลอง ระบบทดลองใช้ระบบการจัดการแบตเตอรี่ (BMS) แบบ 16-cell, 60A, 48V ที่เชื่อมต่ออนุกรมกับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) ขนาด 50Ah, 3.2V จำนวน 16-cell และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับระบบ BMS 8-cell, 30A, 24V ซึ่งประกอบด้วยสองชุดของ BMS 8-cell, 30A, 24V ที่เชื่อมต่อกันเป็นอนุกรม การทดลองอิงตามหลักการของวงจรไฟฟ้าและใช้โหลดความต้านทานในการทดสอบ ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (A) ถูกบันทึกผ่านแอปพลิเคชัน SMART BMS ผลการทดลองระบุว่า ระบบ BMS 16-cell, 60A, 48V มีประสิทธิภาพเหนือกว่าระบบ BMS 8-cell, 30A, 24V เนื่องจากระบบหลังสามารถชาร์จได้เพียง 55.9V และไม่ถึงความจุเต็ม 100% ที่ 57.6V เนื่องจากเซลล์ในลูปที่ 1 ถึงค่าเต็ม 3.6V ก่อน ทำให้ระบบ BMS ตัดการทำงานก่อนชาร์จเต็ม

คำสำคัญ: ระบบการจัดการแบตเตอรี่, การตอบสนองของโหลด, แบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต (LiFePO4)

Abstract

This project aims to study the motor load response for electric bicycles using a resistive load in the experiment. The test system utilizes a Battery Management System (BMS) rated at 16-cell, 60A, 48V, which is connected in series with 16 lithium iron phosphate (LiFePO4) batteries, each with a capacity of 50Ah and 3.2V. The performance is compared against a BMS 8-cell, 30A, 24V system, which consists of two BMS 8-cell, 30A, 24V units connected in series.The experiment follows fundamental electrical circuit principles and employs a resistive load for testing. Voltage (V) and current (A) data were recorded through the SMART BMS application. The results indicate that the BMS 16-cell, 60A, 48V system outperforms the BMS 8-cell, 30A, 24V system. The latter was only able to charge up to 55.9V and failed to reach full capacity at 57.6V, as the cells in the first loop reached 3.6V earlier, triggering the BMS cutoff before full charging was achieved.

Keywords: BMS, Demand response, Lithium iron phosphate battery

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะด้านการขนส่ง รถจักรยานไฟฟ้าแบบสองล้อเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากช่วยลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม จากแนวโน้มการเติบโตของจักรยานไฟฟ้า ผู้จัดทำจึงศึกษาการตอบสนองของ โหลดมอเตอร์ ผ่าน เทคนิคการควบคุมโหลดโดยตรง โดยทำการทดลองเกี่ยวกับ การชาร์จ (Charge) และการคายประจุ (Discharge) โดยใช้ BMS 16S 60A 12-72Vร่วมกับแบตเตอรี่ LiFePO4 ขนาด 50Ah 3.2V เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับระดับสถานะประจุ (SOC), ระดับการคายประจุ (DOD), ความเร็วสูงสุด และระยะทางสูงสุด ผลการศึกษาจะช่วยให้สามารถพัฒนา จักรยานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพและใช้งานได้จริง พร้อมปรับปรุงเทคโนโลยีให้เหมาะสมยิ่งขึ้นในอนาคต ซึ่งจักรยานไฟฟ้าจะเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการเดินทางในเมือง ช่วยลดโลกร้อน ลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มความสะดวกสบายในชีวิตประจำวัน

2. คำแนะนำการเขียนและพิมพ์

2.1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากประกอบไปด้วยข้อดีมากมาย ดังนี้ มีความแข็งแรง มีความเสถียรและมีความปลอดภัยสูงกว่าแบตเตอรี่ลิเธียมชนิดอื่นๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อม สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิสูงถึง 65 องศาเซลเซียส และทนความเย็นได้มากถึง -20 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพในการเก็บและเปลี่ยนแปลงพลังงานได้ดี นอกจากนี้ยังมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำ ความเสถียรสูงและอายุการใช้งานที่ยาวนานและมีความยืดหยุ่นที่ทำให้เหมาะสมกับความหลากหลายในการใช้งาน

2.2 อัตราการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ (C-Rate)

ระดับสถานะประจุ และคายประจุ ของแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับค่าความจุของแบตเตอรี่ ซึ่งค่าในการอัดประจุของแบตเตอรี่ที่มีขนาด 1 ซีเรท มีหมายความว่า แบตเตอรี่ที่อัดประจุเต็ม 100% ยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ที่มีขนาด 25 แอมป์/ชั่วโมง ควรให้มีการอัดประจุของแบตเตอรี่ที่มีกระแส 25 แอมป์/ชั่วโมง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [2]

2.3 ระดับสถานะประจุ

สถานะของการคายประจุ เป็นค่าที่บอกความจุของแบตเตอรี่ในแต่เวลาที่ใช้งาน มีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความจุของแบตเตอรี่ในขณะนั้นต่อความจุของแบตเตอรี่เมื่อประจุเต็มยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่มีระดับสถานะประจุ 100% หมายความว่าแบตเตอรี่อยู่ในสถานะประจุเต็ม 100 % และแบตเตอรี่มีระดับสถานะประจุ 50% หมายความว่าแบตเตอรี่มีความจุเหลืออยู่ 50% [1]

2.4 ระดับการคายประจุ

การคายประจุที่มีการบอกเปอร์เซ็นต์ของความจุแบตเตอรี่ที่ถูกใช้งานออกไป หรือคายประจุออกไป เปรียบเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ [1]

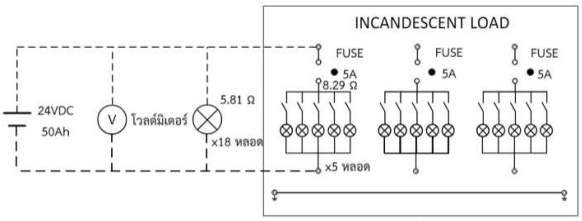
3. วิธีการดำเนินการ

3.1 หาค่าการอัดประจุ และคายประจุ (Discharge,DOD) โดยใช้กฎของโอห์ม (Ohm's Law)

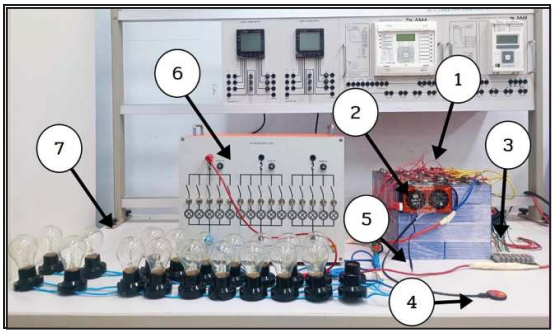
จากการหาแรงดันแบตเตอรี่เฉลี่ยหาจากการนำค่าแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต ในสภาวะของสถานะประจุแบตเตอรี่เธียมไอออนฟอสเฟต เท่ากับ 28.8 โวลต์และสถานะประจุของแบตเตอรี่หมดคือ 22.4 โวลต์ในการทดลองมีการหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ 25.6 โวลต์เพื่อทำการออกแบบในการคายประจุของแบตเตอรี่ที่ 0.3 ซีเรท เป็นค่าของกระแสของแบตเตอรี่ที่มีระดับสถานะประจุ ให้กับแบตเตอรี่โดยจะได้กระแสของการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่ที่ 7.5 แอมป์ซึ่งจะได้เป็นค่าของระดับสถานะประจุ ให้กับแบตเตอรี่ เมื่อได้ค่ากระแสของแบตเตอรี่และแรงดันของแบตเตอรี่จะนำมาหาค่าความต้านทานของวงจรภายในของแบตเตอรี่โดยใช้ทฤษฎีของวงจรทางไฟฟ้าเพื่อหาค่ากระแสด้วยแรงดัน

3.2 ออกแบบชุดวงจรการคายประจุ

วิธีการออกแบบวงจรการคายประจุ จะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน เช่น การปรับค่าความต้านทาน ความปลอดภัย ความสะดวกในการนำไปใช้งาน เป็นต้น โดยจะเริ่มต้นจากการออกแบบวงจรในรูปที่ 1 มีการใช้หลอดไฟฟ้าแบบเผาไส้เพื่อสร้างเป็นความต้านทานขนาด 5.81 โอห์ม และได้ค่าความต้านทานหลอดจากชุดทดลองในห้องทดลองเพื่อสร้างความต้านทานเพิ่มเป็น 8.29 โอห์ม จากนั้นจึงคำนวณตามทฤษฎีทางไฟฟ้าจึงได้ค่าความต้านทานเป็น 3.41 โอห์ม ซึ่งจะตรงตามทฤษฎีและสร้างวงจรจริงจากการออกแบบในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การออกแบบวงจรคายประจุ



รูปที่ 2 วงจรการคายประจุ มีค่า 3.41 โอห์ม

1. แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต 24 โวลต์ 25 แอมป์/ชั่วโมง 3.2 โวลต์ จำนวน 8 เซลล์

2. BMS (Battery Management System) 8 เซลล์ 24 โวลต์ 30 แอมป์ สำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePo4) 3.2 โวลต์ เพื่อตรวจสอบแรงดันต่อเซลล์ที่ 2.8 – 3.6 โวลต์

3. Active Balance 24 โวลต์ 8 เซลล์ ไว้สำหรับเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าแต่ละเซลล์ให้ใกล้เคียงกันโดยแต่ละเซลล์ไม่ต่างกันเกินที่ 0.1 โวลต์

4. โมดูลบลูทูธ (Module Bluetooth) สำหรับเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชั่น (Application) SMART BMS

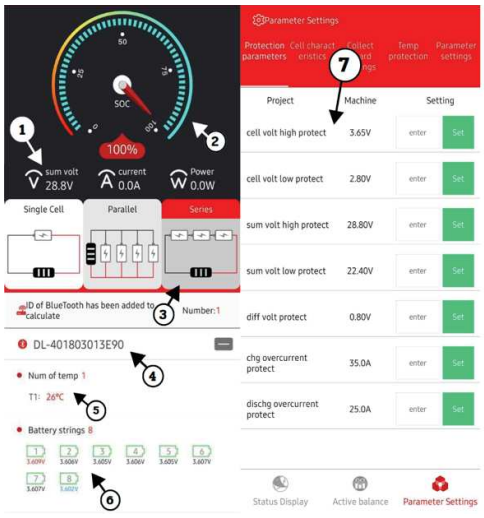
5. สายวัดอุณหภูมิ (NTC) สำหรับวัดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ในขณะทำงาน

6. ตู้ INCANDESCENT LOAD 100 W ใช้งานจริงจำนวน 5 หลอด สำหรับเป็นโหลดในการคายประจุ ต่อกันแบบขนานค่าความต้านทานที่ได้คือ 8.29 โอห์ม (Ohm)

7. โหลดหลอดไฟ 40 W จำนวน 18 หลอด สำหรับเป็นโหลดในการคายประจุ ต่อกันแบบขนานค่าความต้านทานที่ได้คือ 5.81 โอห์ม (Ohm)

3.3 การเลือกแอปพลิเคชั่น (Application) สำหรับเชื่อมต่อบลูทูธในการใช้งาน

การเลือกแอปพลิเคชั่น (Application) สำหรับเชื่อมต่อบลูทูธจะต้องคำนึงถึงการใช้งาน เช่น ความแม่นยำของค่าที่ได้ ความเสถียร ความสะดวกในการนำไปใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 3 หน้าต่างแอปพลิเคชั่น SMART BMS

1. หน้าต่างบอกค่าแรงดันไฟฟ้า (Volt) กระแสไฟฟ้า (Amp) และกำลังไฟฟ้า (Watt) เพื่อเก็บค่าในการทดลอง

2. หน้าต่างระดับสถานะประจุ สำหรับบอกอัตราสถานะประจุของแบตเตอรี่

3. โหมดการทำงานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต สามารถเลือกโหมดการทำงาน(Single Cell, Parallel, Series) ได้ตามการต่อของวงจรที่ทดลอง

4. หมายเลขประจำของบลูทูธ (ID)

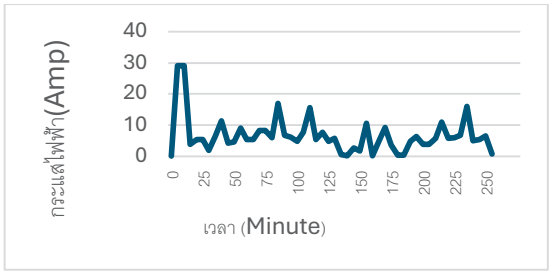
5. อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่

6. แรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ (Voltage) สำหรับตรวจว่าแต่ละเซลล์มีการปรับค่าของแรงดัน (Balance) กันดีหรือไม่ ซึ่งตัวอักษรสีแดงจะบอกถึงเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้า (Volt) ของแบตเตอรี่สูงสุดและสีฟ้าจะบอกถึงเซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้า (Volt) ของแบตเตอรี่ต่ำที่สุด

7. หน้าต่างการปรับค่าการป้องกันของBMS ซึ่งจะมีการป้องกันต่างๆ เช่น การตั้งการป้องกันการอัดประจุ (State of Charge : SOC) การป้องกันการคายประจุ (Discharge,DOD) ตามการใช้งาน

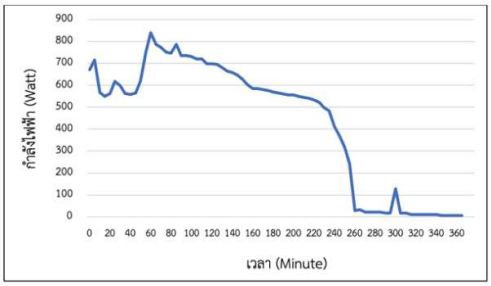
4. ผลการทดลอง

จากกราฟรูปที่ 4จะแสดงถึงอัตราระหว่างแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) สถานะประจุหมดและแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟต (LiFePO4) สถานะประจุเต็ม โดยเริ่มต้นจากอัตรา 0% คือ 22.4 โวลต์ ถึง 100% คือ 28.8 โวลต์



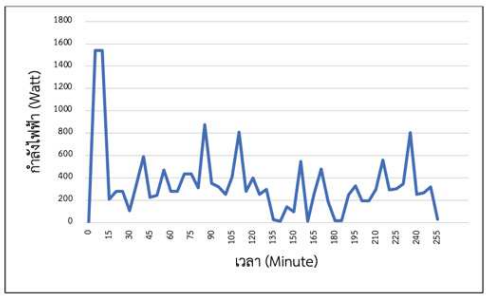
รูปที่ 4 กราฟผลการทดลองการดิสชาร์จ (Discharge) ในสภาวะใช้งานจริงหาความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสไฟฟ้าเทียบกับเวลาผ่านการใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System - BMS) ระบบ24V+24 V

จากรูปที่ 5กราฟจะแสดงถึงผลการทดลองการอัดประจุ (State of Charge : SOC หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับเวลา จากการทดลองพบว่าการทำการอัดประจุ (State of Charge : SOC) ตั้งแต่ 30% ถึง 100% ได้ผลทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที



รูปที่ 5 กราฟผลการทดลองการชาร์จ (Charge) ในสภาวะใช้งานจริงหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาผ่านการใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System - BMS) ระบบ 24V + 24V 0.3 C

จากกราฟรูปที่ 6 จะแสดงผลการทดลองการคายประจุ (Discharge,DOD) หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสเทียบกับเวลา จากการทดลองพบว่า วงจรซึ่งคำนวณได้ 0.3 ซีเรท หรือ 7.5 แอมป์ แต่การทดลองจริงจะมีค่า 1.9 แอมป์



รูปที่ 6 กราฟผลการทดลองการดิสชาร์จ (Discharge) ในสภาวะใช้งานจริงหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบกับเวลาผ่านการใช้ระบบจัดการแบตเตอรี่(Battery Management System - BMS) ระบบ 24V+24 V

ทำให้ทราบว่าการทดลองไม่เป็นไปตามทฤษฎี ซึ่งทำการคายประจุ (Discharge,DOD) ตั้งแต่ 100% ถึง 50% ได้ผลการทดลองเป็นเวลา 21 ชั่วโมง 40 นาที

5. สรุป

การศึกษานี้มุ่งเน้น การตอบสนองของโหลดมอเตอร์จักรยานไฟฟ้าโดยใช้เทคนิคการควบคุมโหลดโดยตรง แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน โดยเปรียบเทียบ ระบบจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ภายใต้เงื่อนไขที่เหมือนกันทั้งใน สภาพแวดล้อมควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมปกติ ทดลอง BMS 24V วงจรที่ 1 กับ BMS 24V วงจรที่ 2 พบว่าทั้งสองวงจรมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยใช้เวลาชาร์จประมาณ 7 ชั่วโมง 20-30 นาที และใช้เวลาดิสชาร์จ 14-15 ชั่วโมง การทดลอง BMS 48V กับ BMS 24V + 24V (ต่ออนุกรม) ในห้องปฏิบัติการ พบว่า BMS 48V มีประสิทธิภาพสูงกว่า โดยใช้เวลาชาร์จ 4 ชั่วโมง 5 นาที และดิสชาร์จ 17 ชั่วโมง 50 นาที ขณะที่ BMS 24V + 24V ใช้เวลาชาร์จ 7 ชั่วโมง 5 นาที (ได้เพียง 86.72%) และดิสชาร์จ 12 ชั่วโมง 35 นาที ทั้งนี้การทดลองในสภาพแวดล้อมที่ไม่ควบคุมอุณหภูมิ BMS 48V ใช้เวลาชาร์จ 4 ชั่วโมง 50 นาที และดิสชาร์จ 5 ชั่วโมง 10 นาที ขณะที่ BMS 24V + 24V ใช้เวลาชาร์จ 6 ชั่วโมง 5 นาที (ได้เพียง 85.16%) และดิสชาร์จ 4 ชั่วโมง 15 นาที และในส่วนของทดลองขับขี่จริง โดยใช้ โหลดมอเตอร์ 1000W และน้ำหนักรวม 160 กิโลกรัม พบว่า BMS 48V วิ่งได้ 137.38 กิโลเมตรใน 5 ชั่วโมง 11 นาที ส่วน BMS 24V + 24V วิ่งได้เพียง 124.8 กิโลเมตรใน 4 ชั่วโมง 14 นาที ทั้งสองระบบมี ความเร็วสูงสุด 42 กม./ชม.

เอกสารอ้างอิง

[1] นายคณิน ทวีศุภพงษ์ , นายณพัส จิตสัมพันธเวช, นายณภัทรภณ พิลา (2558) การจัดการระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ เข้าถึงได้จาก https://opacimages.lib.kmitl.ac.th/medias/pdf/09016626.pdf

[2] บุญเลิศ สื่อเฉย สมศักดิ์, สิริโปราณานนท์ และ ปิยวัฒน์ บุญประเสริฐ (2564) การวิเคราะห์ช่วงเวลาคายประจุของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่เพื่อลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุด เข้าถึงได้จากhttps://ph01.tci-thaijo. org/index.php/kbej/article/view/243211



วัฒนา มาคำ จบการศึกษระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วศ.ม.วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่



เกษม ตรีภาค จบการศึกษระดับปริญญาตรี วศ.บ.วิศกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วศ.ม.วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่



ตระการ ยอดดำเนิน จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มหาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินและเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to EENET2025

วัฒนา มาคำ[1] เกษม ตรีภาค[1] กฤษดา ทัศกานิเวสน์[1] คงศักดิ์ ตุ้ยสืบ[2] ต่อศักดิ์ โกษาวัง [2]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง

200 หมู่ที่ 17 ตำบลพิชัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52000 E-mail: arm_q@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของ การลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ในการวิเคราะห์กระบวนการติดตั้งระบบ ได้แบ่งการออกแบบออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ ระบบในสภาวะไฟฟ้าปกติและ ระบบในสภาวะไฟฟ้าดับ โดยระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์, แบตเตอรี่ และอินเวอร์เตอร์ การจำลองแบบดำเนินการโดยใช้ โปรแกรม PVsyst เพื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุน คำนวณระยะเวลาคืนทุน และประเมินผลตอบแทนจากการลงทุน โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินความคุ้มค่าทางการเงิน ของ การลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง โดยมีเป้าหมายติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง มีความคุ้มค่าทางการเงิน โดยสามารถช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้ในระยะยาว อย่างไรก็ตาม ควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ค่าบำรุงรักษา และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ เพื่อให้ได้ผลตอบแทนสูงสุด นอกจากนี้ ภาครัฐและภาคเอกชนควรเพื่อหาทางความร่วมมือในการ ส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด ผ่านมาตรการสนับสนุน เช่น สิทธิประโยชน์ทางภาษี หรือเงินอุดหนุนด้านพลังงานหมุนเวียน เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานที่ยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, ความคุ้มค่าการเงิน, ระยะเวลาคืนทุน

Abstract

This project aims to assess the financial feasibility of investing in the installation of a solar power generation systemin Mae Tha District, Lampang Province, with the primary objective of reducing energy costs. The system installation process was analyzed by designing two scenarios ,Normal electricity supply conditions , Power outage conditions The designed solar power system consi Angsana New # 14 batteries, and an inverter. A simulation was conducted using the PVsyst software to analyze installation costs, calculate the payback period, and evaluate the return on investment.The results indicate that installing a solar power system in Mae Tha District, Lampang Province, is financially viable, as it can effectively reduce electricity costs in the long run. However, additional factors such as maintenance costs and equipment lifespan should be considered to maximize returns.Furthermore, government and private sector collaboration should be encouraged to promote clean energy usagethrough support measures such as tax incentives or subsidies for renewable energy to ensure sustainable energy consumption in the future.

Keywords: photovoltaic (PV) system,Financial feasibility, Payback period

1. บทนำ

โรงงานมีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 900,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูงถึง 4 ล้านบาทต่อปี โดยรับไฟฟ้าผ่าน หม้อแปลงขนาด 1,250 kVA ผู้บริหารโรงงานเห็นว่าต้นทุนด้านพลังงานค่อนข้างสูง และตามข้อกำหนดของ คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน โรงงานต้องมีมาตรการลดการใช้พลังงานเป็นประจำทุกปี เพื่อแก้ปัญหานี้ โรงงานจึงมีแนวคิด ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบ Off-Grid Hybrid เพื่อลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค วัตถุประสงค์ของบทความนี้ คือการ วิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ให้มีประสิทธิภาพและความคุ้มทุนสูงสุด พร้อมข้อมูลประกอบการตัดสินใจตามงบประมาณที่กำหนด หลังการติดตั้ง ทีมวิจัยจะ เก็บข้อมูลการใช้พลังงานก่อนและหลังการติดตั้ง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบ และใช้

เป็นแนวทางในการ พัฒนาและปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

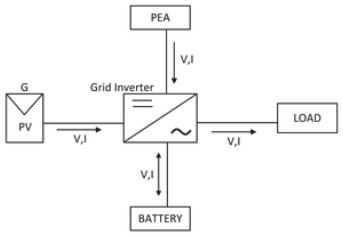
2.1 ระบบกักเก็บพลังงาน

แบตเตอรี่มีบทบาทสำคัญในระบบโซล่าเซลล์ ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงโซล่าเซลล์ไว้ใช้ในเวลาที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบแบตเตอรี่ลิเธียมกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นๆ แบตเตอรี่ ลิเธียมเหมาะสำหรับการใช้งานในการติดตั้งมากกว่า เนื่องจากมีคุณสมบัติในการชาร์จและจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูง อายุการใช้งานที่นานกว่าและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานหรือระบบไฮบริด (Hybrid System)

ระบบ Off-Grid Hybrid เป็นการรวม ระบบออนกริด (On-Grid) และออฟกริด (Off-Grid) เข้าด้วยกัน โดยใช้ แบตเตอรี่สำรองพลังงาน สำหรับช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ในช่วงกลางวัน พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า และหากผลิตได้มากกว่าที่ใช้งาน พลังงานส่วนเกินจะถูกชาร์จเข้าแบตเตอรี่ (State of Charge) ในช่วงกลางคืนที่ไม่มีแสงอาทิตย์ ระบบจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ก่อน หากไม่เพียงพอ ระบบจะสลับไปใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายโดยอัตโนมัติ

ระบบนี้ช่วยให้สามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย



รูปที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบไฮบริด

ดังรูปที่1 ในสภาวะสมบูรณ์แบบ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโซลาร์เซลล์ (Solar Cell)เป็นไฟฟ้ากระแสตรงส่งไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ แล้วนำพลังงานไปกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่และส่งไปให้กับโหลดเครื่องใช้ไฟฟ้า โดยที่แบตเตอรี่สามารถส่งกระแสไฟฟ้าไปยังโหลดได้เช่นกัน แต่ในขณะที่โซล่าเซลล์ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าให้โหลดใช้ได้ ก็จะดึงไฟฟ้าที่กักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาใช้ หากพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไม่พอใช้จึงจะดึงพลังงานจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลำปางมาใช้ร่วมกัน

$$\text{Solar} + \text{PEA} + \text{Batt} = \text{Load} \quad (1)$$

$$\text{Solar} + \text{Batt} = \text{Load} \quad (2)$$

$$\text{Batt} = \text{Load} \quad (3)$$

โดยที่ Solar คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
PEA คือ ไฟฟ้าที่ได้รับจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจังหวัดลำปาง
Batt คือ พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่
Load คือ การใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า

หลักการในการวิเคราะห์ สมการที่1 ในช่วงเวลากลางวัน ขณะที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลำปางจ่ายไฟตามปกติ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้มาจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลำปาง โดยส่งไฟฟ้าไปยังโหลดและพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกนำไปชาร์จที่แบตเตอรี่ สมการที่2 ช่วงเวลากลางวัน ขณะไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคลำปาง จ่ายไฟไม่ได้ตามปกติหรือไฟดับ โหลดจะดึงไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่วนหนึ่งนำไปชาร์จไว้ที่แบตเตอรี่ สมการที่3 ช่วงเวลากลางคืน ขณะที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาไม่ปกติหรือไฟดับ การใช้ไฟมาจากแบตเตอรี่ได้ทางเดียว เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ในกรณีนี้จะใช้ได้เฉพาะโหลดฉุกเฉินเท่านั้น

2.3 โปรแกรมจำลองและออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

โปรแกรม PVsyst เป็นโปรแกรมที่ใช้จำลองและออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถเลือกจำลองระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้ 3 รูปแบบ คือ ระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (Grid connected) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบแยกอิสระ (Standalone) และระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับเครื่องปั๊มน้ำ (Pumping) โดยสามารถระบุขนาดพิกัดของกำลังผลิต ที่ตั้งในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ[5] ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพขั้นตอนการจำลองแบบโปรแกรม PVsyst

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เริ่มจากการประชุมเพื่อวางแผนในการเก็บข้อมูลและแนวทางในการวิเคราะห์ ซึ่งได้ข้อสรุปการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีต้นทุนไม่เกิน หนึ่งล้านบาท และมีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่า 7 ปี เพื่อความเหมาะสมกับสถานประกอบการขนาดกลาง โดยจะต้องใช้โหลดสำรองที่ประกอบด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ประมวลผลและระบบอินเตอร์เน็ตและอื่นๆ ในห้องออฟฟิศขายเมื่อเกิดไฟฟ้าดับ ซึ่งจากการวัดโหลดไฟฟ้าที่ใช้งานพบว่า อาคารสำนักงานในโรงโม่หินฯ มีโหลดทั้งสิ้น 20 kW/day และมีโหลดฉุกเฉินที่ต้องใช้งานเมื่อไฟฟ้าดับเท่ากับ 6 kW

พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองระบบในโปรแกรม PV system

จากการทดลองออกแบบระบบด้วยโปรแกรม PVsyst ได้ทำการออกแบบระบบโซล่าเซลล์ที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับอาคารขายและอาคารสำนักงาน ในสภาวะที่มีไฟฟ้าปกติ โดยระบบที่ออกแบบมีขนาด 15 กิโลวัตต์ (kW) เลือกใช้แผงยี่ห้อ Longi เป็นแผงชนิด Mono Half – Cell ขนาด 550 Wp จำนวน 14 แผง 2 สตริง ส่วนอินเวอร์เตอร์เลือกใช้งานแบบ Hybrid ยี่ห้อ huawei รุ่น 15 kW จำนวน 1 เครื่อง และสามารถประมาณการค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ ซึ่งมีรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ป้อนในโปรแกรมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst	
ละติจูดและลองจิจูด	18.168389, 99.611583
มุมเอียงของหลังคา	18°
ทันเหทิศทาง	0°
แผงโซล่าเซลล์ที่เลือกใช้	LR5-72 HPH 550 M
อินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้	SUN2000-20KTL-M

ผลที่ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตได้ใน 1 ปี จะประมาณการได้โดยใช้โปรแกรม PVsyst ซึ่งสามารถนำมาคูณกับค่าไฟฟ้าต่อหน่วยซึ่งจากการคำนวณค่าเฉลี่ยของราคาหน่วยการใช้ไฟฟ้าจากรายงานพลังงานที่ส่งให้กระทรวงพลังงานย้อนหลัง 5 ปีที่ผ่านมาพบว่าค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 4.78 บาท จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี 37.92 MWh-yearและค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี 181,257.6 บาท/ปี ระยะเวลาการคืนทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบมีต้นทุนการติดตั้งดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ราคาประมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ราคาประมาณการติดตั้งระบบระบบโซล่าเซลล์แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก		
ขนาดระบบ(kWp)		15
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Longi รุ่น(LR5-72HPH-550M G2)	จำนวน(แผง)	28
	ราคารวม(บาท)	**124,600**
อินเวอร์เตอร์ ชนิด Hybrid-Offgrid	ยี่ห้อ	Huawei Technologies
	รุ่น	SUN2000-15KTL-M5
	ขนาด(kWp)	15
	จำนวน(เครื่อง)	1
	ราคารวม(บาท)	**79,218**
แบตเตอรี่	ยี่ห้อ	LPBF
	รุ่น	Lifepo4
	ขนาด(kWp)	48V/200Ah
	จำนวน(เครื่อง)	4
	สำรองไฟ(hr)	9 hour
	ราคารวม(บาท)	**327,200**
ตู้ Combiner DC/AC + wiring	**ราคารวม(บาท)**	**212,407.2**
ค่าแรง + ค่าดำเนินการ	**ราคารวม(บาท)**	**84,962.88**
รวมทั้งสิ้น(บาท)		828,388.08

จากต้นทุนในการติดตั้งเมื่อนำมารวมกับค่าการบำรุงรักษาระบบต่อปี และการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำรองที่ต้องเปลี่ยนทุกๆ 5 ปี ซึ่งจากข้อมูลทั้งหมดที่เป็นต้นทุน เมื่อนำมาคิดระยะเวลาคืนทุนแล้ว พบว่าระบบนี้มีระยะเวลาคืนทุนที่ 6 ปี 4 เดือน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะเวลาคืนทุนของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ชื่อ	ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
ระยะเวลาคืนทุน (PB)	8 ปี 4 เดือน
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	364,335.26 บาท
อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR)	9.96 %



รูปที่ 3 กราฟระยะเวลาคืนทุนของโครงการ

4. สรุปผลการดำเนินงาน

โครงการนี้ออกแบบและติดตั้ง ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ณ ละติจูด 18.168389°N และลองจิจูด 99.611583°E โดยหันแผงเซลล์ไปทางทิศใต้ ด้วยมุมลาดชัน 18 องศา ระบบประกอบด้วย 20 แผง ขนาด 550 Wp ต่อแผง แบ่งเป็น 4 สตริง (5 แผงต่อสตริง) ให้กำลังผลิตรวม 11 kWp ใช้พื้นที่ติดตั้ง ประมาณ 70 ตารางเมตร ผลการจำลองระบบ พบว่าสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 15,481.8 kWh ต่อปี โดยมีประสิทธิภาพระบบ 83.21% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับมาตรฐานทั่วไป อย่างไรก็ตาม พบความสูญเสียหลักจาก การสูญเสียที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Loss) ประมาณ 13.36% การสูญเสียที่อินเวอร์เตอร์ ประมาณ 3.10% ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้มีกำลังการผลิต 11 kWp ประกอบด้วย แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 550 Wp จำนวน 20 แผง ใช้อินเวอร์เตอร์ ไฮบริดขนาด 5 kWp จำนวน 2 เครื่อง และ แบตเตอรี่ขนาด 48V/200Ah จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งสามารถสำรองพลังงานได้ 6 ชั่วโมง 23 นาที รวมต้นทุนการติดตั้ง 490,464 บาท ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า ระยะเวลาคืนทุน (PB) อยู่ที่ 6 ปี 11 เดือน ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการลงทุนในพลังงานหมุนเวียน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 354,920.92 บาท แสดงถึงผลตอบแทนที่เป็นบวกในระยะยาว อัตราผลตอบแทนการลงทุน (IRR) อยู่ที่ 12.86% ซึ่งสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยและเงินเฟ้อในปัจจุบัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานวิจัยเรื่องการประเมินความคุ้มค่าทางการเงินในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงโม่หินชัยประภารุ่งเรือง อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง สำเร็จลุล่วงไปได้ดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวคิดและกำลังใจในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าของสถานประกอบการโรงโม่หินชัยประภารุ่งเรือง จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาลำปาง ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] วรวุฒิ เทพเสน. (2562). การออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบออนกริดณโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โซลาร์โกทรเพชร.เข้าถึงได้จากhttps://e-research.siam.edu/kb/on-grid-solar-power-systems/?fbclid=IwAR2_I_jqy22f1lz01gvLTQMOPfFoQVYE209C0GXbZpvVQkhtOzxXUR2Q2IA

[2] มัณฑนา รังสิโยภาส, เบนยามิน อุปถัมภ์, พงศ์พิพัฒน์ ดวงสว่าง,ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์ (2562) การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้โซลาร์เซลล์ระบบออฟกริดในที่พักอาศัย. เข้าถึงได้จาก https://www.tsme.org/me-nett/me-nett2019/fullpaper/ETM/ETM019.pdf?fbclid=IwAR2_I_jqy22f1lz01gvLTQMOPfFoQVYE209C0GXbZpvVQkhtOzxXUR2Q2IA

[3] ราชัน ชูชาติ (2562). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีศึกษาโรงผลิตยางไม้พาราแปรรูปในจังหวัดตรัง. เข้าถึงได้จาก. https://wjst.wu.ac.th/index.php/wuresearch/article view/6616

[4] สิรินาถ ยิ้มย่อง. (2562). การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนติดตั้งโซล่าเซลล์ กรณีศึกษาบริษัทแห่งหนึ่งในเขตบางแคจังหวัดกรุงเทพฯ.เข้าถึงได้จากhttps://grad.dpu.ac.th/upload/content/files/year11-1/11-24.pdf.

[5] กวินชัย ต้องตรงทรัพย์. (2564). การใช้โปรแกรมPVsyst เบื้องต้น. เข้าถึงได้จาก. http://eit.bsru.ac.th/wp-cont ent/uploads/2021/09/%E0%B8%AD.pdf

[6] พิชยดา จิรวรรยวงศ์. (2556). การศึกษาต้นทุนการใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในบ้านที่อยู่อาศัย. เข้าถึงได้จาก https://libdoc.dpu.ac.th/thesis/147901.pdf



กฤษดา ทัศกานิเวศน์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วศ.บ. วิศกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงราย จบการศึกษาปริญญาโท วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา เชียงใหม่

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินคุณภาพไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 1,200 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

Trending Power Quality Assessment a 1,200 kW Solar Power Generation Project Princess of Naradhiwas University

พลากร พรหมเมศร์[1*] สุพิพัฒน์ พานิชธนาคม[1]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

E-mail: palakorn.ep@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ การประเมินคุณภาพไฟฟ้าสำหรับโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 1,200 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าก่อนทำการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 ในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง 33 กิโลโวลต์ ณ จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling : PCC) ของมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ได้จากเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า โดยพิจารณาองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการประเมิน ตามมาตรฐาน EN 50160 ทั้งสิ้น 7 องค์ประกอบ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าความถี่ไฟฟ้า ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน แรงดันไม่สมดุล ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ ค่าแรงดันกระเพื่อม และค่าตัวประกอบกำลัง จากผลการประเมินคุณภาพไฟฟ้าก่อนทำการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่า องค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการประเมินทั้ง 7 องค์ประกอบ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแรงดันปานกลาง ณ จุดต่อร่วม

คำสำคัญ: จุดต่อร่วม, ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน, ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก, แรงดันกระเพื่อม

Abstract

This paper presents trending power quality assessment a 1,200 kW solar power generation project Princess of Naradhiwas University. The objective is to analyze the power quality before connecting the generator to the electricity network of the Provincial Electricity Authority (PEA), in accordance with the Power Network System Interconnection Code (2016), in medium voltage distribution system 33 KV at Point of Common Coupling (PCC) Princess of Naradhiwas University, obtained from power quality meters. By considering the electrical components that are evaluated according to the EN 50160 standard, there are a total of 7 components: Voltage, Frequency, Total Harmonics Distortion of Voltage (%), Unbalance Voltage, Harmonic Current, Voltage Fluctuations and Power Factor. From the results of power quality assessment before connecting the generator, it was found that all 6 electrical components, evaluated were within the standard criteria. It is defined while the solar power generation system, is connected to the grid in a medium voltage distribution system at the common connection point.

Keywords: Point of Common Coupling, Total Harmonics Distortion, Harmonic Current, Voltage Fluctuations

1. บทนำ

มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ระหว่างปีงบประมาณ 2561 ถึง 2562 โดยมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบวางพื้น (Solar Farm) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบวางบนหลังคา (Solar Rooftop) โดยในพื้นที่ศูนย์ราชการใหม่ ส่วนราชการ (เขตโคกเขือ) มีหน่วยงานและอาคารภายในพื้นที่ที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะเกษตรศาสตร์ เป็นต้น โดยมีกำลังการผลิตติดตั้งอินเวอร์เตอร์ 1,200 กิโลวัตต์ กำลังการผลิตติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ 1,159.2 กิโลวัตต์ สามารถลดการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยของหน่วยงานในกำกับของมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ จำนวน 2,006,314 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ปี คิดเป็นมูลค่า 8,326,202 บาท/ปี [1]

จากระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2559 กล่าวถึง หลักเกณฑ์ด้านเทคนิคการออกแบบ รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์ และมาตรฐานการ

ติดตั้ง สำหรับผู้ขอใช้บริการที่มีความประสงค์ที่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [2] ในกรณีที่มีผู้ขอใช้บริการมีการดำเนินการติดตั้งใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดคอนเวอร์เตอร์ขนาดกำลังผลิตรวมกันเกินกว่า 250 กิโลวัตต์ หรือในกรณีขนาดกำลังการผลิตรวมกันเกินกว่า 1 เมกกะวัตต์ จำเป็นต้องดำเนินการตามระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในการควบคุมคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) โดยทำการติดตั้งและวัดคุณภาพไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อของผู้ขอใช้บริการ โดยพิจารณาองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการประเมิน ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าความถี่ไฟฟ้า ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน แรงดันไม่สมดุล ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ ค่าแรงดันกระเพื่อม และค่าตัวประกอบกำลัง เป็นต้น

จากผลการประเมินคุณภาพไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง ณ จุดต่อร่วมของมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ได้จากเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ตามมาตรฐาน EN 50160 (Standard EN 50160 Voltage Characteristic of Public Distribution Systems) ทั้ง 2 ช่วงเวลา ระหว่างวันที่ 1-7 สิงหาคม 2566 สำหรับ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบวางพื้น ที่ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 500 กิโลวัตต์ และ ระหว่างวันที่ 21-27 กุมภาพันธ์ 2567 สำหรับ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบวางบนหลังคา (เพิ่มเติม) ที่ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 700 กิโลวัตต์ พบว่า เมื่อทำการประเมินจากกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุดในแต่ละเฟส (A, B และ C) ซึ่งพิจารณาจากขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 2 ถึง 19 โดยที่อันดับฮาร์มอนิกคี่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.28 แอมแปร์ และอันดับฮาร์มอนิกคู่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.01 แอมแปร์ เมื่อพิจารณาค่าตามเกณฑ์ยังอยู่ในมาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในทุกองค์ประกอบ

2. คุณภาพไฟฟ้า (Power Quality)

คุณภาพไฟฟ้า คือ สภาวะความปกติ และสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นกับรูปแบบกระแส แรงดัน รวมถึงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานที่ผิดพลาด อายุการใช้งานสั้นลง หรือเกิดความเสียหาย สาเหตุหลักที่ทำให้คุณภาพไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำ ได้แก่ ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้า การทำงานของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น หรือการต่อลงดินในระบบไม่ถูกต้อง [3] อย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อปัญหาคุณภาพไฟฟ้า มักต้องพิจารณาเงื่อนไขทางเทคนิคอื่นร่วมด้วยที่ทำให้ผลกระทบ มีระดับความรุนแรงที่แตกต่างกัน [4] มาตรฐาน IEEE 1159-2009 จำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1159-2009

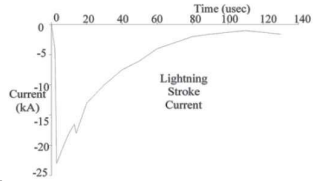
Categories	Typical Spectral Content	Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
1.0 Transient			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns Rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 µs Rise	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms Rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low Frequency	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu[a]
1.2.2 Medium Frequency	5 - 500 kHz	20 µs	0 - 8 pu
1.2.3 High Frequency	0.5 - 5 MHz	5 µs	0 - 4 pu
2.0 Short-duration RMS Variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 Cycles	0.1 - 0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 - 30 Cycles	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 Cycles - 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 Cycles - 3 s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 Swell		30 Cycles - 3 s	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		> 3 s - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		> 3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 Swell		> 3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Long-duration RMS Variations			
3.1 Interruption, Sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.4 Current Overload		> 1 min	
4.0 Imbalance			
4.1 Voltage		Steady State	0.5 - 2%
4.2 Current		Steady State	1.0 - 30%
5.0 Waveform Distortion			
5.1 DC Offset		Steady State	0 - 0.1%
5.2 Harmonics	0 - 9 kHz	Steady State	0 - 20%
5.3 Interharmonics	0 - 9 kHz	Steady State	0 - 2%
5.4 Notching		Steady State	
5.5 Noise	Broadband	Steady State	0 - 1%
6.0 Voltage Fluctuations	< 25 Hz	Intermittent	0.1 - 7%
			0.2 - 2 P_{st}[b]
7.0 Power Frequency Variations		< 10 s	±0.10 Hz

3. มาตรฐาน IEEE 1159-2009 (IEEE 1159-2009 Standard)

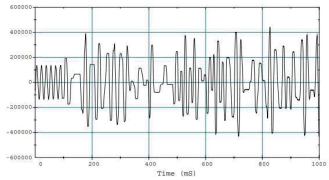
มาตรฐาน IEEE 1159-2009 เป็นแนวปฏิบัติเกี่ยวกับการตรวจสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ทั้งในระบบไฟฟ้าเฟสเดียวและหลายเฟส รวมถึงอธิบายปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงวิธีการตรวจวัด เก็บข้อมูล การตีความหมาย และวิเคราะห์ผลการตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้า [5] โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ภาวะชั่วครู (Transient)

ภาวะชั่วครู่ เป็นสภาวะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอย่างทันทีทันใด โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive) และออสซิลเลเตอร์ (Oscillator) ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



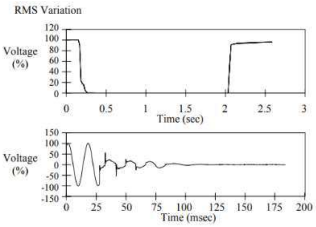
รูปที่ 1 กระแสที่อิมพัลส์ชั่วครู่จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้า



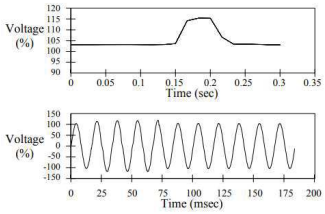
รูปที่ 2 แรงดันออสซิลเลทความถี่ต่ำชั่วครู่จากภาวะเฟอโรเรโซแนนซ์ขณะหม้อแปลงไม่มีโหลด

3.2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วขณะ (Short-duration RMS Variations)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วขณะ เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากความผิดพร่องทางไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) แรงดันเกินชั่วขณะ (Voltage Swell) และไฟดับชั่วขณะ (Interruptions) ดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ภาวะไฟดับชั่วขณะจากการทำงานของรีโคลสเซอร์จากความผิดพร่องทางไฟฟ้า



รูปที่ 4 ภาวะแรงดันเกินชั่วขณะจากความผิดพร่องทางไฟฟ้าลงดิน

3.3 การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว (Long-duration RMS Variations)

การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะยาว เป็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS) ที่มีการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงค่าเกิน 1 นาที มีสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของภาระทางไฟฟ้าขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงดันตก (Under Voltage) แรงดันเกิน (Over Voltage) และไฟดับ (Sustained) เป็นต้น

การเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนนี้ เป็นความท้าทายต่อระบบไฟฟ้าทั้งทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ [6-7] สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ การรักษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม [8] ดังนั้น ในการประเมินและวิเคราะห์คุณภาพกำลังไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการประเมินคุณภาพไฟฟ้าแบบต่อเนื่องสำหรับโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 1,200 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า Dranetz-BMI HDPQ รุ่น Xplorer ที่ยึดตามมาตรฐาน EN 50160, IEC 61000-4-30 Class A, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15 รวมไปถึงมาตรฐาน IEEE 1159-2009 เป็นต้น โดยมีระยะเวลาในการตรวจวัดไม่น้อยกว่า 1 สัปดาห์ ทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วม ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง 33 กิโลโวลต์ ของมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ทั้งสิ้น 7 องค์ประกอบ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดตามมาตรฐาน EN 50160

ที่	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	ช่วงเวลาที่ใช้วัดและค่าเฉลี่ยในแต่ละครั้ง	ระยะเวลาอย่างต่ำที่ใช้ในการเก็บข้อมูล
1.	ค่าแรงดันไฟฟ้า (Supply Voltage Variation)	10 นาที	1 สัปดาห์
2.	ค่าความถี่ไฟฟ้า (Frequency)	10 นาที	1 สัปดาห์
3.	ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (Total Harmonics Distortion; %THDv)	10 นาที	1 สัปดาห์
4.	แรงดันไม่สมดุล (Unbalanced Voltage)	10 นาที	1 สัปดาห์
5.	กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current) ลำดับที่ 2-19	10 นาที	1 สัปดาห์
6.	แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuations; Pst/Plt)	Pst; 10 นาที Plt; 2 ชั่วโมง	1 สัปดาห์
7.	ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)	10 นาที	1 สัปดาห์

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการประเมินกระแสฮาร์มอนิกส์ขณะเชื่อมต่อกับระบบของ กฟภ. ช่วงเวลา 21 -27 กุมภาพันธ์ 2567

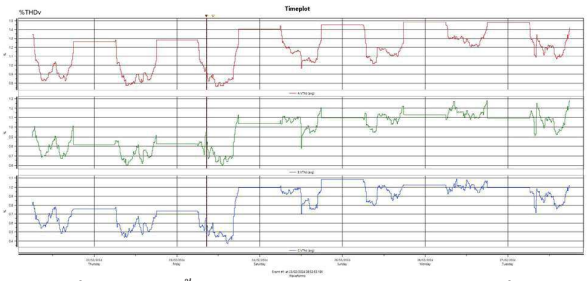
การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ ณ จุดต่อร่วม (PCC) **ขณะเชื่อมต่อกับระบบของ กฟภ.**									
ลำดับที่	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ข้อกำหนด 33 kV	11	7	5	9	4	6	3	2	2
ผลการตรวจวัด 33 kV	0.066	0.346	0.016	0.585	0.018	0.865	0.012	0.161	0.010
ลำดับที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ข้อกำหนด 33 kV	6	2	5	2	1	1	2	1	1
ผลการตรวจวัด 33 kV	0.258	0.010	0.275	0.010	0.063	0.011	0.114	0.013	0.062
ผลการประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการประเมินกระแสฮาร์มอนิกส์ขณะปลดระบบผลิตไฟฟ้าออกจากการเชื่อมต่อกับ กฟภ. ช่วงเวลา 21 -27 กุมภาพันธ์ 2567

การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ ณ จุดต่อร่วม (PCC) **ขณะปลดระบบผลิตไฟฟ้ากับ กฟภ.**									
ลำดับที่	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ข้อกำหนด 33 kV	11	7	5	9	4	6	3	2	2
ผลการตรวจวัด 33 kV	0.074	0.389	0.039	0.605	0.051	0.853	0.021	0.157	0.017
ลำดับที่	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ข้อกำหนด 33 kV	6	2	5	2	1	1	2	1	1
ผลการตรวจวัด 33 kV	0.278	0.017	0.247	0.016	0.056	0.016	0.121	0.019	0.052
ผลการประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

ตารางที่ 5 สรุปการประเมินคุณภาพไฟฟ้าในระบบ 33 kV แบบต่อเนื่อง ณ จุดต่อร่วม ช่วงเวลา 21 -27 กุมภาพันธ์ 2567

ที่	พารามิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า	เกณฑ์มาตรฐาน		ค่า CP95	ผลการประเมิน/หมายเหตุ
		Min.	Max.		
1.	ค่าแรงดันไฟฟ้า (Supply Voltage Variation; V)				
	- เฟส A (Vab)	31,350 V	34,650 V	33,626 V	ผ่าน
	- เฟส B (Vbc)			33,424 V	ผ่าน
	- เฟส C (Vca)			33,861 V	ผ่าน
2.	ค่าความถี่ไฟฟ้า (Frequency; Hz)	49.50 Hz	50.50 Hz	50.03 Hz	ผ่าน
3.	ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (Total Harmonics Distortion; %THDv)				
	- เฟส A	-	3 %	1.43 %	ผ่าน
	- เฟส B			1.28 %	ผ่าน
	- เฟส C			1.07 %	ผ่าน
4.	แรงดันไม่สมดุล (Unbalanced Voltage)	-	2 %	0.67 %	ผ่าน
5.	กระแสฮาร์มอนิก (Harmonics Current) ลำดับที่ 2-19	ดังตารางที่ 3 และ 4			ผ่าน
6.	แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuations; Pst/Plt)				
	Pst เฟส A	-	1	0.18	ผ่าน
	เฟส B			0.22	ผ่าน
	เฟส C			0.16	ผ่าน
	Plt เฟส A	-	0.80	0.46	ผ่าน
	เฟส B			0.44	ผ่าน
	เฟส C			0.55	ผ่าน
7.	ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)	0.90 lag	0.90 lead	0.99 lag	ผ่าน



รูปที่ 5 ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันแบบต่อเนื่อง

จากตารางที่ 3 และ 4 เป็นตัวอย่างการประเมินกระแสฮาร์มอนิกส์ขณะเชื่อมต่อและปลดระบบผลิตไฟฟ้าออกจากการเชื่อมต่อกับ กฟภ. ช่วงเวลา 21 -27 กุมภาพันธ์ 2567 กระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 2 ถึง 19 โดยที่กระแสฮาร์มอนิกลำดับคี่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.28 แอมแปร์ และกระแสฮาร์มอนิกลำดับคู่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.01 แอมแปร์ จากตารางที่ 5 สรุปการประเมินคุณภาพไฟฟ้าในระบบ 33 kV แบบต่อเนื่อง ณ จุดต่อร่วม ในช่วงเวลาเดียวกัน โดยข้อมูลที่ได้พิจารณาบนพื้นฐานค่าความน่าจะเป็นคุ้มรวม (Coverage Probability; CP) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99.50 เปอร์เซ็นต์ (ความถี่ไฟฟ้าใช้ค่า CP; 99.50 เปอร์เซ็นต์) จะเห็นได้ว่า แม้มีการเพิ่มจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดคอนเวอร์เตอร์ตามกำลังการผลิตที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตามเกณฑ์มาตรฐาน ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในทุกองค์ประกอบ จากรูปที่ 5 แผนภาพความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันแบบต่อเนื่อง ในช่วงเวลาเดียวกัน ยังอยู่ในระดับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่กำหนดไว้เช่นกัน

5. สรุป

การประเมินคุณภาพไฟฟ้าสำหรับโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 1,200 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ก่อนทำการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ณ จุดต่อร่วม พิจารณาองค์ประกอบทางไฟฟ้าที่ทำการประเมิน ทั้งสิ้น 7 องค์ประกอบ จากผลการตรวจวัดและประเมินคุณภาพไฟฟ้า พบว่า เมื่อทำการประเมินกระแสฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงสุดในแต่ละเฟส (A, B และ C) พิจารณาจากขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ ลำดับที่ 2 ถึง 19 โดยที่อันดับฮาร์มอนิกคี่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.28 แอมแปร์ และอันดับฮาร์มอนิกคู่มีการเปลี่ยนแปลงทุกอันดับ เฉลี่ยคิดเป็น 0.01 แอมแปร์ เนื่องจาก มีการเพิ่มจำนวนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดคอนเวอร์เตอร์ ในอนาคตมีความจำเป็นต้องมีการตรวจวัดเป็นระยะ เนื่องจาก การเพิ่มขึ้นของภาระทางไฟฟ้า และแหล่งกำเนิดพลังงานแบบกระจาย ในระบบฯ

เอกสารอ้างอิง

[1] บริษัท โซล่าตรอน จำกัด (มหาชน). (2562). สรุปผลโครงการฯ. มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์.

[2] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2559). ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ว่าด้วยข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2559. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

[3] ชาญณรงค์ หนูอินทร์. (2555). การจำแนกปัญหาคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้การแปลงเวฟเล็ตและโครงข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[4] เอกวัฒน์ ทองเปลว และนัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ. (2559). การประเมินคุณภาพไฟฟ้าในระบบจำหน่ายที่จ่ายไฟให้พื้นที่นิคมอุตสาหกรรม. วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. ปีที่ 10 ฉบับที่ 1, 127-140.

[5] IEEE Standard Association, 1159 – IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 2019

[6] M. Batkiewicz-Pantua, “Comparative Analysis of Production Costs of Electricity Generated from Various Renewable Energy Sources,” Prz. Elektrotechniczny, vol. 1, no. 2, pp. 73–76, Feb. 2019.

[7] M. Ghiasi, S. Esmaeilnamazi, R. Ghiasi, and M. Fathi, “Role of Renewable Energy Sources in Evaluating Technical and Economic Efficiency of Power Quality,” Technol. Econ. Smart Grids Sustain. Energy, vol. 5, no. 1, p. 1, Dec. 2020.

[8] A. Vinogradov et al., “A System for Monitoring the Number and Duration of Power Outages and Power Quality in 0.38 kV Electrical Networks BT - Intelligent Computing & Optimization,” 2019, pp. 1–10.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิในระบบไฟฟ้าและการสูญเสียพลังงานในอาคารเรียน: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย

The Impact of Temperature Fluctuations on Electrical Systems and Energy Loss in Educational Buildings: A Case Study of the Faculty of Industrial Technology and Management, RMUTSV

สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*]
[1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: santi.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิต่อระบบไฟฟ้าและการสูญเสียพลังงานในอาคารเรียน มทร.ศรีวิชัย โดยใช้การตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และ IoT (ธ.ค. 2567 - ม.ค. 2568) พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อความต้านทานของสายเมนไฟฟ้าและการสูญเสียพลังงาน โดยเฟส B มีอุณหภูมิสูงสุดอย่างต่อเนื่อง (24.96°C - 30.82°C) และเกิดการสูญเสียพลังงานผิดปกติ (สูงสุด 0.004851W) ในช่วง 1-10 ม.ค. 2568 ควรเร่งตรวจสอบเฟส B โดยเฉพาะช่วง 1-10 และ 21-31 ม.ค. 2568 งานวิจัยนี้เสนอแนวทางลดการสูญเสียพลังงาน เช่น ปรับสมดุลโหลดและส่งเสริมการประหยัดพลังงาน

คำสำคัญ: ความผันผวนของอุณหภูมิ, การตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์, ความต้านทานของสายไฟ, กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย

Abstract

This research investigates the impact of temperature fluctuations on the electrical system and energy loss in the academic building at RMUTSV using real-time energy monitoring and IoT technology (Dec 2024 - Jan 2025). The findings indicate that temperature affects the main electrical cable resistance and energy loss. Phase B consistently recorded the highest temperature (24.96°C - 30.82°C) and experienced abnormal energy loss (up to 0.004851 W) during Jan 1-10, 2025. An urgent inspection of Phase B is recommended, particularly during Jan 1-10 and 21-31, 2025. This study proposes measures to reduce energy loss, such as load balancing and promoting energy-saving awareness.

Keywords: Temperature fluctuations, Real-time energy monitoring, Wire resistance, Power loss

1. บทนำ

การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารเรียนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าและต้นทุนด้านพลังงาน หนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระบบไฟฟ้าโดยตรงคือความผันผวนของอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายตัวนำ เช่น ความต้านทานไฟฟ้า และนำไปสู่การสูญเสียพลังงานที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจทำให้สายไฟร้อนขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น และนำไปสู่การสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน ซึ่งอาจลดประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าและเพิ่มภาระโหลดให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า

จากการศึกษาก่อนหน้า พบว่าค่าความผันผวนของอุณหภูมิสามารถส่งผลต่อความไม่เสถียรของแรงดันไฟฟ้าและการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร โดยเฉพาะอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และมีโหลดไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งอาจทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากกว่าปกติ ดังนั้น การวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิต่อระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนามาตรการลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

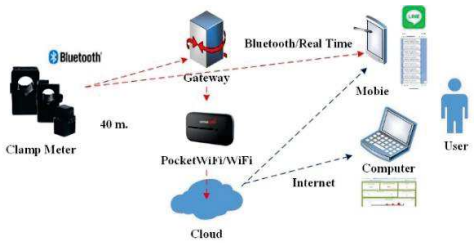
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิต่อระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม [1] โดยใช้ระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ร่วมกับเทคโนโลยี IoT [2] เพื่อบันทึกและวิเคราะห์แนวโน้มของอุณหภูมิ ความต้านทานของสายไฟ และค่าพลังงานที่สูญเสียจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาจะช่วยในการวางแผนการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ เช่น การกระจายโหลดไฟฟ้า การเลือกใช้สายตัวนำที่เหมาะสม และการใช้มาตรการปรับสมดุลพลังงานเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในระยะยาว [3-4]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

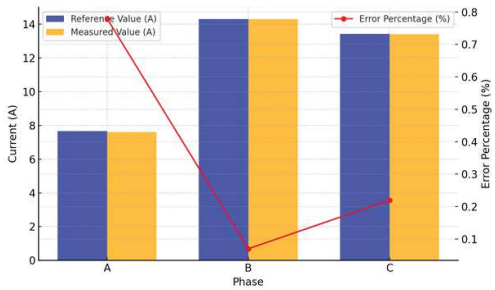
การศึกษานี้เริ่มต้นจากการติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ที่จุดจ่ายไฟหลัก (Main Line) ของอาคารเรียน มทร.ศรีวิชัย เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โดยใช้ Clamp คล้องสายเมนหลักและส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย IoT เป็นระยะเวลา 2 เดือน จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความต้านทานของสายไฟ และ Power Loss เพื่อประเมินผลกระทบต่อประสิทธิภาพพลังงาน ผลการวิเคราะห์นำไปสู่การปรับปรุงระบบ เช่น การจัดการโหลดให้สมดุลและการพัฒนาระบบจัดการพลังงาน สุดท้ายสรุปผลและเผยแพร่ข้อมูลผ่านรายงานวิจัยเพื่อยกระดับประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าและลดต้นทุนพลังงาน

2.1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงาน

การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติในการใช้พลังงานได้แบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเรียลไทม์



รูปที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error Percentage)

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่าเฟส A (7.6A) วัดได้ 7.66A (+0.78%) เฟส B (14.3A) วัดได้ 14.31A (+0.07%) และเฟส C (13.4A) วัดได้ 13.43A (+0.22%) ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07% - 0.78%

2.2 การวิเคราะห์ ผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิต่อระบบไฟฟ้า

ความผันผวนของอุณหภูมิ (Temperature Fluctuation) สามารถส่งผลต่อความต้านทานของสายไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (Power Loss) ในระบบไฟฟ้า สามารถวิเคราะห์จากการคำนวณดังนี้

1. ค่าความต้านทานของสายไฟ

$$R(T) = R_0 \left[1 + \alpha (T - T_0)\right] \quad (1)$$

โดย $R(T)$ = ความต้านทานที่อุณหภูมิ $T(^{\circ}C)$, R_0 = ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง $T_0 (20^{\circ}C)$, α = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวนำ (สำหรับทองแดง $\alpha \approx 0.00393 / {}^{\circ}C$) และ T = อุณหภูมิขณะพิจารณา เนื่องจากอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม ใช้สายเมน CV (XLPE) ขนาด 240 mm² ทองแดง ความยาว 300 เมตร นำมาใช้คำนวนค่าความต้านทานของสายไฟ (Resistance, R_0) ได้จาก

$$R_0 = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2)$$

โดย R_0 = ความต้านทาน (Ω), ρ = ความต้านทานจำเพาะของทองแดง ($1.724 \times 10^{-8}\ \Omega / m\ (20^{\circ}C)$, ℓ = ความยาวของสายไฟ (เมตร), A = พื้นที่หน้าตัดของสายไฟ (ตารางเมตร, m²)

2. กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป (Power Loss, P) ในสายไฟคำนวณได้จากสมการ

$$P_{loss} = I^2 R \quad (3)$$

โดย P_{loss} = กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในสายไฟ (Watt), I = กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสาย (Ampere), R = ความต้านทานของสายไฟ (Ohm)

3.ค่าความผันผวนของอุณหภูมิ (Fluctuation)

$$\text{Fluctuation} = \text{Temp Max} - \text{Temp Min} \quad (4)$$

โดย Temp Max = อุณหภูมิสูงสุด (1วัน), Temp Min = อุณหภูมิต่ำสุด (1วัน)

3. การวิเคราะห์

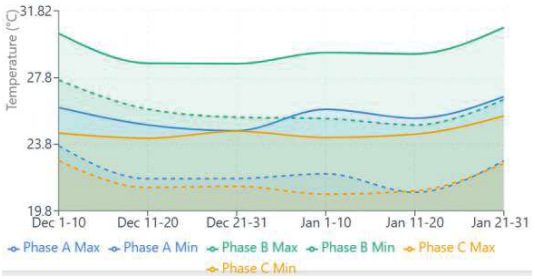
การศึกษานี้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ, ความต้านทานของสายไฟ และกำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (Power Loss) โดยใช้สมการ $R(T) = R_0 \left(1+\alpha(T-T_0)\right)$ และ $P_{loss} = I^2 R$ เพื่อตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อการสูญเสียพลังงาน วิเคราะห์พฤติกรรมโหลดไฟฟ้า เพื่อระบุช่วงอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ค่าความผันผวนของอุณหภูมิ

และกำลังสูญเสีย ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการพลังงานของอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม พร้อมเปรียบเทียบข้อมูลช่วงเวลาต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่ แนวทางลดการสูญเสียพลังงาน เช่น การเลือกใช้สายตัวนำที่เหมาะสม หรือปรับปรุงระบบจัดการโหลดไฟฟ้า โดยประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนพลังงาน

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละเฟส (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

Date	Avg. Temp Phase A Max (°C)	Avg. Temp Phase A Min (°C)	Avg. Temp Phase B Max (°C)	Avg. Temp Phase B Min (°C)	Avg. Temp Phase C Max (°C)	Avg. Temp Phase C Min (°C)
Dec 1-10	26.01	23.70	30.46	27.66	24.47	22.81
Dec 11-20	24.96	21.73	28.67	25.91	24.16	21.20
Dec 21-31	24.61	21.74	28.64	25.42	24.58	21.27
Jan 1-10	25.90	22.02	29.31	25.34	24.20	20.80
Jan 11-20	25.36	20.91	29.23	24.96	24.40	21.00
Jan 21-31	26.66	22.81	30.82	26.48	25.50	22.65

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของปริมาณอุณหภูมิช่วง ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568 ซึ่งได้จากการคำนวณและนำเฉลี่ยตามช่วงวันและเวลา โดยใช้ข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่ระบบตรวจวัดพลังงานได้จัดเก็บไว้ในแต่ละวันสำหรับทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด ระหว่างสองเดือน

จากกราฟรูปที่ 3 พบว่าเฟส B ช่วงอุณหภูมิกว้างสุด (24.96°C - 30.82°C) มีความผันผวนสูงสุด (3-4°C) และอุณหภูมิสูงสุด เฟส A ช่วงอุณหภูมิแคบ (20.91°C - 26.66°C) ค่อนข้างคงที่ เฟส C ช่วงอุณหภูมิแคบที่สุด (20.80°C - 25.50°C) มีความเสถียรสูงสุด ในช่วง 1-10, 21-31 ม.ค. 2568 อุณหภูมิสูงขึ้น ขณะช่วง 11-20 ม.ค. 2568 อุณหภูมิต่ำสุด ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดประมาณ 3-4°C ข้อสังเกต เฟส B มีความผันผวนสูงที่สุด ขณะที่เฟส C เสถียรมากที่สุด และอุณหภูมิในช่วงปลาย ม.ค. 2568 มีแนวโน้มสูงขึ้น

ตารางที่ 3 ค่า Average Fluctuation ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

Date	Average Fluctuation Phase A (°C)	Average Fluctuation Phase B (°C)	Average Fluctuation Phase C (°C)
Dec 1-10	2.44	4.60	2.18
Dec 11-20	3.23	2.76	2.96
Dec 21-31	2.90	3.20	3.35
Jan 1-10	3.88	3.97	3.40
Jan 11-20	4.45	4.27	3.40
Jan 21-31	3.92	4.37	2.86



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่า Average Fluctuation ระหว่างสองเดือน

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่าเฟส A การแกว่งตัวเริ่มต้นใน Dec 2024 ต่ำ (2-3) เพิ่มขึ้นชัดเจนใน ม.ค. 2568 โดยจุดสูงสุดที่ 5.14 ในช่วง 11-15 ม.ค. 2568 มีความผันผวนมาก เฟส B เริ่มจากจุดสูงสุดที่ 6.32 ในช่วงต้น Dec 2024 ลดลงในกลาง ธ.ค. 2567 และเพิ่มขึ้นอีกในมกราคม สูงสุดที่ 4.76 ในช่วง 21-25 Jan 2025 มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สม่ำเสมอ เฟส C ความคงที่สูงสุด ช่วงการแกว่งตัวอยู่ระหว่าง 1.28-3.80 สูงสุดที่ 3.80 ในช่วง 21-25 ธ.ค. 2567 และ 11-15 ม.ค. 2568 ข้อสังเกต ม.ค. 2568 มีการแกว่งตัวสูงกว่า ธ.ค. 2567 ทั้ง 3 เฟส และมีแนวโน้มการแกว่งตัวที่แตกต่างกัน ช่วง 6-15 ม.ค. 2568 เป็นช่วงที่มีการแกว่งตัวสูงสุดของทั้ง 3 เฟส

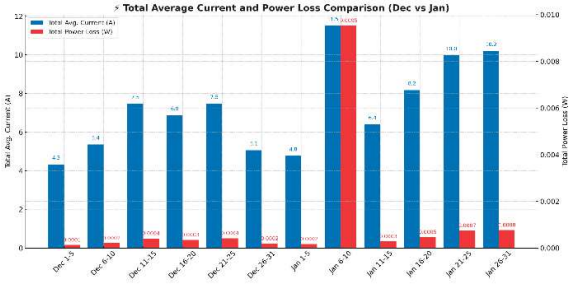
ตารางที่ 4 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป (Power Loss) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส ธ.ค. 2567

Date	Avg. Current (A)	Avg. Fluct. (°C)	Power Factor (PF)	Resistance (Ω/m)	Power loss (W)
Dec 1-5	4.33	4.90	0.56	0.00007345	0.000128
Dec 6-10	5.36	2.06	0.54	0.00007305	0.000210
Dec 11-15	7.46	2.60	0.51	0.00007369	0.000409
Dec 16-20	6.87	3.37	0.52	0.00007277	0.000348
Dec 21-25	7.47	3.30	0.66	0.00007431	0.000416
Dec 26-31	5.06	2.99	0.80	0.00007410	0.000193

ตารางที่ 5 ค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป (Power Loss) ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส (ม.ค. 2568)

Date	Avg. Current (A)	Avg. Fluct. (°C)	Power Factor (PF)	Resistance (Ω/m)	Power loss (W)
Jan 1-5	4.77	3.36	0.73	0.00007345	0.000171
Jan 6-10	11.51	4.14	0.44	0.00007305	0.009530
Jan 11-15	6.40	4.49	0.69	0.00007369	0.000279
Jan 16-20	8.17	3.59	0.51	0.00007277	0.000462
Jan 21-25	9.98	4.13	0.48	0.00007431	0.000745
Jan 26-31	10.20	4.13	0.47	0.00007410	0.000764

ตารางที่ 4 และ 5 ผลลัพธ์จากการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไป (Power Loss) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ค่าเฉลี่ยกระแส ค่าเฉลี่ยความผันผวนของอุณหภูมิและความต้านทาน ที่ระบบตรวจวัดพลังงานบันทึกไว้ในแต่ละวันสำหรับทั้ง 3 เฟส



รูปที่ 5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิและกำลังสูญเสียทั้ง 2 เดือน

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า เฟส B มีอุณหภูมิสูงสุด (27-30 °C) และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงที่สุด โดยในช่วงวันที่ 6-10 ม.ค. 2568 เฟส B มีค่า I = 11.51A ทำให้เกิด Power Loss 0.009530W ซึ่งสูงกว่าเฟส A (I = 9.12A) 93.7% และเฟส C (I = 8.43A) ถึง 166% แม้อุณหภูมิแวดล้อมจะไม่เปลี่ยนแปลงมาก แต่ระหว่างวันที่ 1-10 ม.ค. 2568 การสูญเสียพลังงานในเฟส B พุ่งสูงถึง 0.004851W หรือมากกว่าปกติ 10-15 เท่า โดยไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิ สรุปผลได้ว่าในเดือนมกราคม 2568 พบว่า เฟส B มีกำลังสูญเสียรวมสูงสุด 0.01196W ขณะที่เฟส A และ C สูญเสียรวม 0.00604W และ 0.00512W ตามลำดับ

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาผลกระทบของความผันผวนของอุณหภูมิที่มีต่อระบบไฟฟ้าและการสูญเสียพลังงานในอาคารเรียน มทร.ศรีวิชัย พบว่า เฟส B มีความผันผวนสูงสุด (24.96°C - 30.82°C) ส่วนเฟส C คงที่ที่สุด โดยใน ม.ค. 2568 เฟส A พบการแกว่งตัวสูงสุดในช่วง 11-15 ม.ค. 2568 ขณะที่เฟส B ผันผวนไม่สม่ำเสมอ และเฟส C คงที่ ผลการศึกษาแสดงว่าการสูญเสียพลังงานโดยทั่วไปต่ำ แต่มีการเพิ่มขึ้นผิดปกติในช่วง 1-10 ม.ค. 2568 แนวทางปรับปรุง เช่น การปรับสมดุลโหลดไฟฟ้าในแต่ละเฟส การบริหารจัดการพลังงาน และการให้บุคลากรช่วยประหยัดพลังงาน เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในระยะยาว

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาพบว่าเฟส B มีความผันผวนสูงสุดและการแกว่งตัว ส่วนเฟส A และ C คงที่ การสูญเสียพลังงานโดยทั่วไปต่ำ แต่มีการสูญเสียสูงผิดปกติในช่วง 1-10 ม.ค. 2568 ข้อเสนอแนะคือ 1) ใช้สายตัวนำที่มีความต้านทานต่ำและกระจายความร้อนได้ดี 2) ปรับปรุงระบบจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพ โดยการตรวจสอบและจัดสรรพลังงานในแต่ละเฟส 3) ตรวจสอบและติดตามระบบไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอเพื่อระบุและแก้ไขปัญหาการสูญเสียพลังงาน โดยเฉพาะในช่วงที่เฟส B มีความผันผวน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Bonilla, M. Gil Samaniego, R. Ramos, and H. Campbell, “Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, pp. 155–162, 2018.

[2] M. Poyyamozhi, B. Murugesan, N. Rajamanickam, M. Shorfuzzaman, and Y. Aboelmagd, “IoT-A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review, applications, barriers, and future scope,” *Buildings*, vol. 14, no. 3446, 2024.

[3] J. สุขสวัสดิ์, "การวิเคราะห์การอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร", วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2564.

[4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "การอนุรักษ์พลังงานสำหรับสถานศึกษา", กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2563.



สันติ การีสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า



สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า: กรณีศึกษาอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

Study of the Relationship Between Electric Current, Temperature, and Voltage Drop in Main Electrical Wiring: A Case Study of the Faculty of Industrial Technology and Management, RMUTSV

สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[1] และ สันติ การีสันต์[2*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2*]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้วิเคราะห์แรงดันตกในสายเมนของอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัยโดยใช้ระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และ IoT พบว่าแรงดันตกเพิ่มขึ้นในเดือน ม.ค. 2568 โดยเฟส B มีความผันผวนสูงสุดถึง 1.18% ในช่วง 6-10 ม.ค. 2568 และเฟส B และเฟส C มีค่าแรงดันตกสูงสุด 1.40% ในช่วง 26-31 ม.ค. 2568 แสดงให้เห็นว่าภาระโหลดเพิ่มขึ้นส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ดังนั้น ควรดำเนิน การปรับปรุงแก้ไข เช่น ปรับสมดุลโหลดระหว่างเฟสต่าง ๆ ปรับปรุงตัวนำไฟฟ้า และการส่งเสริมพฤติกรรมการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพ การดำเนินการเหล่านี้จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน และปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น

คำสำคัญ: แรงดันตก, ระบบไฟฟ้า, การจัดการโหลด, ประสิทธิภาพพลังงาน

Abstract

This study analyzes the voltage drop in the main power cables of the Industrial Technician School Building at RMUTSV, using real-time energy monitoring and IoT technology. It was found that the voltage drop increased in January 2025, with Phase B experiencing the highest fluctuation of up to 1.18% during January 6-10, 2025. Both Phase B and C showed a maximum voltage drop of 1.40% during January 26-31, 2025. This indicates that the increased load is affecting the stability of the electrical system. Recommended corrective measures include Balancing the load between phases, Improving the conductors, and Promoting energy-efficient behaviors. These actions will help enhance stability, reduce energy loss, and improve the overall efficiency of the electrical system.

Keywords: Voltage Drop, Electrical System, Load Management, Energy Efficiency

1. บทนำ

แรงดันตก (Voltage Drop) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในอาคาร โดยเฉพาะในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรมที่มีโหลดไฟฟ้าหนักและไม่สมดุล แรงดันตกที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดปกติ ประสิทธิภาพลดลง และอาจนำไปสู่การสูญเสียพลังงานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนพลังงานสูงขึ้น รวมถึงอาจสร้างความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าในระยะยาว

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้าประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสาย ความต้านทานของสายไฟ และอุณหภูมิแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของสายตัวนำ หากโหลดไฟฟ้าไม่สมดุลระหว่างเฟส หรือมีการใช้สายไฟที่มีค่าความต้านทานสูง อาจทำให้แรงดันตกมากขึ้น ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้น การวิเคราะห์แรงดันตกภายในระบบไฟฟ้าของอาคารเรียนจึงมีความสำคัญในการหาทางแก้ไขเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้าภายในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยใช้ระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ร่วมกับเทคโนโลยี IoT [1], [2] เพื่อบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานและวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ต่อแรงดันตก [3] ผลการศึกษานี้จะช่วยให้สามารถกำหนดแนวทางในการบริหารจัดการโหลดไฟฟ้า การเลือกใช้สายตัวนำที่เหมาะสม และการปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มี

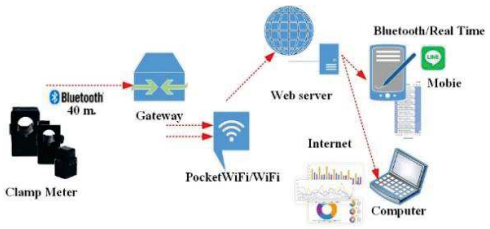
ประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าในอาคารเรียน [4]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

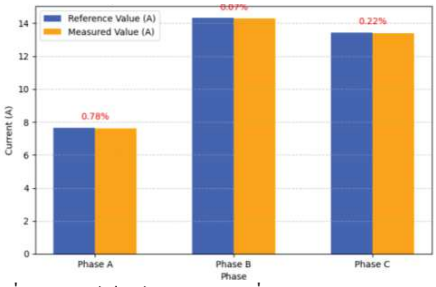
การศึกษานี้เก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิ และแรงดันไฟฟ้า จากระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ร่วมกับ IoT ในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย เป็นระยะเวลา 2 เดือน เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ เช่น กระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิ, ชนิดของสายเมน และแรงดันไฟฟ้า โดยใช้สมการทางไฟฟ้าคำนวณแรงดันตกในสายเมน พร้อมประเมินผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความต้านทานและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานและแรงดันไฟฟ้า ผลการศึกษานำเสนอแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพระบบไฟฟ้าเพื่อลดการสูญเสียพลังงานและรักษาเสถียรภาพแรงดันในอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม

2.1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงาน

การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานใช้ Clamp Meter ตรวจจับกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติในการใช้พลังงานได้แบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเรียลไทม์



รูปที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัด (Error %)

จากกราฟรูปที่ 2 พบว่าเฟส A (7.6A) วัดได้ 7.66A (+0.78%) เฟส B (14.3A) วัดได้ 14.31A (+0.07%) และเฟส C (13.4A) วัดได้ 13.43A (+0.22%) ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงค่ามาตรฐาน ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.07% - 0.78%

2.2 การวิเคราะห์แรงดันตกในสายเมนไฟฟ้าอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

1. แรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า (Voltage Drop, V_d) มีทั้งส่วนที่เกิดจากค่า ความต้านทาน (R) และ รีแอกแตนซ์ (X) ซึ่งคำนวณจากสูตร

$$V_d = \sqrt{3} \times I \times (R_{total}\cos\theta + X_{total}\sin\theta) \quad (1)$$

โดย ค่าแรงดันตกที่เหมาะสมโดยทั่วไปไม่ควรเกิน 2-3% สำหรับสายเมน และ 5% สำหรับวงจรย่อย ตามมาตรฐาน IEEE Std 141-1993

2. ค่าความต้านทานของสายเมนไฟฟ้า

ความผันผวนของอุณหภูมิสามารถส่งผลต่อความต้านทานของสายเมนไฟฟ้า สามารถคำนวณโดยใช้สูตรทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและความต้านทาน ดังนี้

$$R_{total} = R_0\left[1 + \alpha(T - T_0)\right] \quad (2)$$

โดย R_{total} = ความต้านทานที่อุณหภูมิ T($^{\circ}$C), R_0 = ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง (มาตรฐาน IEC 60228) T_0(20 $^{\circ}$C) R=0.0000754 Ω/m, α = สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของตัวนำ (สำหรับทองแดง $\alpha \approx 0.00393$ / $^{\circ}$C) และ T = อุณหภูมิขณะพิจารณา สายเมน CV (XLPE) ขนาด 240 mm² ทองแดง ความยาว 600 เมตร (ไป-กลับ) นำมาใช้คำนวนค่าความต้านทานของสายไฟ (Resistance, R_0) ได้จาก

$$R_0 = \rho\frac{\ell}{A} \quad (3)$$

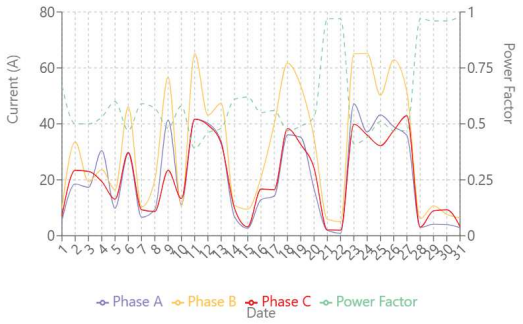
โดย R_0 = ความต้านทาน (Ω), ρ = ความต้านทานจำเพาะของทองแดง (1.724×10^{-8} Ω / m (20 $^{\circ}$C), ℓ = ความยาวของสายไฟ (เมตร), A = พื้นที่หน้าตัดของสายไฟ (ตารางเมตร, m²)

3. การวิเคราะห์

การศึกษานี้ เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า, อุณหภูมิ และแรงดันตกในสายเมนของระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และ IoT มาทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของค่ากระแสไฟฟ้าที่มีการใช้งานในช่วงเวลาต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์สามารถบ่งบอกถึงผลกระทบต่อค่าแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาความผันผวนของอุณหภูมิในสายเมนไฟฟ้า ที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานและทำให้เกิดแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า รวมทั้งคำนวณและเปรียบเทียบแรงดันตกในสภาพโหลดและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

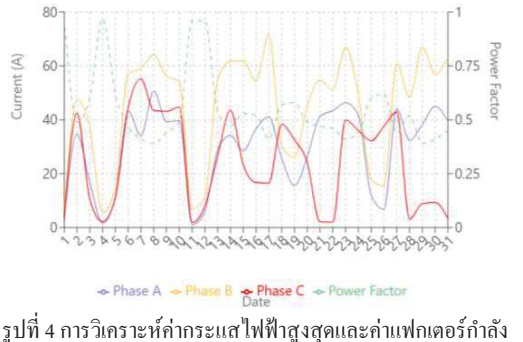
ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยกระแสไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละเฟสทั้ง 2 เดือน

Date	Average Max Current Phase A	Average Max Current Phase B	Average Max Current Phase C	Power Factor (PF)
Dec 1-5	16.32	20.56	17.20	0.56
Dec 6-10	19.62	28.72	16.90	0.54
Dec 11-15	25.02	35.22	25.48	0.51
Dec 16-20	23.04	42.22	25.66	0.52
Dec 21-25	26.06	38.30	22.44	0.66
Dec 26-31	14.80	24.20	17.52	0.80
Jan 1-5	13.54	22.30	13.88	0.73
Jan 6-10	41.38	58.16	46.20	0.44
Jan 11-15	19.76	39.34	20.70	0.70
Jan 16-20	29.06	45.58	28.74	0.51
Jan 21-25	36.92	47.96	39.40	0.48
Jan 26-31	34.30	51.90	34.93	0.47



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและค่าแฟกเตอร์กำลัง (ธ.ค. 2567)

จากกราฟในรูปที่ 3 พบว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดของเฟส A ~40 A, B ~80 A (สูงสุด), C ~70 A และแฟกเตอร์กำลังอยู่ระหว่าง 0.2-1.0 ค่าเฉลี่ย 0.5-0.75 เฟส B กระแสไฟฟ้าสูงอาจส่งผลต่อแรงดันตกและแฟกเตอร์กำลังต่ำ ควรตรวจสอบโหลดและปรับปรุงแฟกเตอร์กำลังเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน

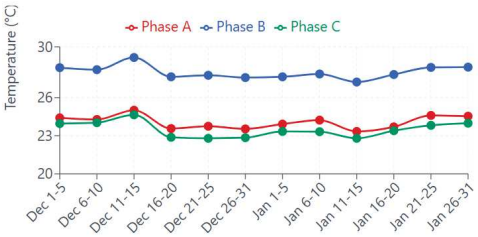


รูปที่ 4 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและค่าแฟกเตอร์กำลัง (ม.ค. 2568)

จากกราฟในรูปที่ 4 พบว่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ของเฟส A ~45 A, B ~75 A (สูงสุด), C ~70 A และค่าแฟกเตอร์กำลังอยู่ระหว่าง 0.25-1.0 ค่าเฉลี่ย 0.6-0.8 ซึ่งดีขึ้นจาก ธ.ค. 2567 เฟส B ยังคงมีกระแสไฟฟ้าสูงสุดและแฟกเตอร์กำลังดีขึ้นเล็กน้อย แต่ยังมีช่วงค่าต่ำ ควรตรวจสอบโหลดในเฟส B และปรับปรุงแฟกเตอร์กำลังเพิ่มเติมเพื่อเสถียรภาพของระบบ

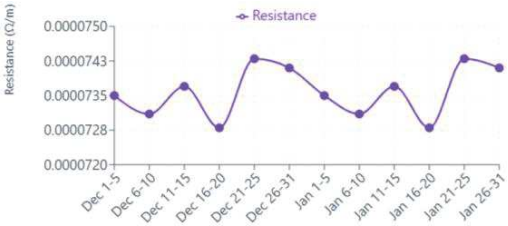
ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานเฉลี่ยรวม 3 เฟส ของสายเมนไฟฟ้า จากการคำนวณ (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

Date	Average Temp Phase A	Average Temp Phase B	Average Temp Phase C	Resistance (Ω/m)
Dec 1-5	24.41	28.36	23.96	0.0000735
Dec 6-10	24.28	28.20	24.03	0.0000731
Dec 11-15	25.01	29.16	24.65	0.0000737
Dec 16-20	23.57	27.64	22.88	0.0000728
Dec 21-25	23.75	27.76	22.80	0.0000743
Dec 26-31	23.54	27.58	22.85	0.0000741
Jan 1-5	23.92	27.64	23.34	0.0000735
Jan 6-10	24.23	27.86	23.32	0.0000731
Jan 11-15	23.34	27.23	22.80	0.0000737
Jan 16-20	23.70	27.82	23.40	0.0000728
Jan 21-25	24.60	28.38	23.82	0.0000743
Jan 26-31	24.54	28.40	23.99	0.0000741



รูปที่ 5 การวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุด 3 เฟส (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่า เฟส B มีอุณหภูมิสูงสุด (~27-30°C) ตลอดช่วงเวลา ขณะที่ เฟส A และ C ต่ำกว่า (~22-25°C) โดย เฟส C ต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นช่วงปลาย ม.ค. 2568 อุณหภูมิที่สูงใน เฟส B อาจเพิ่มความต้านทานและการสูญเสียพลังงาน ควรปรับสมดุลโหลดเพื่อลดผลกระทบ

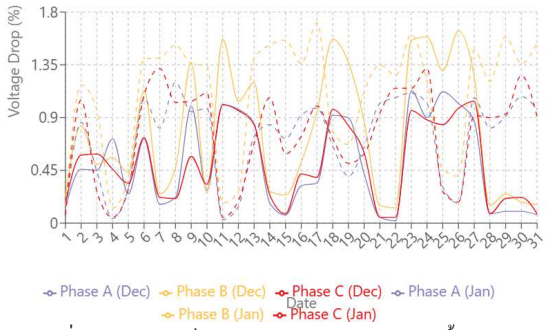


รูปที่ 6 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานเฉลี่ยรวมทั้ง 3 เฟส

จากกราฟในรูปที่ 6 พบว่าค่าความต้านทานฉลี่ยรวมทั้ง 3 เฟส อยู่ในช่วง 0.0000720 - 0.0000750 Ω /m โดยมีการขึ้นลงสม่ำเสมอ ความต้านทานสูงในช่วง 21-25 ธ.ค. 2567, 16-20 ม.ค. 2568 และ 26-31 ม.ค. 2568 ส่วนความต้านทานต่ำในช่วง 6-10 ม.ค. 2568 และ 11-15 ม.ค. 2568 ควรตรวจสอบอุณหภูมิและโหลดไฟฟ้า พร้อมติดตามแนวโน้มต่อเนื่อง

ตารางที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์แรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

Date	% Voltage Drop (ธ.ค. 2567)			% Voltage Drop (ม.ค. 2568)		
	Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C
1-5	0.13	0.23	0.17	0.07	0.15	0.07
6-10	0.46	0.83	0.58	0.86	1.18	1.05
11-15	0.45	0.50	0.59	0.44	0.96	0.27
16-20	0.72	0.56	0.46	0.04	0.13	0.05
21-25	0.25	0.43	0.34	0.30	0.39	0.29
26-31	0.72	1.13	0.73	1.06	1.40	1.09



รูปที่ 7 การวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า % Voltage Drop ทั้ง 3 เฟส (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

จากกราฟในรูปที่ 7 พบว่า เฟส B มีแรงดันตกสูงสุดที่ประมาณ 1.5% ทั้ง ธ.ค. 2567 และ ม.ค. 2568 โดยมีความผันผวนชัดเจน เฟส C มีแรงดันตกสูงสุดประมาณ 1.3% ใน ม.ค. 2568 ซึ่งสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ธ.ค. 2567 ที่มีแรงดันตกประมาณ 1.0% เฟส A มีแรงดันตกต่ำที่สุดที่ประมาณ 0.8% แรงดันตกมีความผันผวนในแต่ละวัน ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้า

4. ผลการศึกษา

แรงดันตกในสายเมนไฟฟ้า อาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย มีความผันผวนตลอดวัน โดยที่เฟส B มีแรงดันตกสูงสุดและเฟส A ต่ำสุดในทั้งสองเดือน แรงดันตกใน ม.ค. 2568 สูงกว่า ธ.ค. 2567 เล็กน้อย สอดคล้องกับโหลดไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นช่วงเปิดภาคเรียน ผลการศึกษาเปรียบเทียบกับ IEEE Std 141-1993 พบว่าแรงดันตกยังอยู่ในเกณฑ์ยอมรับ (≤3%) โดยเฟส B ได้รับผลกระทบสูงสุด อาจเกิดจากโหลดไฟฟ้าไม่สมดุล

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาพบว่าแรงดันตกในสายเมนไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในเฟส B ซึ่งสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้าที่สูงและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานของสายสูงขึ้น และทำให้เกิดแรงดันตกมากกว่าปกติ ทั้งนี้อาจกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นควรดำเนินการปรับสมดุลโหลดระหว่างเฟส ใช้ตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความต้านทานต่ำ และพิจารณาติดตั้งตัวควบคุมแรงดันอัตโนมัติเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบ ลดการสูญเสียพลังงาน และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยรวม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Bonilla, M. Gil Samaniego, R. Ramos, and H. Campbell, “Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, pp. 155–162, 2018.

[2] M. Poyyamozhi, B. Murugesan, N. Rajamanickam, M. Shorfuzzaman, and Y. Aboelmagd, “IoT-A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review, applications, barriers, and future scope,” *Buildings*, vol. 14, no. 3446, 2024.

[3] T. Somraks, "การตั้งค่ามาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าความเสียหายจากไฟฟ้าดับ และแรงดันตกชั่วขณะ," วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2018.

[4] B. Singjaroen and S. Sakaew, "การแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะด้วยวิธีชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟด้วยเอสวีซี," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, vol. 22, no. 1, pp. 1-10, Jan.-Apr. 2020.



สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี



สันติ การีสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า

การวิเคราะห์และพัฒนาแนวทางสู่การเป็นอาคารต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อม: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย

Analysis and Development of Guidelines for an Eco-Friendly Model Building: A Case Study of the College of Industrial Technology and Management, RMUTSV

สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*]
[1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: santi.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และพัฒนาแนวทางสู่อาคารต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อม โดยศึกษาจากกรณีของวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย ผ่านการตรวจวัดข้อมูลไฟฟ้าในระบบสามเฟส (เฟส A, B และ C ซึ่งเป็นสายจ่ายไฟฟ้าหลักของระบบสามเฟส) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มค่า Carbon Intensity และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงปี 2568-2573 พบว่าเฟส B มีค่า Carbon Intensity สูงสุด (2.49 ถึง 3.18 kg/m²) ขณะที่เฟส A และ C เพิ่มขึ้นจาก 1.07 ถึง 1.37 kg/m² และ 1.27 ถึง 1.62 kg/m² ตามลำดับ รวมถึงการปล่อยก๊าซรวมเพิ่มจาก 28,467 เป็น 36,332 kg แนะนำให้ใช้เทคโนโลยีประหยัดพลังงานและพลังงานทดแทน เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสร้างความยั่งยืนในระบบอาคารต่อไป

คำสำคัญ: อาคารเขียว, การใช้พลังงาน, การปล่อย CO_2, พลังงานหมุนเวียน, ระบบจัดการอาคารอัจฉริยะ

Abstract

This research aims to analyze and develop a pathway toward an environmentally friendly model building, using a case study of the College of Industrial Technology and Management, RMUTSV. The study involves monitoring electrical data from a three-phase power system (Phases A, B, and C, which represent the main power distribution lines) to analyze trends in carbon intensity and greenhouse gas emissions from 2025 to 2030. The results show that Phase B has the highest carbon intensity, increasing from 2.49 to 3.18 kg/m², while Phases A and C rose from 1.07 to 1.37 kg/m² and 1.27 to 1.62 kg/m², respectively. The total greenhouse gas emissions also increased from 28,467 kg in 2025 to 36,332 kg in 2030. It is recommended to adopt energy-saving technologies and renewable energy sources to reduce emissions and enhance the long-term sustainability of the building system.

Keywords: Green Building, Energy Consumption, CO_2 Emissions, Renewable Energy, Smart Building Management

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาสิ่งแวดล้อมและภาวะโลกร้อนเป็นประเด็นสำคัญที่ทั่วโลกให้ความสนใจ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอาคารเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังนั้น การพัฒนาแนวทางเพื่อลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของอาคารจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์และพัฒนาแนวทางสู่อาคารต้นแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้กรณีศึกษาของวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

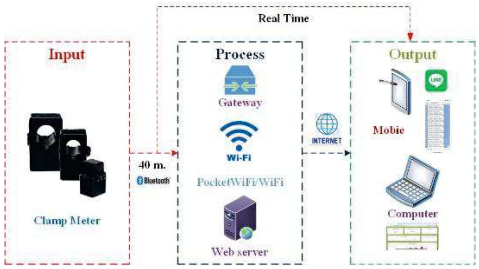
การศึกษานี้ได้วิเคราะห์แนวโน้มของ Carbon Intensity และปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงปี 2568-2573 เพื่อประเมินผลกระทบจากการใช้พลังงานภายในอาคาร ตลอดจนสำรวจแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประหยัดพลังงานและพลังงานหมุนเวียนเพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [2], [3] ผลการศึกษาคาดว่าจะสามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาอาคารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถปรับใช้กับอาคารอื่น ๆ ได้ในอนาคต [1]

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีเป้าหมายในการวิเคราะห์การใช้พลังงานและสิ่งแวดล้อมของอาคาร เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแนวทางปรับปรุงให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามแนวคิด อาคารเขียว (Green Building) โดยศึกษาโครงสร้างอาคาร ระบบไฟฟ้า พฤติกรรมการใช้พลังงาน และสภาพแวดล้อมภายในอาคาร การวิเคราะห์จะใช้ เทคโนโลยี IoT ในการตรวจวัดพลังงานและสิ่งแวดล้อม พร้อมเปรียบเทียบกับมาตรฐานอาคารเขียว จากนั้นจะเสนอแนวทางการปรับปรุง เช่น การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ (LED, Smart Lighting, Solar Cell), การเพิ่มประสิทธิภาพระบบระบายอากาศ, และ การบริหารจัดการพลังงานอัจฉริยะ ผลลัพธ์ที่คาดหวัง ได้แก่ การลดการใช้พลังงาน, ปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อม, และสร้างต้นแบบอาคารเขียวที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารอื่นในมหาวิทยาลัย เพื่อส่งเสริมความยั่งยืนในระยะยาว

2.1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงาน

การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานใช้ Clamp Meter ตรวจจับกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติในการใช้พลังงานได้แบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเรียลไทม์



รูปที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัด (Error %)

จากกราฟในรูปที่ 2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error Percentage) ในแต่ละเฟส โดย เฟส A มีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ประมาณ 0.8% ตามด้วย เฟส C ที่ประมาณ 0.2% ขณะที่ เฟส B มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดเพียง 0.07% แสดงให้เห็นว่า เฟส B มีความเสถียรและความแม่นยำของข้อมูลสูงกว่าเฟสอื่น ในขณะที่ เฟส A อาจต้องมีการปรับปรุงเพื่อลดข้อผิดพลาดในการวัดค่าหรือคำนวณ

2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2) และการคำนวณ Carbon Footprint ของอาคาร

1. การคำนวณพลังงานที่ใช้ (kWh)

$$\text{พลังงาน (kWh)} = \frac{\text{Power (W)} \times 24}{1000} \quad (1)$$

โดยการนำค่าพลังงานเฉลี่ย (Power) ต่อชั่วโมงคูณด้วยจำนวนชั่วโมงในหนึ่งวัน (24 ชั่วโมง) และแปลงหน่วยเป็น kWh

2. คำนวณการปล่อย CO_2 ($kg\ CO_2$)

ใช้ค่า Emission Factor (EF) สำหรับการคำนวณการปล่อย CO_2 จากการใช้พลังงานไฟฟ้า ค่า EF จากการรายงานของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ข้อมูล ณ วันที่ 28 ก.พ. 2567 เฉลี่ยอยู่ในระดับ 0.401 $kg\ CO_2$ /kWh)

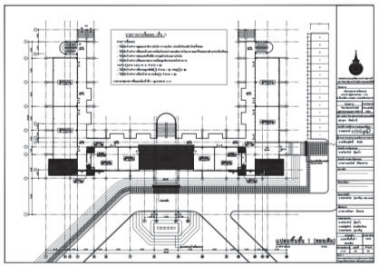
$$CO_2\,(kg) = \text{พลังงาน (kWh)} \times 0.401 CO_2 \ / \ kWh \quad (2)$$

เมื่อได้พลังงานในหน่วย kWh แล้ว นำค่าดังกล่าวมาคูณกับ Emission Factor (ค่า EF) เพื่อคำนวณปริมาณการปล่อย CO_2

3. Carbon Intensity คือ การคำนวณการปล่อย CO_2 ($kg\ CO_2/m^2$) ต่อพื้นที่อาคาร (m^2)

$$\text{Carbon Intensity} = \frac{\text{ปริมาณ } CO_2\,(kg)}{\text{พื้นที่อาคาร } (m^2)} \quad (3)$$

โดย พื้นที่อาคาร คือ พื้นที่อาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรมทั้งหมด 4 ชั้น จากแบบอาคารเรียนสามารถคำนวณพื้นที่ทั้งหมดได้เท่ากับ 5,896 m^2



รูปที่ 3 แบบแปลนพื้นที่อาคารเรียนรวมช่างอุตสาหกรรม (ชั้น1)

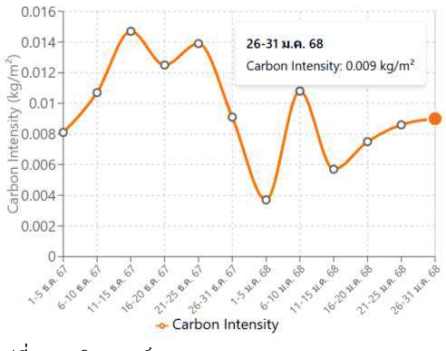
3. การวิเคราะห์

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์และพัฒนาแนวทางสู่การเป็นอาคารต้นแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมของระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนช่าง

อุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลจากระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และเทคโนโลยี IoT มาประเมินผลกระทบด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผ่านการคำนวณค่า Carbon Footprint ของอาคารและ Carbon Intensity จากการใช้พลังงานไฟฟ้า ใน 1 ปี และพยากรณ์อีก 5 ปีข้างหน้า ว่ามีแนวโน้มในการปล่อย CO_2 เท่าไหร่เพื่อได้มีการวางมาตรการและแนวทางในการลดการปล่อย CO_2 ต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าCarbon Intensity (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

วันที่ เดือน ปี	พลังงานรวม (kWh)	การปล่อย CO_2 (kg)	พื้นที่อาคาร (m^2)	Carbon Intensity kg CO_2 /m^2
1-5 ธ.ค. 67	119.67	47.99	5,896	0.0081
6-10 ธ.ค. 67	156.69	62.83	5,896	0.0107
11-15 ธ.ค. 67	215.49	86.41	5,896	0.0147
16-20 ธ.ค. 67	183.88	73.73	5,896	0.0125
21-25 ธ.ค. 67	204.94	82.18	5,896	0.0139
26-31 ธ.ค. 67	134.45	53.91	5,896	0.0091
1-5 ม.ค. 68	53.88	21.61	5,896	0.0037
6-10 ม.ค. 68	158.84	63.73	5,896	0.0108
11-15 ม.ค. 68	83.93	33.66	5,896	0.0057
16-20 ม.ค. 68	110.22	44.23	5,896	0.0075
21-25 ม.ค. 68	127.10	51.00	5,896	0.0086
26-31 ม.ค. 68	131.62	52.81	5,896	0.0090



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ Carbon Intensity (ธ.ค. 2567-ม.ค. 2568)

จากกราฟในรูปที่ 4 พบว่าช่วง 11-15 ธ.ค. 67 มีการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอนสูงสุด (215.49 kWh, 86.41 kg) ช่วง 1-5 ม.ค. 68 มีการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอนต่ำสุด (53.88 kWh, 21.61 kg) เดือนธ.ค. 67 มีการใช้พลังงานรวม 1015.12 kWh สูงกว่า ม.ค. 2568 (665.59 kWh) ถึง 349.53 kWh ค่าเฉลี่ย Carbon Intensity อยู่ที่ 0.0095 kg/m^2 การปล่อยคาร์บอนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการใช้พลังงาน โดยมีสัดส่วนการปล่อยประมาณ 0.4 kg ต่อการใช้พลังงาน 1 kWh

ตารางที่ 3 ค่าพยากรณ์ Carbon Intensity ทั้ง 3 เฟส (5ปี)

Phase	2568 (kWh)	2569 (kWh)	2570 (kWh)	2571 (kWh)	2572 (kWh)	2573 (kWh)
A	15,744	16,531	17,358	18,226	19,137	20,094
B	36,609	38,439	40,361	42,379	44,498	46,723
C	18,638	19,570	20,549	21,576	22,655	23,788

ตารางที่ 3 แสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละปีของแต่ละเฟส (A, B, C) ในช่วง 5 ปี (2568-2573) การพยากรณ์ค่า Carbon Intensity จะใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซ CO_2 ต่อหน่วยพลังงาน (kWh) ซึ่งจะช่วยประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและวางแผนลดการปล่อยก๊าซในอนาคต

ตารางที่ 4 ค่าพยากรณ์ ค่า Carbon Intensity และ Emission Factor (EF) ทั้ง 3 เฟส (5ปี)

ปี พ.ศ.	เฟส A (Carbon Intensity, kg CO_2 /m^2)	เฟส B (Carbon Intensity, kg CO_2 /m^2)	เฟส C (Carbon Intensity, kg CO_2 /m^2)	เฟส A (EF, kg CO_2)	เฟส B (EF, kg CO_2)	เฟส C (EF , kg CO_2)
2568	1.07	2.49	1.27	6,313.34	14,680.21	7,473.84
2569	1.12	2.61	1.33	6,628.93	15,414.04	7,847.57
2570	1.18	2.75	1.40	6,960.56	16,184.76	8,240.15
2571	1.24	2.88	1.47	7,308.63	16,993.98	8,651.98
2572	1.30	3.03	1.54	7,673.94	17,843.70	9,084.66
2573	1.37	3.18	1.62	8,057.69	18,735.92	9,538.99

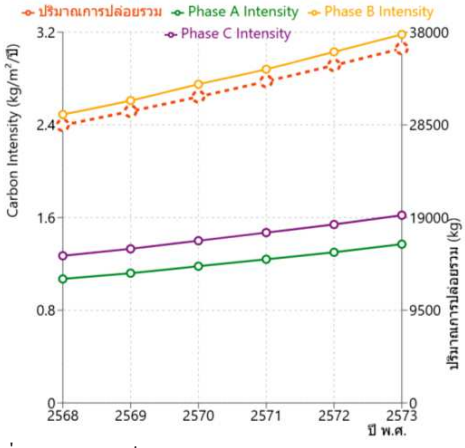
ตารางที่ 4 แสดงค่า Carbon Intensity (kg/m^2) และ Emission Factor (EF, kg) สำหรับแต่ละเฟส (A, B, C) ในปี พ.ศ. 2568 ถึง 2573 โดย Carbon Intensity แสดงการปล่อยก๊าซ CO_2 ต่อพื้นที่ (m^2) ส่วน Emission Factor (EF) แสดงการปล่อยก๊าซ CO_2 ต่อการใช้พลังงาน (kWh) สำหรับแต่ละเฟส ค่าเหล่านี้ช่วยในการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการพลังงานในอนาคต

ตารางที่ 5 ค่าพยากรณ์ Carbon Intensity (5ปี)

ปี พ.ศ.	ปริมาณการปล่อย CO_2 รวม (kg CO_2)	Carbon Intensity (kg CO_2 m^2/ปี)
2568	28,467.39	4.83
2569	29,890.54	5.07
2570	31,385.47	5.32
2571	32,954.59	5.59
2572	34,602.30	5.87
2573	36,332.60	6.16

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซ CO_2 รวม (kg) และ Carbon Intensity (kg/m^2/ปี) ในแต่ละปี (2568-2573) โดย ปริมาณการ

ปล่อยก๊าซ CO_2 รวม แสดงผลรวมของการปล่อยก๊าซ CO_2 สำหรับทุกเฟส ในขณะที่ Carbon Intensity แสดงการปล่อยก๊าซ CO_2 ต่อพื้นที่ (m^2) ต่อปี ค่าเหล่านี้ช่วยในการติดตามและประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานในระยะยาว



รูปที่ 5 การพยากรณ์ Carbon Intensity จากการปล่อย CO_2 รวม (5ปี)

จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่ากราฟ เฟส B มีค่า Carbon Intensity สูงสุด โดยเพิ่มจากประมาณ 2.49 kg/m² ในปี 2568 เป็น 3.18 kg/m² ในปี 2573 เฟส A และ เฟส C เริ่มต้นที่ 1.07 และ 1.27 kg/m² ตามลำดับ (ปี 2568) และเพิ่มขึ้นเป็น 1.37 และ 1.62 kg/m² (ปี 2573) ปริมาณการปล่อยรวม (แกนขวา) เพิ่มขึ้นจาก 28,467 kg ในปี 2568 เป็น 36,332 kg ในปี 2573 โดยสรุป ทุกเฟสมีแนวโน้ม Carbon Intensity สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และปริมาณการปล่อยรวมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสะท้อนการใช้พลังงานที่มากขึ้นและอาจต้องมีมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอนาคต

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่าแนวโน้มของค่า Carbon Intensity แสดงภาพที่ชัดเจนในการเพิ่มขึ้นในทุกเฟส โดยเฉพาะเฟส B ที่โดดเด่นด้วยค่า Carbon Intensity ที่พุ่งจาก 2.49 kg/m² ในปี 2568 เป็น 3.18 kg/m² ในปี 2573 ขณะที่เฟส A และเฟส C ก็มีการเพิ่มขึ้นตามลำดับจาก 1.07 เป็น 1.37 kg/m² และจาก 1.27 เป็น 1.62 kg/m² ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซรวมก็เพิ่มขึ้นอย่างน่าทึ่ง จาก 28,467 kg ในปี 2568 ไปจนถึง 36,332 kg ในปี 2573 สะท้อนให้เห็นว่าการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น นั้นมีผลกระทบต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้ทำให้ตระหนักถึงวิธีการใช้พลังงาน เร่งนำเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน ส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน เพื่อควบคุมค่า Carbon Intensity และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สร้างความยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้พบว่า ค่า Carbon Intensity ของเฟส B สูงที่สุด (จาก 2.49 เป็น 3.18 kg/m²) ขณะที่เฟส A และ C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการปล่อยคาร์บอนรวมที่เพิ่มจาก 28,467kg ในปี 2568 เป็น 36,332kg ในปี 2573 สะท้อนถึงประสิทธิภาพพลังงานที่ยังต่ำ ข้อเสนอแนะคือ ควรส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน เช่น Solar PV และอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน พร้อมวางเป้าหมายและติดตามการลดการปล่อยคาร์บอนอย่างต่อเนื่อง เพื่อมุ่งสู่อาคารต้นแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Bonilla, M. Gil Samaniego, R. Ramos, and H. Campbell, “Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, pp. 155–162, 2018.

[2] S. Wang and C. Yan, "Building energy efficiency and intelligent building," *Advances in Building Energy Research*, vol. 14, no. 2, pp. 87–102, 2020.

[3] A. GhaffarianHoseini et al., "The essence of future smart houses: From embedding ICT to adapting to sustainability principles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 855–869, 2016.

[4] L. Zhang and X. Bai, "Green buildings in China: Policies, practices, and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 493–500, 2018.



สันติ การีสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า



สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์พฤติกรรมการสวิงของกระแสไฟฟ้าและผลกระทบต่อเสถียรภาพระบบไฟฟ้า: แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและความยั่งยืน กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย

Analysis of Electrical Current Swing Behavior and Its Impact on Power System Stability: Approaches for Improving Efficiency and Sustainability-A Case Study of the College of Industrial Technology and Management, RMUTSV

สันติ การีสันต์[1] และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[2*]
[1]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: santi.k@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการสวิงของกระแสไฟฟ้าต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า โดยใช้พารามิเตอร์ Crest Factor และ Form Factor ในการศึกษาคุณภาพสัญญาณไฟฟ้าในช่วงเดือน ธ.ค. 67 และ ม.ค. 68 ผลการศึกษาพบว่า Crest Factor สูงขึ้นในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะวันที่ 12-13 ธ.ค. 67 (สูงสุด 20.57) และวันที่ 12 ม.ค. 68 (สูงสุด 17.91) ขณะที่ Form Factor แสดงค่าที่ไม่เสถียรในบางวัน บ่งชี้ถึงพฤติกรรมโหลดไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ผลการวิเคราะห์สามารถใช้ในการประเมินและทำนายการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้า ช่วยจัดการปัญหาการสวิงของไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อลดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในระยะยาว

คำสำคัญ: ค่าดัชนีรูปคลื่น (Crest Factor), ค่าดัชนีรูปคลื่นแบบ RMS/Mean, ความแปรผันของสัญญาณไฟฟ้า, การสวิงของค่ากระแสไฟฟ้า, ความเสถียรของระบบไฟฟ้า

Abstract

This study aims to analyze the impact of electrical current fluctuations on the stability of the power system using Crest Factor and Form Factor as key parameters to assess power quality during December 2024 and January 2025. The results indicate that the Crest Factor increased during certain periods, particularly on December 12-13, 2024 (peaking at 20.57) and January 12, 2025 (peaking at 17.91). Meanwhile, the Form Factor exhibited instability on specific days, indicating irregular electrical load behavior. The analysis can be utilized to evaluate and predict changes in electrical signals, aiding in the management of power fluctuations and improving energy efficiency. This study also proposes strategies to enhance power system stability and mitigate long-term power quality issues.

Keywords: Crest Factor, Form Factor (RMS/Mean), Signal Variability, Current Swing, Electrical System Stability.

1. บทนำ

คุณภาพไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีโหลดไฟฟ้าหลากหลาย เช่น โรงงานอุตสาหกรรม อาคารสำนักงาน และสถาบันการศึกษา หนึ่งในปัญหาที่พบได้บ่อยคือความสวิงของกระแสไฟฟ้า (Current Swing) ซึ่งเกิดจากโหลดที่ไม่เสถียร การเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า และผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์ [1] ปัญหานี้อาจนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้า การสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น และความเสื่อมของคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลต่อการทำงานของระบบโดยรวม [2]

มาตรฐาน IEEE 519-2014 ได้กำหนดแนวทางในการควบคุมฮาร์มอนิกส์และคุณภาพไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความผิดปกติของสัญญาณไฟฟ้า [3] อย่างไรก็ตาม การติดตามและวิเคราะห์คุณภาพสัญญาณไฟฟ้ายังเป็นความท้าทายที่ต้องอาศัยตัวชี้วัดที่เหมาะสม งานวิจัยนี้เลือกใช้ Crest Factor และ Form Factor เป็นพารามิเตอร์หลักในการวิเคราะห์ Crest Factor เป็นตัวบ่งชี้ระดับสูงสุดของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเมื่อเทียบกับค่า RMS ซึ่งสามารถใช้ประเมินความผิดปกติของสัญญาณได้

ดี โดยเฉพาะในระบบที่มีฮาร์มอนิกสูง [4] ขณะที่ Form Factor ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายของสัญญาณและเสถียรภาพของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะของโหลด [5] การศึกษาความสัมพันธ์ของทั้งสองพารามิเตอร์ช่วยให้สามารถตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า คาดการณ์ปัญหาจากโหลดที่เปลี่ยนแปลงฉับพลัน และปรับกลยุทธ์การจัดการโหลดให้เหมาะสม

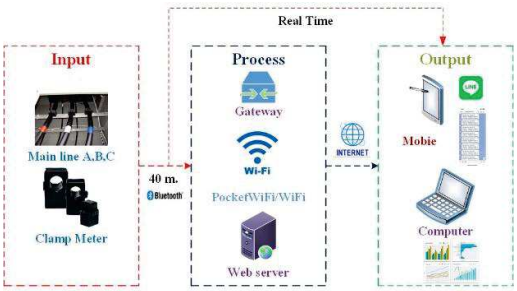
ผลการวิเคราะห์จากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่แนวทางในการพัฒนาโซลูชันด้านการบริหารจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดการสูญเสียพลังงาน และช่วยให้ระบบไฟฟ้าในสถานประกอบการสามารถดำเนินงานได้อย่างมีเสถียรภาพและยั่งยืน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

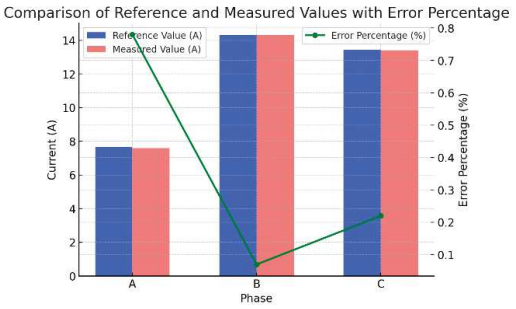
การเก็บข้อมูล รวบรวมข้อมูลกระแสไฟฟ้าและพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น Crest Factor, Form Factor, Peak Current, Mean Current และ RMS Current จาก ธ.ค. 67 และ ม.ค. 68 การวิเคราะห์ข้อมูล คำนวณค่า Crest Factor และ Form Factor และศึกษาการสวิงของสัญญาณไฟฟ้าในแต่ละวัน การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่าง ธ.ค. 67 และ ม.ค. 68 เพื่อหาความแตกต่างและสาเหตุที่อาจเกิดจากการใช้งานหรือโหลดไฟฟ้า การประเมินผล จะทำการวิเคราะห์ผลกระทบจากการสวิงของสัญญาณไฟฟ้าและหาวิธีเพิ่มความเสถียรของระบบ สรุปผลและเสนอแนวทางการปรับปรุงการจัดการโหลดไฟฟ้าเพื่อป้องกันปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในอนาคต

2.1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงาน

การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานใช้ Clamp Meter ตรวจจับกระแสไฟฟ้าร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติในการใช้พลังงานได้แบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานเรียลไทม์



รูปที่ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัด (Error %)

จากกราฟในรูปที่ 2 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Error Percentage) ในแต่ละเฟส โดย เฟส A มีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ประมาณ 0.8% ตามด้วย เฟส C ที่ประมาณ 0.2% ขณะที่ เฟส B มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุดเพียง 0.07% แสดงให้เห็นว่า เฟส B มีความเสถียรและความแม่นยำของข้อมูลสูงกว่าเฟสอื่น ในขณะที่ เฟส A อาจต้องมีการปรับปรุงเพื่อลดข้อผิดพลาดในการวัดค่าหรือคำนวณ

2.2 การวิเคราะห์การสวิงของค่ากระแสไฟฟ้าจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร

1. คำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) ของกระแสในแต่ละเฟส (เฟส A, B, C) โดยใช้สูตร

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (1)$$

2. คำนวณ Crest Factor เป็นอัตราส่วนของค่าเพค (Peak Value) ต่อค่าเฉลี่ย

$$\text{Crest Factor} = \frac{I_{peak}}{I_{RMS}} \qquad (2)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าสลับรูปไซน์ (sinusoidal AC) จะมีค่า Crest Factor ประมาณ 1.414 ค่า Crest Factor ใช้วัดว่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าเฉลี่ย (RMS) ของกระแสหรือแรงดันมีขนาดแตกต่างกันมากน้อยแค่ไหน ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงลักษณะของสัญญาณว่าเป็นสัญญาณที่มีความคลาดเคลื่อนมากจากรูปแบบมาตรฐาน (เช่น คลื่นไซน์)

3. Form Factor เป็นอัตราส่วนของค่าเฉลี่ย (Average Value) ต่อค่า RMS

$$\text{Form Factor} = \frac{I_{average}}{I_{RMS}} \qquad (3)$$

กรณีที่มีค่ากระแสเฉพาะในแต่ละเฟส I_A, I_B, I_C (สำหรับเฟส A, B, และ C) การหาค่ากระแส RMS ของแต่ละเฟสจะต้องหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 เฟส จากสูตร

$$I_{RMS,total} = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}} \quad (4)$$

ค่า Form Factor ของกระแส AC รูปไซน์อยู่ที่ ~1.11 ใช้วิเคราะห์ความเพี้ยนของสัญญาณ เช่น กรณีสัญญาณไม่สมมาตรหรือมีพัลส์ ซึ่งทำให้ค่า Form Factor สูงขึ้น

4. จำนวนครั้งของการแกว่งที่มีนัยสำคัญ นับการเปลี่ยนแปลงของกระแสเกิน 10% ของค่าเฉลี่ย

5. อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงสูงสุดระหว่างจุดต่อเนื่อง

$$\text{Max Rate of Change} = \max\left(\frac{I_{i+1} - I_i}{\Delta t}\right) \quad (5)$$

โดยที่ I_i คือกระแสที่เวลา t_i และ Δt คือระยะเวลา

3. การวิเคราะห์

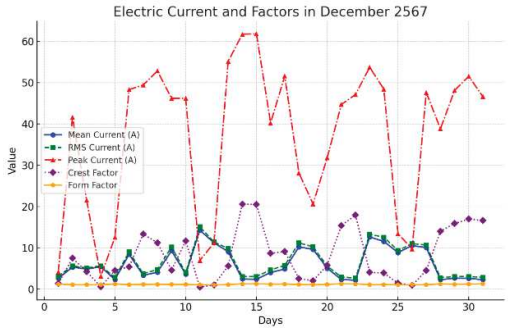
การศึกษานี้วิเคราะห์พฤติกรรมการสวิงของกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟส (A, B, C) โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean), Crest Factor, Form Factor และอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ค่า Crest Factor แสดงการเบี่ยงเบนจากรูปคลื่นไซน์มาตรฐาน (~1.414) ขณะที่ Form Factor (~1.11) ชี้วัดความเพี้ยนของสัญญาณ ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดใช้ตรวจสอบความเสถียรของกระแส ผลการวิเคราะห์ช่วยให้เข้าใจการสวิงของกระแสและนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าในวิทยาลัยฯ

ตารางที่ 1 ค่า Crest Factor และ Form Factor (ธ.ค. 67)

Date	Mean Current (A)	RMS Current (A)	Peak Current (A)	Crest Factor	Form Factor
Dec 1-5	4.09	4.43	16.56	3.61	1.11
Dec 6-10	5.73	6.31	48.58	9.22	1.11
Dec 11-15	7.85	8.46	39.34	9.62	1.13
Dec 16-20	6.73	7.46	34.46	5.60	1.12
Dec 21-25	7.48	8.13	41.46	8.52	1.14
Dec 26-31	5.06	5.55	40.38	11.46	1.15

ตารางที่ 2 ค่าการแกว่งและอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (ธ.ค. 67)

รายการ	ผลลัพธ์	หมายเหตุ
จำนวนครั้งของการแกว่ง	23 ครั้ง	พิจารณาจากค่า Crest Factor > 4
อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด	61.8 A	เกิดขึ้นที่ลำดับที่ 15



รูปที่ 3 กระแสไฟฟ้าและค่าปัจจัยรายวัน (ธ.ค. 67)

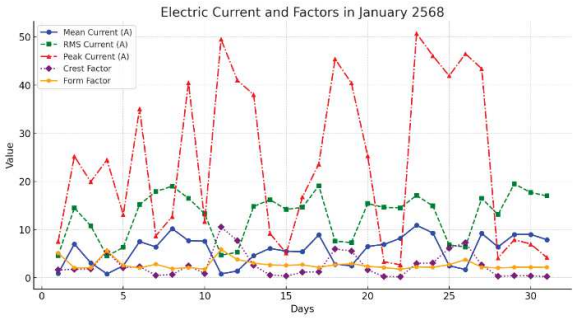
จากกราฟในรูปที่ 3 พบว่า Mean และ RMS Current มีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่บางวัน (11, 12, 23, 24) ค่าสูงผิดปกติ อาจเกิดจากโหลดเพิ่มขึ้น ขณะที่ Peak Current มีการเปลี่ยนแปลงชัดเจนและพุ่งสูงในบางวัน (7, 8, 13-15, 30) บ่งชี้ถึงโหลดชั่วขณะหรือโหลดไม่สมดุล Crest Factor สูงในช่วง 14-15 และ 28-31 อาจเกิดจากกระแสกระชากหรือโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ส่วน Form Factor ส่วนใหญ่คงที่ (1.05-1.27) แต่สูงขึ้นในบางวัน (14-15, 21-22) อาจสะท้อนความผิดปกติของรูปคลื่น ควรตรวจสอบกระแสสูงสุดที่พุ่งขึ้นเพื่อหาสาเหตุและแนวทางแก้ไข

ตารางที่ 3 ค่า Crest Factor และ Form Factor (ม.ค. 68)

Date	Mean Current (A)	RMS Current (A)	Peak Current (A)	Crest Factor	Form Factor
Jan 1-5	2.86	8.14	18.04	2.54	3.48
Jan 6-10	7.88	16.38	21.74	1.36	2.12
Jan 11-15	3.68	11.04	28.56	4.35	3.59
Jan 16-20	5.22	12.80	30.30	3.11	2.57
Jan 21-25	7.56	13.58	28.94	2.53	2.20
Jan 26-31	7.20	15.03	18.85	1.88	2.42

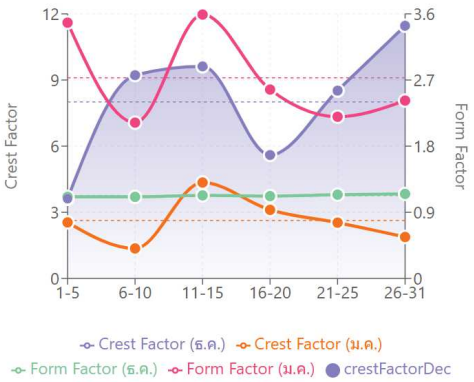
ตารางที่ 4 ค่าการแกว่งและอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (ม.ค. 68)

รายการ	ผลลัพธ์	หมายเหตุ
จำนวนครั้งของการแกว่ง	7 ครั้ง	พิจารณาจากค่า Crest Factor > 4
อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด	50.73 A	เกิดขึ้นที่ลำดับที่ 23



รูปที่ 4 กระแสไฟฟ้าและค่าปัจจัยรายวัน (ม.ค. 2568)

จากกราฟในรูปที่ 4 พบว่า Mean Current: ผันผวน สูงสุดวันที่ 23 (10.9A) ต่ำสุดวันที่ 4, 11 (0.8A) แนวโน้มเพิ่มกลางเดือน ลดปลายเดือน RMS Current เพิ่มขึ้นช่วง 6-10 และ 17-19 สูงสุดวันที่ 29 (19.5A) ต่ำสุดวันที่ 4 (4.5A) Peak Current ผันผวนสูง สูงสุดวันที่ 23 (50.7A) ต่ำสุดวันที่ 21-22 (2.7-3.3A) Crest Factor ผันผวนสูง โดยพีควันที่ 11 (10.54) และ 12 (7.73) อาจเกิดจากโหลดเปลี่ยนแปลงหรือกระแสกระชาก Form Factor ส่วนใหญ่คงที่ (2-3) แต่พุ่งสูงวันที่ 11 (5.88) และ 4 (5.63) แนวทางปรับปรุง ตรวจสอบโหลดในวันที่ Peak Current สูง (23, 26-27) ตรวจสอบอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อในวันที่ Crest Factor สูง (11-12) วิเคราะห์อุปกรณ์ที่อาจสร้างรูปคลื่นผิดปกติหรือฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 5 เปรียบเทียบค่า Crest Factor และ Form Factor (ธ.ค. 67-ม.ค. 68)

จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่า Crest Factor เดือนธันวาคมสูงกว่ามกราคม โดยพุ่งสูงสุดช่วง 26-31 ธ.ค. 67 แสดงถึงกระแสกระชากที่มากขึ้น Form Factor ธ.ค. 67 ค่อนข้างคงที่ (~1.11) ส่วน ม.ค. 68 มีความผันผวนและค่าสูงผิดปกติ โดยพีคช่วง 11-15 ม.ค. 68 ข้อสังเกต ม.ค. 68 มีความเพี้ยนของสัญญาณมากขึ้น อาจเกิดจากโหลดที่ไม่เสถียรหรือฮาร์มอนิกส์ แนวทางปรับปรุง ตรวจสอบอุปกรณ์และโหลดที่อาจทำให้ Crest Factor และ Form Factor ผิดปกติ โดยเฉพาะช่วง 11-15 ม.ค. 68

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาพบว่า Crest Factor ในบางวันที่ 12 และ 13 ธ.ค. 67 และวันที่ 12 ม.ค. 68 แสดงถึงการแปรผันสูง ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงในการใช้งานหรือโหลดไฟฟ้า Form Factor แสดงถึงการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอในบางวันที่ 29 ธ.ค. 67 และ 31 ม.ค. 68 ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่เสถียรในการใช้งาน ค่าสูงและต่ำในทั้งสองตัวแปรสะท้อนถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงและการกระจายของสัญญาณในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่อาจเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมโหลดไฟฟ้า ข้อเสนอแนะควรตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดในช่วงที่มีค่า Crest Factor และ Form Factor สูง เพื่อป้องกันผลกระทบต่อคุณภาพของระบบไฟฟ้า

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ Crest Factor และ Form Factor พบว่ามีการแปรผันสูงในบางวัน โดยเฉพาะในวันที่ 12 และ 13 ธ.ค. 67 และวันที่ 12 ม.ค. 68 ซึ่งอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการใช้งานหรือโหลดไฟฟ้า ขณะเดียวกันค่า Form Factor ก็แสดงถึงการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอในบางวันที่ 29 ธ.ค. 67 และ 31 ม.ค. 68 ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่เสถียรในการใช้งานไฟฟ้า ข้อเสนอแนะ ควรตรวจสอบพฤติกรรมของโหลดไฟฟ้าในวันที่มีค่า Crest Factor และ Form Factor สูง เพื่อประเมินผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้า และพิจารณาปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าผ่านการติดตั้งอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก หรือปรับสมดุลโหลดไฟฟ้า เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] J. C. Das, *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2015.

[2] H. Saadat, *Power System Analysis*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

[3] A. E. Emanuel, "Apparent power definitions for three-phase systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 767-772, Jul. 1999, doi: 10.1109/61.772353.

[4] G. T. Heydt, "Identification of power quality parameters using wavelet analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1469-1473, Oct. 1999, doi: 10.1109/61.796228.



สันติ การีสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า



สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การหาค่าเหมาะสมของเวลาการระบายความร้อนสายเคเบิลหลักเพื่อการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ: กรณีศึกษาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มทร.ศรีวิชัย

Optimizing Cooling Time of Main Cables for Efficient Energy Management: A Case Study at the College of Industrial Technology and Management, RMUTSV

สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ[1] และ สันติ การีสันต์[2*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2*]สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อนของสายเคเบิลหลัก โดยศึกษาช่วงอุณหภูมิระหว่าง 21-40°C ผลการวิจัยพบว่า เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเพิ่มขึ้น ภาระความร้อนเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลจาก 0.7MJ เป็น 10.3MJ ในขณะที่กำลังความร้อนเฉลี่ยลดลงเชิงเส้นจาก 1,320W เหลือ 670W อัตราการลดอุณหภูมิลดลงจาก 0.15°C/นาที เป็น 0.08°C/นาที (ลดลง 46.7% ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทุก 5°C) และประสิทธิภาพการทำความเย็นใน 1 ชั่วโมงแรกลดลงจาก 8.9°C (ที่ 21°C) เหลือ 4.8°C (ที่ 40°C) ระยะเวลาลดอุณหภูมิลงสู่ 20°C เพิ่มขึ้นจาก 5.2 นาที เป็น 248.7 นาที โดยช่วง 36-37°C เป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ส่งผลต่อการลดอุณหภูมิ ผลวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของการระบายความร้อนของสายเคเบิลหลักในสภาวะที่ร้อนขึ้น และให้ข้อมูลสำหรับการออกแบบระบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบพลังงานในอนาคต

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพพลังงาน, การถ่ายเทความร้อน, อุณหภูมิแวดล้อม

Abstract

This study aims to analyze the impact of ambient temperature on the cooling performance of main cables, focusing on a temperature range of 21-40°C. The results indicate that as ambient temperature increases, the heat load rises exponentially from 0.7MJ to 10.3MJ, while the average thermal power decreases linearly from 1,320W to 670W. The cooling rate declines from 0.15°C/min to 0.08°C/min (a 46.7% reduction for every 5°C increase in temperature), and the cooling efficiency in the first hour decreases from 8.9°C (at 21°C) to 4.8°C (at 40°C). The time required to lower the temperature to 20°C significantly increases from 5.2 minutes to 248.7 minutes, with a critical transition observed at 36-37°C, affecting the cooling process to 30°C and 35°C. These findings highlight the limitations of cable cooling performance in high-temperature conditions and provide insights for designing more effective cooling systems, particularly in applications requiring temperature control of electrical cables and equipment in elevated ambient temperatures. This knowledge is crucial for enhancing the efficiency and stability of future power systems.

Keywords: Energy efficiency, heat transfer, ambient temperature

1. บทนำ

ปัจจุบันระบบไฟฟ้าและการจัดการพลังงานในสถานศึกษามีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานและการลดต้นทุนพลังงาน อย่างไรก็ตาม การสูญเสียพลังงานจากความร้อนสะสมในสายเคเบิลหลักเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อความเสถียรของระบบไฟฟ้า ความต้านทานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น [1] ซึ่งอาจนำไปสู่ความร้อนสะสมเกินขีดจำกัด เสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของฉนวนและอายุการใช้งานของสายเคเบิล รวมถึงอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดปกติหรือเสียหาย [2]

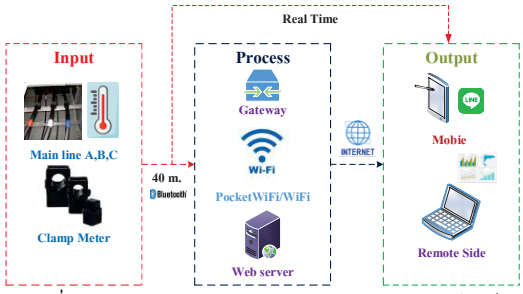
งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสายเคเบิลหลักภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมที่แตกต่างกัน โดยใช้ระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และระบบ IoT เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อการสูญเสียพลังงานและประสิทธิภาพการระบายความร้อน [3] ผลการศึกษาจะเป็นแนวทางในการออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ ลดความสูญเสียพลังงาน และเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานศึกษาและอุตสาหกรรม เพื่อรองรับการใช้งานที่ยั่งยืนมากขึ้น

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิแวดล้อมต่อการระบายความร้อนของสายเคเบิลหลัก และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมกับเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิ การเก็บข้อมูล โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, ระบบ IoT ตัวแปรอุณหภูมิแวดล้อม (°C) เวลาลดอุณหภูมิ (นาที) อัตราการลดอุณหภูมิ (°C/นาที) ช่วงศึกษา 21°C - 40°C การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้สถิติและกราฟวิเคราะห์แนวโน้ม ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการลดอุณหภูมิ ใช้สมการไฟฟ้าและความร้อนวิเคราะห์ผลกระทบและสรุปผล ข้อเสนอแนะจากประเด็นการที่อุณหภูมิสายเคเบิลหลักสูงขึ้น การระบายความร้อนช้าลง ควรมีการกำหนดแผนการตรวจสอบ บำรุงรักษา การปรับปรุงการระบายความร้อนอย่างเหมาะสม หรือออกแบบระบบระบายอากาศให้เหมาะสมในอนาคต

2.1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงาน

การติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิใช้ Clamp Meter ตรวจจับอุณหภูมิร่วมกับระบบ IoT เพื่อรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ และตรวจจับความผิดปกติได้แบบเรียลไทม์ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดอุณหภูมิสายเคเบิลหลักแบบเรียลไทม์

2.2 การวิเคราะห์ก Cooling Time ของสายเคเบิลหลัก

ในการวิเคราะห์ Cooling Time (เวลาการระบายความร้อน) ของสายเคเบิลหลักเพื่อการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ สามารถดำเนินการตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

1. การถ่ายเทความร้อน การระบายความร้อนของสายเคเบิลหลักสามารถวิเคราะห์โดยใช้ Newton's Law of Cooling

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_{\infty}) \quad (1)$$

2. การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้นจะให้ผลลัพธ์เป็น

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{-kt} \quad (2)$$

3. การหาค่า Cooling Time (T_c) Cooling Time ถูกกำหนดให้เป็นเวลาที่อุณหภูมิของสายเคเบิลหลักลดลงถึงค่าปลอดภัยที่กำหนด T_s

$$T_s = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt_c}$$

แก้สมการเพื่อ t_c

$$t_c = -\frac{1}{k}\ln\left(\frac{T_f - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}}\right) \quad (3)$$

โดยที่

T_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นของสายเคเบิลหลัก (หลังโหลดลดลง)

T_{∞} คืออุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature)

T_f คืออุณหภูมิสุดท้ายของสายเคเบิลหลักต้องการวิเคราะห์

t_c คือเวลาในการลดอุณหภูมิของสายเคเบิลหลักจาก T_0 ไป T_f (นาทีหรือ ชั่วโมง)

k คือค่าคงที่ของการถ่ายเทความร้อน (Cooling Rate Constant) (1/นาที หรือ 1/ชั่วโมง)

4. Polynomial Regression (กำลัง 3) หรือ Cubic Polynomial Regression เป็นการสร้างสมการพหุนามดีกรี 3 เพื่อนำไปใช้ในการพยากรณ์ข้อมูล สมการ

$$y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (4)$$

3. การวิเคราะห์

การศึกษานี้วิเคราะห์ การลดอุณหภูมิสายเคเบิลหลัก ชนิดสาย CV (XLPE) ขนาด 240 mm² ทองแดง ความยาว 600 เมตร (ไป-กลับ) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดง (k)	401	W/m.K
อุณหภูมิแวดล้อม (T_{∞})	30	°C
อุณหภูมิเป้าหมาย (T_f)	20	°C
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h)	2	W/m².K
ความยาวสายเคเบิลหลัก(L)	600	m
ความหนาแน่นของทองแดง (ρ)	8960	kg/m³
ความจุความร้อนจำเพาะของทองแดง (c)	385	J/kg.K
เส้นผ่านศูนย์กลางสายเคเบิลหลัก(d)	0.0356	m
มวลของสายเคเบิลหลัก	1344	kg
พื้นที่ผิวของสายเคเบิลหลัก	67.15	m²
ค่า UA-value	134.3	W/K
เวลาครึ่งชีวิตการลดอุณหภูมิ	44.5	นาที

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณ Cooling Time และผลกระทบอื่น ๆ

ณหภูมิเริ่มต้น (To)	เวลาที่ใช้ (นาที)	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง: นาที)	อัตราการลดอุณหภูมิ (°C/นาที)	ความร้อนที่ถ่ายเท (MJ)	กำลังความร้อนเฉลี่ย (W)
21-23°C	14.13	0:01	0.14	1.03	1232.00
24-26°C	38.43	0:03	0.13	2.59	1127.00
27-29°C	67.23	0:05	0.12	4.14	1029.33
30-32°C	101.43	0:07	0.11	5.69	938.00
33-35°C	142.10	0:10	0.10	7.24	851.33
36-38°C	190.23	0:13	0.09	8.80	772.33
39-40°C	236.55	0:16	0.08	10.09	711.50



รูปที่ 3 การใช้เวลาในการลดอุณหภูมิเป็น 20 °C

จากกราฟรูปที่ 3 พบว่าที่อุณหภูมิ 25°C ใช้เวลา 20 นาที, 30°C ใช้เวลา 60 นาที, 35°C ใช้เวลา 150 นาที และ 40°C เกิน 250 นาที กราฟแสดงแนวโน้ม เอ็กซ์โปเนนเชียล เมื่อ เกิน 35°C เวลาระบายความร้อนเพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้า ควรมีการระบายอากาศที่ดี หรือใช้สายไฟที่รองรับอุณหภูมิสูง



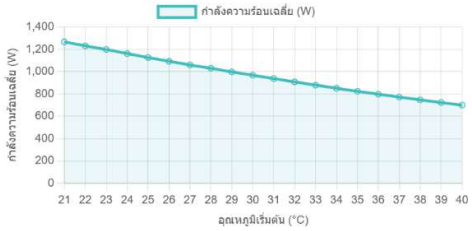
รูปที่ 4 อัตราการลดอุณภูมิ

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่าอัตราการลดอุณหภูมิ (°C/นาที) มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอุณหภูมิเฉลี่ย โดยลดลงจาก 0.15°C/นาที ที่ 21°C เหลือ 0.08°C/นาที ที่ 40°C แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นลดลงในสภาพแวดล้อมที่ร้อนขึ้น ตามหลักการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยลง



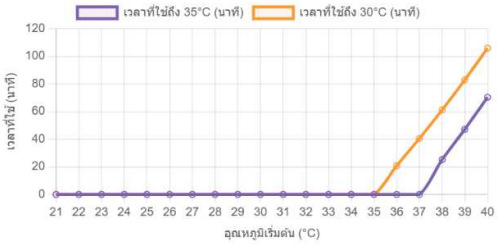
รูปที่ 5 การถ่ายเทความร้อน

จากกราฟในรูปที่ 5 พบว่าความร้อนที่ถ่ายเท (MJ) ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ย (°C) สูงขึ้นจาก 21°C ถึง 40°C ความสัมพันธ์ดูเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล โดยการถ่ายเทความร้อนเร่งตัวเร็วขึ้นที่อุณหภูมิสูง ที่ 21°C การถ่ายเทความร้อนมีน้อยมาก (ต่ำกว่า 1 MJ) แต่เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 10 MJ ที่ 40°C



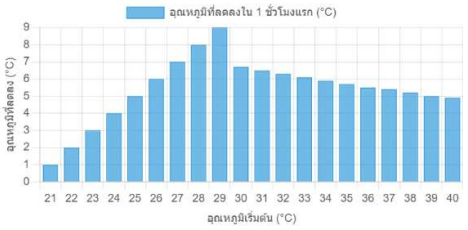
รูปที่ 6 กำลังความร้อนเฉลี่ย

จากกราฟรูปที่ 6 พบว่ากำลังความร้อนเฉลี่ย (W) ที่ลดลงแบบเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น กำลังลดลงจากประมาณ 1,300W ที่ 21°C เหลือประมาณ 650W ที่ 40°C บ่งชี้ว่าประสิทธิภาพลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



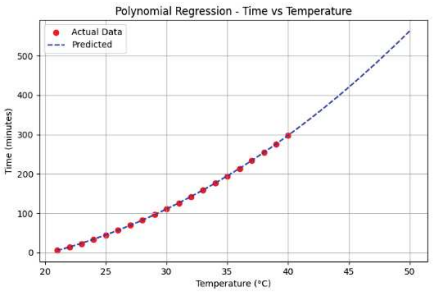
รูปที่ 7 เวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิเริ่มต้นให้ถึง 30°C และ 35°C ตามช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นต่าง ๆ

จากกราฟรูปที่ 7 พบว่าเวลาที่ใช้ถึง x°C (นาที) สำหรับสองอุณหภูมิ - 35°C (สีม่วง) และ 30°C (สีส้ม) ทั้งสองเส้นอยู่ใกล้ศูนย์จนถึงประมาณ 36-37°C จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แสดงถึงจุดเปลี่ยนที่เวลาในการทำความเย็นเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมสูงกว่าอุณหภูมิเป้าหมาย



รูปที่ 8 อุณหภูมิที่ลดลงใน 1 ชั่วโมงตามช่วงอุณหภูมิเริ่มต้นต่าง ๆ

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่าอุณหภูมิที่ลดลงใน 1 ชั่วโมงแรก (°C) ประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดที่ประมาณ 29°C (ลดลงประมาณ 9°C) และค่อย ๆ ลดลงทั้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่า เป็นรูปโค้งระฆังที่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นที่เหมาะสมที่สุดในช่วงกลาง



รูปที่ 9 Polynomial Regression Curve

จากกราฟรูปที่ 9 พบว่าเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นสูงขึ้น แสดงถึงอัตราเร่งที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โมเดลมีความแม่นยำสูงใกล้ 100% ชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้พยากรณ์อุณหภูมิในอนาคตได้อย่างแม่นยำ และสะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์และ IoT ได้เป็นอย่างดีว่ามีความแม่นยำสูง

4. ผลการศึกษา

การศึกษานี้วิเคราะห์การระบายความร้อนของสายเคเบิลหลักในอุณหภูมิแวดล้อมที่ต่างกัน พบว่าการลดอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 36-37°C อัตราการลดอุณหภูมิจะสูงที่อุณหภูมิ 21°C เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในระดับอุณหภูมิที่ต่ำช่วยให้กระบวนการนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ จุดเปลี่ยนที่ 36-37°C เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 36-37°C การระบายความร้อนจะช้าลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานของวัสดุในสายเคเบิลเพิ่มขึ้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนช้าลงตามกฎของนวัตกรรมเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิสูง อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่อการสูญเสียพลังงาน การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ความต้านทานในสายเคเบิลสูงขึ้น ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานมากขึ้น โดยเฉพาะใน Phase B ที่มีอุณหภูมิสูงสุด

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้วิเคราะห์อัตราการลดลงของอุณหภูมิในช่วง 21-40°C โดยพบว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิเป็นไปในลักษณะ Exponential Decay และอัตราการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเริ่มต้น จากการทดลอง อัตราการลดลงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.12°C/นาที และพลังงานที่ถ่ายเทเพิ่มขึ้นจาก 1.03 MJ ที่ 21-23°C เป็น 10.09 MJ ที่ 39-40°C ผลลัพธ์นี้สามารถนำไปใช้ในงานออกแบบระบบระบายความร้อนหรือการพยากรณ์พฤติกรรมความร้อนของวัสดุได้ ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือการทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิและความดันคงที่ ซึ่งอาจมีผลต่อการนำไปใช้จริง ในอนาคต ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบของความชื้นและการไหลของอากาศ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Neher, J. H., & McGrath, M. H. (1988). The calculation of the temperature rise and heat dissipation in electrical cables. IEEE Transactions on Power Delivery, 3(3), 932-939. https://doi.org/10.1109/61.106794

[2] Mak, T. B., Zhang, L. R., & Silva, S. R. P. (2002). Study of cable insulation and heating performance for high-voltage power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 17(4), 1108-1115. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.804520

[3] IEEE Power and Energy Society. (2007). IEEE Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations (IEEE Std 525-2007). IEEE.



สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยรังสิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจงานวิจัยด้านนวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ และเทคโนโลยี



สันติ การีสันต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต และระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจงานวิจัยด้านการจัดการพลังงาน และเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาและออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก ผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

Development and Design of a Small-Scale Generator By Buck-Boost Converter Controller

ภุชงค์ จันทร์จิระ[1] ณัฐนันท์ บางจั่น[2] สวรุจ คำสุจริต[3] และโอภาส สุขหวาน[4*]
[124*]ภาควิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
114 ซอยสุขุมวิท23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10110 โทรศัพท์ 0-9196-4-5969 E-mail: Dr.puchong.chan@gmail.com
[3*]โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฝ่ายมัธยม176 ซอยสุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์เพื่อทำการทดสอบและหาประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กควบคุมด้วยบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่ออัตราการไหลของน้ำ โดยการออกแบบระบบการทำงาน เพื่อเปรียบเทียบแรงดัน Vin และ Vout กับ ร่วมกับอัตราการไหลของน้ำ ที่มีผลต่อการเก็บประจุแบตเตอรี่ พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่ 500 L/hour ขึ้นไปทำให้ตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์เริ่มทำงานเพิ่มแรงดันไฟฟ้าได้และเมื่อควบคุมอัตราการไหลของแรงดันน้ำที่ พบว่าแรงดันน้ำที่ 500 L/hour และไม่เกิน 2700 L/hour ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กควบคุมด้วยบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 13.83 V

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก, บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์, อัตราการไหลของน้ำ

Abstract

This research aims to develop and design a small hydropower generator system controlled by a buck-boost converter to evaluate its performance in relation to water flow rates. The system was designed to compare input voltage (Vin) and output voltage (Vout) alongside water flow rates, examining their effects on battery charging. The results indicate that when the water flow rate reaches 500 L/hour or higher, the buck-boost converter begins to operate and increase the voltage. Furthermore, when controlling the water flow rate, it was found that within the range of 500 L/hour to 2700 L/hour, the small hydropower generator system with the buck-boost converter can regulate the output voltage at 13.83 V.

Key words: Small Hydropower Generator, Buck-Boost Converter, Water Flow Rate,

1. บทนำ

การพัฒนาและประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนในปัจจุบันไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือในการลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม แต่ยังมีบทบาทสำคัญในด้านเศรษฐกิจและความมั่นคงทางพลังงาน โดยเฉพาะในประเทศไทยที่มีการสนับสนุนจากรัฐบาลและการลงทุนในเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มการใช้พลังงานสะอาด [1]

พลังงานน้ำเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่อง และกระบวนการแปลงพลังงานน้ำเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีประสิทธิภาพและความเสถียรสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานรูปแบบอื่น [2]

การนำระบบน้ำที่ใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน ตัวอย่างหนึ่งคือการผสมผสานระบบเลี้ยงสัตว์น้ำที่ใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน (Recirculating Aquaculture System: RAS) เข้ากับการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำในระบบปิด โดยน้ำที่หมุนเวียนในระบบนี้สามารถนำไปใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก เช่น กังหันน้ำ หรือระบบไฮโดรไมโครเทอร์ไบน์ (Hydromicro Turbine) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [3] ในระบบดังกล่าว น้ำที่ถูกหมุนเวียนผ่านปั๊มน้ำมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ ขณะที่พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องกรองชีวภาพและระบบควบคุมอุณหภูมิ ช่วยลดการใช้พลังงานจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกและเพิ่มความยั่งยืนในระบบการผลิตพลังงานและการเลี้ยงสัตว์น้ำ Lekang, 2013 การผลิตไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กยังมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร อาทิ ระบบน้ำวนในบ่อเลี้ยงปลา หรือระบบกรองน้ำในสระว่ายน้ำ ยังคงประสบปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ไม่คงที่อันเนื่องมาจากความแปรปรวนของการไหลของน้ำ

บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) เป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) ซึ่งมีความสามารถในการปรับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้มีค่าที่สูงกว่าหรือต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าขา

เข้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยความยืดหยุ่นของการปรับแรงดันไฟฟ้าดังกล่าว จึงเหมาะสมสำหรับการใช้งานในระบบที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีความไม่คงที่ วงจรนี้ทำงานโดยใช้หลักการสลับสถานะของสวิตช์เพื่อควบคุมการส่งผ่านพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ พร้อมทั้งกำหนดหน้าที่การทำงาน (Duty Cycle) เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม [4] เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การนำตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ มาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำขนาดเล็กจึงเป็นแนวทางที่สำคัญ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าประเภทนี้สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมทั้งในลักษณะการเพิ่มและลดแรงดัน ทำให้ระบบมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ลดความเสียหายจากแรงดันที่ไม่คงที่ และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า สำนักงานพลังงานแห่งชาติ,2565 จากหลักการและปัญหาดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญของการใช้พลังงานทดแทนในด้านของพลังงานน้ำที่นำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานน้ำอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของน้ำในรูปแบบของการสร้างพลังงานศักย์ ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและหาประสิทธิภาพแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อออกแบบและสร้างชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุม บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่ออัตราการไหลของน้ำและ เพื่อวิเคราะห์แนวทางนำไปพัฒนาและต่อยอดในด้านต่าง ๆ เช่น นำไปติดตั้งในระบบกรองน้ำวน ในสระว่ายน้ำ ระบบกรองน้ำวนตู้ปลา หรือบ่อเลี้ยงปลาเนื่องจากมีการไหลวนของน้ำตลอดเวลา

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ

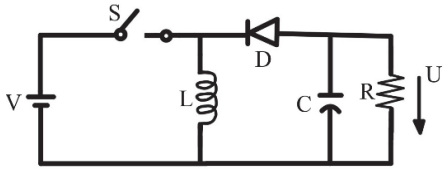
โมดูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก (Water Flow Generator Turbine) แรงดัน 1 V – 80 V 10W 220mA ขนาด 1/2 นิ้ว ซึ่งมีคุณลักษณะ แปลงพลังงานศักย์ของน้ำเป็นพลังงานกลพลังงานไฟฟ้า [5]



รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

2.2 บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

บัคบูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) เป็นวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) ที่สามารถปรับแรงดันขาออกให้สูงกว่า หรือต่ำกว่าแรงดันขาเข้าได้ โดยขึ้นอยู่กับค่าของ duty cycle ในการควบคุมสวิตช์ภายในวงจร โดยมีโครงสร้างของบัคบูสต์คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยสวิตช์ (มักใช้ MOSFET หรือ IGBT) [6], ไดโอด, ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) และตัวเก็บประจุ(Capacitor) โดยมีหลักการทำงาน 1. โหมดบัค (Buck Mode) หาก duty cycle น้อยกว่า 50% แรงดันขาออกจะต่ำกว่าแรงดันขาเข้า 2. โหมดบูสต์ (Boost Mode) หาก duty cycle มากกว่า 50% แรงดันขาออกจะสูงกว่าแรงดันขาเข้า



รูปที่ 2 แผนผังวงจรของบัคบูสต์คอนเวอร์เตอร์

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ESP 32 [7] NodeMCU ESP-WROOM-32 Wi-Fi and Bluetooth Dual Core (CH9102X) ซึ่งเป็นโมดูล Wifi ESP-32 รุ่น ESP-WROOM-32 โมดูล Wifi + Bluetooth 4.2 + Touch/Temp Sensor ทำงานแบบ Dual Core ที่ความเร็ว 160Mhz มี SRAM 512K หน่วยความจำ Flash สำหรับอัพโหลดโปรแกรมขนาด 16M



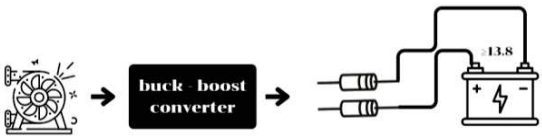
รูปที่ 3 บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ESP 32

2.4 วิธีดำเนินการ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาทำการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บประจุแบตเตอรี่ด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ และแบ่งวิธีการดำเนินการงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

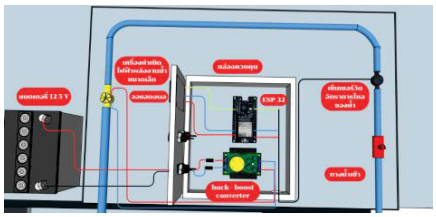
1. ออกแบบและสร้างชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

1.1 ไดอะแกรมควบคุมการทำงานของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3 ไดอะแกรมควบคุมการทำงานของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

1.2 ออกแบบการทำงานของระบบการเก็บประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 การทำงานของระบบการเก็บประจุแบตเตอรี่ด้วยชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

1.3 ออกแบบระบบควบคุมเซ็นเซอร์อัตราการไหลของน้ำโดยใช้โปรแกรมจากบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ESP32 ออกแบบและทดลองเขียนโปรแกรม การทำงานเซนเซอร์การไหลของน้ำและการแสดงผลขึ้นจอ LCD ของอัตราไหลของน้ำที่ผ่านระบบโดยใช้โปรแกรมจากบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ESP32 ควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์

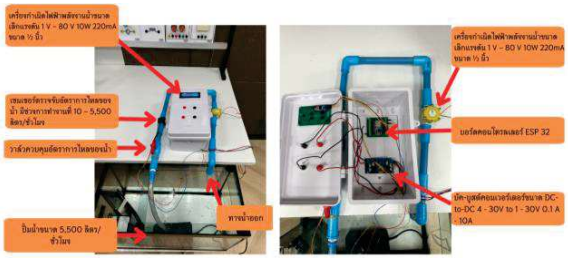
2. หาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กผ่านตัวควบคุม บัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่ออัตราการไหลของน้ำ

2.1 การทดสอบและหาประสิทธิภาพ

วิธีการทดสอบและหาประสิทธิภาพการทำงานระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้าของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ต่ออัตราการไหลของน้ำ โดยใช้วาล์วคอนโทลควบคุมการไหลของน้ำเพื่อให้ได้ระดับอัตราการไหลของน้ำตั้งแต่ 300 L/hour ถึง 3,100 L/hour สามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่ 5 – 30 V โดยการตั้งค่า Vout ที่ตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ไว้ที่ 13.8 V

2.5 ผลการทดลอง

1. ผลการสร้างชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่5 ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสคอนเวอร์เตอร์

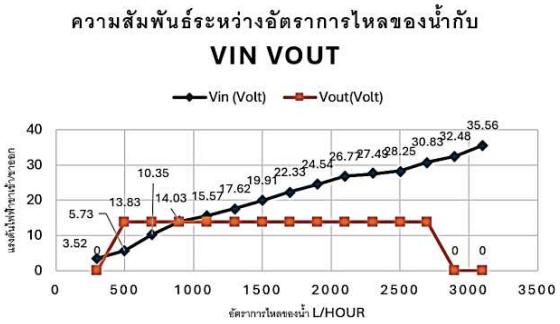
2. ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

2.1 ผลการทดสอบและหาประสิทธิภาพ



รูปที่6 อัตราการไหลของน้ำ Vout = 13.83 V

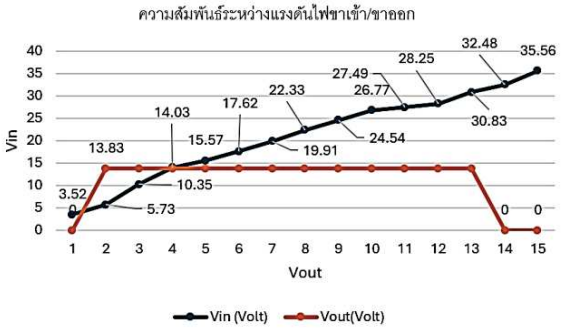
กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราไหลของน้ำกับแรงดันไฟฟ้าขาออกจากวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



จากกราฟที่ 1 จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำที่ 500 L/hour ขึ้นไปบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์เริ่มทำงาน เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขาเข้าให้

แรงดันไฟฟ้าขาออกได้ 13.8 V ในช่วงอัตราการไหลที่500 L/hour และลดแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ 13.8 V ในช่วงอัตราไหลที่ 900 – 2,600 L/hour

กราฟที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออกวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์



จากกราฟที่ 2 จะสังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มถึงระดับที่วงจรบัค-บูสต์ คอนเวอร์เตอร์ทำงานจนถึงจุดสูงสุดที่ 30 V เห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีความคงที่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ที่ 13.8 V

3. สรุป

จากผลการวิจัยเรื่องการพัฒนาและออกแบบชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ร่วมกับบอร์ดคอนโทรลเลอร์ ESP 32 เพื่อแปรผลเซ็นเซอร์ วัดอัตราการไหลของน้ำสรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำแปรผันตรงกับการผลิตไฟฟ้าจากชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์โดยที่ถ้านำเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กมาต่อใช้งานโดยไม่ผ่านการควบคุมด้วยตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์จำเป็นต้องใช้แรงดันน้ำที่สูงแต่ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้นำตัวควบคุมบัค-บูสคอนเวอร์เตอร์เข้ามาติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการเก็บประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 V 5 Ah พบว่าแรงดันน้ำที่ 500 L/hour และไม่เกิน 2700 L/hour จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า Vout อยู่ที่ 13.83 Vสามารถเก็บประจุแบตเตอรี่ได้ โดยจะใช้เวลาในการประจุแบตเตอรี่ขนาด 12 V 5 Ah ให้เต็มใช้เวลาอยู่ที่ 23 ชั่วโมง 21 นาที

4. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะศึกษาศาสตร์ท่านอาจารย์ภาควิชาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่าน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเศราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภุชงค์ จันทร์จิระ ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ แนวคิด แนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำโครงงานและตรวจสอบข้อบกพร้องต่าง ๆ ในโครงงานการออกแบบแบบและสร้างโมเดลชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็กผ่านตัวควบคุมบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์

เอกสารอ้างอิง

[1] สุชาติ คุมนิล. (2565). การพัฒนาระบบปั๊มน้ำด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อัตโนมัติ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, 7(2), 75-85. จาก https://shorturl.asia/ZhRPm

[2] สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย. (2567). พลังงานน้ำ: ศักยภาพและความยั่งยืนของพลังงานทดแทนในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย.

[3] Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2013,2015). Engineering Aspects of Recirculating Aquaculture Systems. Ithaca Publishing Company.

[4] Mohan, N.Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2002). Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley.

[5] อาหมัด เวบื่อราสมมูสำนัดคอยรี หะซีบากากาและอีลีหยะ สนิโซ. (2564), การจำลองลักษณะการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำผลิตกระแสไสไฟฟ้าขนาดจิ๋วแบบดาปาน. งานประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเครือข่ายใต้ ครั้งที่ 6 : 761 – 763

[6] วินัยแสงจันทร์. (2560). เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก. สืบค้นเมื่อ 15 มกราคม 2568, จาก http://dspace.spu.ac.th/handle/123456789/4767

[7] ธนพล แก้วคำแจ้ง, ธีรพงษ์ จันตะเสน, สุพรรณ ประทุมชัย, วกร สีสัมฤทธิ์, แล วิทยา บุตรโยธี. (2566). การประยุกต์ใช้อินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่งสร้างหุ่นยนต์ พื้นฐานที่ควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้สัญญาณบูลทูธเพื่อศึกษาและนำไปใช้งานในการสอน. วารสารวิจัยและนวัตกรรมและการวิจัยอาชีวศึกษา, สถาบันอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1, ปีที่ 7, (1), หน้า. 36-45.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

Lithium-ion Battery State of Charge Estimation

ทนุสินธุ์ ลาลู่[1] บูรพา จำรัส[1] พงศภัค บุตรไฉยา[1] กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[2] ประหยัด กองสุข[1] และวัชรากร ปิ่นธุรัตน์[1*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
E-mail: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge, SoC) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เหลืออยู่เมื่อเทียบกับความจุรวมของแบตเตอรี่ สถานะประจุแบตเตอรี่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบพลังงาน (Energy System) การประเมินค่าสถานะประจุแบตเตอรี่อย่างแม่นยำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการประมาณค่าสถานะประจุแบตเตอรี่ 2 วิธี คือ 1) วิธี Open Circuit Voltage (OCV) และ 2) วิธี Coulomb Counting (CC) โดยวิธีแรกใช้การวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ในสถานะที่ไม่มีโหลด โดยมีค่าแรงดันที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสถานะประจุแบตเตอรี่ ส่วนวิธี CC สามารถคำนวณจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าและไหลออกจากแบตเตอรี่แบบต่อเนื่อง วิธี OCV มีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาที่ต้องรอให้แรงดันไฟฟ้าคงที่ ขณะที่วิธี CC มีปัญหาความคลาดเคลื่อนสะสมเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน ดังนั้น การรวมสองวิธีนี้สามารถลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าสถานะประจุแบตเตอรี่ โดยทั้งสองวิธีนี้ใช้ถูกทดสอบการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีนี้สามารถประมาณระดับพลังงานที่เหลืออยู่ได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวงจรสำเร็จรูปในโปรแกรม MATLAB/Simulink เมื่อทำการชาร์จและคายประจุของแบตเตอรี่

คำสำคัญ: ประมาณค่าสถานะประจุ, แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด, ระบบจัดการแบตเตอรี่, ระบบกักเก็บพลังงาน

Abstract

This article presents a method for estimating the state of sharge (SoC) of a battery, which indicates the remaining energy relative to total capacity. Accurate SoC estimation enhances energy management efficiency and prolongs battery lifespan. This study employs two methods: i) Open Circuit Voltage (OCV) and ii) Coulomb Counting (CC). The OCV method measures voltage in a no-load condition, while the CC method calculates SoC based on current flow. However, OCV requires a stabilization period, and CC accumulates errors over time. By combining both methods, accuracy is improved. MATLAB/Simulink simulations confirm the proposed approach effectively estimates remaining energy, reducing risks of over-discharge and optimizing battery management system (BMS) performance.

Keywords: State of charge estimation, open circuit voltage, coulomb counting, battery management system, energy storage system

1. บทนำ

แบตเตอรี่เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบพลังงานยุคใหม่ ตั้งแต่อุปกรณ์พกพา เช่น สมาร์ทโฟน ไปจนถึงยานพาหนะไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System, ESS) ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการแบตเตอรี่ให้มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานยาวนานจำเป็นต้องอาศัยการติดตามและประเมินสถานะประจุ (State of Charge, SoC) อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะในระบบที่ต้องรองรับพลังงานหมุนเวียนและการทำงานร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้า [1] ซึ่งมีความผันผวนของโหลดและแหล่งจ่ายไฟฟ้า การทราบค่าสถานะประจุแบบเรียลไทม์เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจัดการพลังงาน ลดการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และป้องกันความเสียหายจากการใช้งานที่เกินขีดจำกัด วิธีการประมาณค่าสถานะประจุควรมีความแม่นยำสูง มีความซับซ้อนต่ำ และสามารถให้ผลลัพธ์ได้ใกล้เคียงเวลาจริง ซึ่งช่วยให้สามารถกำหนดช่วงการใช้งานที่เหมาะสม เช่น การจำกัดช่วงการใช้งานระหว่าง 20% ถึง 80% เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2, 3]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและปรับปรุงวิธีการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตให้มีความแม่นยำสูงขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแบตเตอรี่ ลดอัตราการเสื่อมสภาพ และเพิ่มความปลอดภัยของระบบ นอกจากนี้การประเมินสถานะประจุแบตเตอรี่ที่แม่นยำยังช่วยให้สามารถวางแผนการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การควบคุมการจ่ายพลังงานให้เหมาะสมกับโหลด การปรับลดการใช้พลังงานเมื่อแบตเตอรี่

เหลือน้อย และการวางแผนการชาร์จล่วงหน้า ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) จะใช้ค่าประมาณสถานะประจุแบตเตอรี่ในการควบคุมกระบวนการชาร์จและคายประจุ รวมถึงการตรวจจับความผิดปกติ เพื่อให้แบตเตอรี่ทำงานได้อย่างเสถียรและสามารถรองรับการใช้งานในระบบพลังงานของยานพาหนะไฟฟ้าหรือโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-ion Battery)

แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นแหล่งพลังงานที่นิยมใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ยานพาหนะไฟฟ้า และระบบกักเก็บพลังงาน เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง อายุการใช้งานยาวนาน และมีอัตราการคายประจุเองต่ำ หลักการทำงานของแบตเตอรี่ชนิดนี้อาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนลิเธียมระหว่างขั้วบวกหรือแคโทด (Cathode) และขั้วลบหรือแอโนด (Anode) ผ่านอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyzer) ระหว่างกระบวนการชาร์จและคายประจุ การสร้างแบบจำลองของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน โดยแบบจำลองสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น แบบจำลองสมการไฟฟ้าเทียบเท่า (Equivalent Circuit Model) ซึ่งใช้วงจรไฟฟ้าแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่ และแบบจำลองเชิงกายภาพ (Physics-Based Model) ที่คำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีและกระบวนการภายในเซลล์ การพัฒนาแบบจำลองที่แม่นยำช่วยให้สามารถคาดการณ์สถานะของแบตเตอรี่ได้ดีขึ้น และปรับปรุงระบบจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้แบบจำลองสมการไฟฟ้าเทียบเท่าในการทดสอบ [4, 5]

2.2 การประมาณค่าสถานะประจุ (State of Charge Estimation)

ตารางที่ 1 นำเสนอวิธีการประเมินสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่ โดยเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี วิธีที่กล่าวถึงได้แก่ Open Circuit Voltage (OCV), Coulomb Counting (CC), การจำลองทางคณิตศาสตร์, การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมี และการใช้ปัญญาประดิษฐ์ แต่ละวิธีมีระดับความแม่นยำ ข้อจำกัด และความซับซ้อนที่แตกต่างกัน เช่น OCV มีความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลานาน ส่วน AI สามารถพัฒนาความแม่นยำได้ดีแต่ต้องใช้ข้อมูลฝึกและพลังการคำนวณสูง ตารางที่ 1 ช่วยให้เข้าใจแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ในบริบทต่าง ๆ

2.2 วิธี Open Circuit Voltage (OCV)

การวัดสถานะประจุของแบตเตอรี่ด้วยวิธี OCV เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เนื่องจากอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและปริมาณประจุที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ แรงดัน OCV หมายถึงแรงดันของแบตเตอรี่ในสภาวะไม่มีโหลด (ไม่มีการจ่ายหรือรับพลังงาน) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยทั่วไป แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อสถานะประจุสูงขึ้น และลดลงเมื่อสถานะประจุลดลง สมการพื้นฐานของ OCV-SoC คือ SoC = f(OCV) ซึ่ง f(OCV) เป็นฟังก์ชันที่ได้จากการทดสอบและการเทียบเคียงกับกราฟ SoC-OCV ของแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต หากค่าที่ต้องการอยู่ระหว่างสองค่าที่กำหนดในตาราง สามารถใช้วิธีคำนวณแบบอนุมาน (Interpolated Estimation) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมได้ดังนี้

$$\mathrm{SoC}(t_0) = \mathrm{SoC_L} + \frac{(\mathrm{V_B} - \mathrm{V_L})}{(\mathrm{V_H} - \mathrm{V_L})} \times (\mathrm{SoC_H} - \mathrm{SoC_L}) \qquad (1)$$

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของการประมาณค่าสถานะประจุของแต่ละวิธี

วิธี	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธี Open Circuit Voltage (OCV)	มีความแม่นยำสูงเมื่อแบตเตอรี่อยู่ในสภาวะสมดุล	ใช้เวลานาน ไม่เหมาะสำหรับการวัดแบบเรียลไทม์
วิธี Coulomb Counting (CC)	ใช้งานได้ในแบบเรียลไทม์	มีข้อผิดพลาดสะสมจากการวัดกระแส
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	มีความแม่นยำสูง ลดข้อผิดพลาดสะสมได้	ซับซ้อน ต้องมีแบบจำลองที่ดี
วิธีวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ไฟฟ้าเคมี	วิเคราะห์ได้แม่นยำ	ต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทาง
วิธีปัญญาประดิษฐ์	สามารถพัฒนาความแม่นยำได้สูง	สามารถพัฒนาความแม่นยำได้สูง

2.3 วิธี Coulomb Counting (CC)

วิธี CC เป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมใช้ในการคำนวณสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยอาศัยหลักการวัดการไหลของกระแสไฟฟ้าเข้าและออกจากแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่อง วิธีนี้สามารถใช้งานได้จริงในวงจรไฟฟ้าโดยทำการตรวจวัดกระแสที่ไหลผ่านแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ หลักการของ CC [6] อ้างอิงจากกฎการอนุรักษ์ประจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐาน ดังนี้

$$\mathrm{SoC}(t) = \mathrm{SoC}(t_0) + \frac{\eta}{\mathrm{C_{nom}}} \int_{t_0}^{t} \mathrm{I_{bat}} dt \qquad (2)$$

โดยที่ $\mathrm{SoC}(t)$ คือ สถานะประจุของแบตเตอรี่ ณ เวลาปัจจุบัน $\mathrm{SoC}(t_0)$ คือ สถานะประจุ ณ เวลาเริ่มต้น $\mathrm{C_{nom}}$ คือ ความจุของแบตเตอรี่ (Ah) $\mathrm{I_{bat}}$ คือ กระแสที่ไหลเข้า (+) หรือไหลออก (-) จากแบตเตอรี่ (A) และ t_0 ถึง t ช่วงเวลาที่ทำการวัด

วิธีนี้คำนวณค่าสถานะประจุโดยสะสมปริมาณประจุที่ไหลเข้าและออกจากแบตเตอรี่ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยการอินทิเกรตค่ากระแสตามเวลา วิธี CC เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการ

คำนวณสถานะประจุแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการติดตามการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ตลอดเวลา

3. การออกแบบระบบประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่

3.1 โครงสร้างของระบบการประมาณสถานะประจุแบตเตอรี่

รูปที่ 1 แสดงวงจรแปลงพลังงานจากแบตเตอรี่ไปยังโหลด โดยใช้ตัวแปลง DC-DC แบบฟูลบริดจ์ควบคุมด้วย PWM วงจรประกอบด้วยแหล่งพลังงานแบตเตอรี่ V_B ที่เชื่อมต่อกับตัวเหนี่ยวนำ L_B และสวิตช์ MOSFET สองตัว S_1 และ S_2 ซึ่งทำงานสลับกันโดยสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมกระแส $I_{batt.}$ ที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ C_B และโหลด R_L ซึ่งอยู่ในฝั่งเอาต์พุต 48 VDC ส่วนล่างของภาพเป็นโครงสร้างการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI เพื่อลดข้อผิดพลาดระหว่างค่ากระแสอ้างอิง $I^*_{batt.}$ และค่าจริง $I_{batt.}$ จากนั้นสัญญาณที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวสร้างสัญญาณ PWM และสลับขั้วระหว่าง PWM1 และ PWM2 ด้วยเกต NOT เพื่อควบคุมการทำงานของสวิตช์ S_1 และ S_2 อย่างเหมาะสม

3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ในระบบประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ที่เกี่ยวข้องกับการแปลงพลังงานมีดังนี้ ความจุแบตเตอรี่ (E_{Batt}) คือ 9 Ah บอกถึงปริมาณประจุที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ในเวลา 1 ชั่วโมง, V_B คือ แรงดันของแบตเตอรี่ในสภาวะปกติ มีค่าเท่ากับ 12 V, V_H = 13.6 V คือ แรงดันสูงสุดเมื่อชาร์จเต็ม, V_L = 10 V คือ แรงดันต่ำสุด, SoC_H = 100% เป็นระดับพลังงานสูงสุดในแบตเตอรี่ และ SoC_L = 0% เป็นระดับต่ำสุดที่ในบทความนี้ ความถี่สวิตชิ่ง (Switching Frequency) มีค่าเท่ากับ 10 kHz และ V_L = 48 V คือ แรงดันที่ต้องการสำหรับโหลดระบบ จากรูปที่ 1 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมกระแสแบตเตอรี่โดยใช้ PWM และตัวควบคุมเพื่อลดข้อผิดพลาดของกระแสที่ใช้จริงเมื่อเทียบกับค่ากระแสที่กำหนด

จากรูปที่ 1 ค่า I_{batt} สามารถควบคุมและออกแบบได้ ดังนี้

$$I^*_{batt\,d} = (48 - V_{Load}) \times \left(kp + \frac{ki}{s}\right), \quad (3)$$

$$I^*_{batt\,c} = (13.28 - V_B) \times \left(kp + \frac{ki}{s}\right), \quad (4)$$

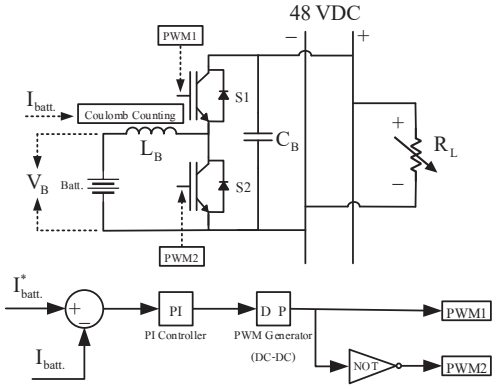
โดยที่ $I^*_{batt\,d}$ และ $I^*_{batt\,c}$ คือ กระแสสำหรับการคายและการชาร์จประจุตามลำดับ โดยระดับแรงดันขาออก 48 V และแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ 12 V ซึ่งเป็นระดับแรงดันกระแสตรงที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

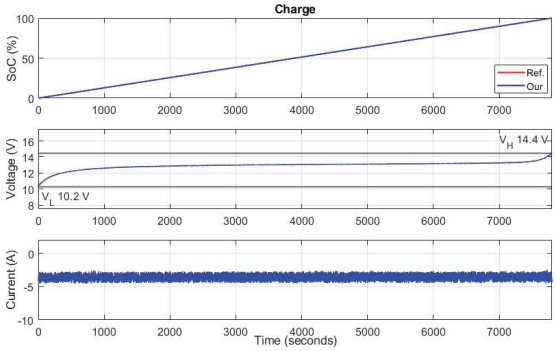
การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบการชาร์จประจุ (Charging Test) และคายประจุ (Discharging Test) โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง (Our) กับผลลัพธ์ที่ได้จากโมเดลของ MATLAB/Simulink (Ref.)

จากรูปที่ 2 แสดงการชาร์จประจุด้วยกระแสคงที่ จะเห็นได้ว่าค่าประจุมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากประมาณ 0% จนถึง 100% ในช่วงเวลาประมาณ 7800 วินาที โดยแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ประมาณ 10.2 V และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปจนถึงประมาณ 14.4 V ขณะเดียวกัน กระแสไฟฟ้าค่อนข้างคงที่และมีความผันผวนเพียงเล็กน้อย สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการชาร์จที่มีความเสถียรและมีการควบคุมอย่างเหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอ้างอิง (Ref.) แล้วมีแนวโน้มการตอบสนองต่อการชาร์จประจุเหมือนกัน กำหนดให้การชาร์จมีค่ากระแสเป็นลบ

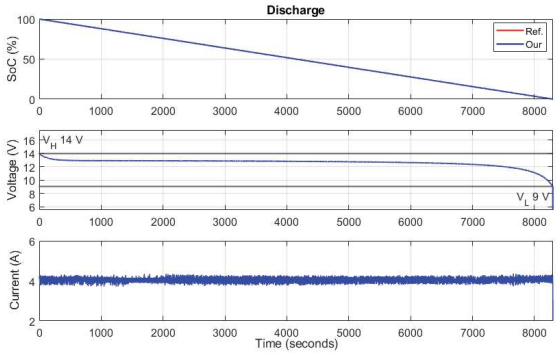
ในรูปที่ 3 แสดงการคายประจุด้วยกระแสคงที่ การคายประจุลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 100% ลงมาจนใกล้ 0% ในเวลาประมาณ 8300 วินาที แรงดันไฟฟ้าลดลงจากประมาณ 14 V จนถึงประมาณ 9 V ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยสำหรับการทำงานของแบตเตอรี่ ขณะที่กระแสไฟฟ้าคงที่ในระดับที่มีความผันผวนไม่มากนัก สะท้อนให้เห็นถึงการจ่ายพลังงานอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับวิธีอ้างอิงแล้ว (Ref.) มีแนวการตอบสนองคล้ายกัน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ผู้วิจัยทำการศึกษา ผลการเปรียบเทียบระหว่างวิธีที่ผู้วิจัยนำเสนอกับค่าจากโมเดลใน MATLAB/Simulink มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.1%



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่

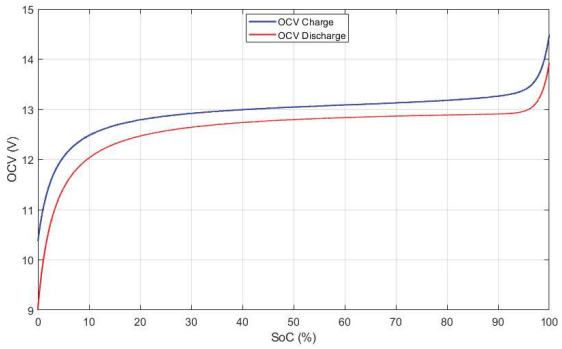


รูปที่ 2 สถานะประจุ (SoC) แรงดัน และกระแสของแบตตอรี่ ในขณะทำการชาร์จประจุ



รูปที่ 3 สถานะประจุ (SoC) แรงดัน และกระแสของแบตตอรี่ ในขณะทำการคายประจุ

รูปที่ 4 แสดงแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจร (Open Circuit Voltage, OCV) กับค่าสถานะประจุในขณะทำการชาร์จและคายประจุ จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน OCV กับระดับสถานะของประจุมีลักษณะเป็นเส้นโค้งสองเส้นที่แตกต่างกันระหว่างขณะชาร์จและขณะคายประจุ ซึ่งสะท้อนถึงปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซีส (hysteresis) ของแบตเตอรี่ โดยเมื่อสถานะประจุอยู่ในระดับต่ำ แรงดันไฟฟ้าทั้งสองกราฟมีค่าต่ำและมีความแตกต่างกันไม่มาก แต่เมื่อสถานะประจุเพิ่มขึ้นถึงระดับสูง ค่าแรงดัน OCV ในช่วงการชาร์จจะสูงกว่าช่วงการคายประจุอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมภายในของเคมีไฟฟ้าในเซลล์แบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของกระบวนการชาร์จ-คายประจุ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบหรือปรับเทียบโมเดลสำหรับการวัดและประเมินสถานะของประจุ รวมถึงการพัฒนาระบบจัดการแบตเตอรี่ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์และควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำยิ่งขึ้น



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน OCV กับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ ในขณะชาร์จและคายประจุ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนฟอสเฟตโดยใช้การผสมผสานระหว่าง 2 วิธี ได้แก่ 1) วิธี Open Circuit Voltage (OCV) และ 2) วิธี Coulomb Counting (CC) พร้อมทั้งออกแบบระบบควบคุมการชาร์จและคายประจุ ผลการทดลองพบว่า ในระหว่างกระบวนการชาร์จ สถานะประจุของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่แรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วยจนกระทั่งแบตเตอรี่ถูกชาร์จจนเต็ม ในทางกลับกัน ในกระบวนการคายประจุพบว่าสถานะประจุและแรงดันของแบตเตอรี่ลดลงอย่างต่อเนื่อง และเมื่อถึงเวลาประมาณ 8300 วินาที แบตเตอรี่จะคายประจุจนหมด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบตเตอรี่มีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับหลักการพื้นฐานของสถานะประจุ กระแส และแรงดัน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่อ้างอิง ซึ่งวิธีการที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ได้อย่างแม่นยำแบบเรียลไทม์ นอกจากนี้ การวิจัยนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับระบบพลังงานยุคใหม่ ในอนาคต คณะผู้วิจัยมีแผนที่จะพัฒนาและทดสอบฮาร์ดแวร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] M. U. Hassan, S. Saha, M. E. Haque, S. Islam, A. Mahmud, and N. Mendis, "A comprehensive review of battery state of charge estimation techniques," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 54, pp. 102801, 2022.

[2] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos, and J. K. Kaldellis, "Real-world study for the optimal charging of electric vehicles," Energy Reports, vol. 6, pp. 418-426, 2020.

[3] A. M. S. M. H. S. Attanayaka, J. P. Karunadasa, and K. T. M. U. Hemapala, "Estimation of state of charge for lithium-ion batteries—A review," AIMS Energy, vol. 7, no. 2, pp. 186-210, 2019.

[4] M. Einhorn, F. V. Conte, C. Kral, and J. Fleig, "A method for online capacity estimation of lithium-ion battery cells using the state of charge and the transferred charge, " IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 2, March/April 2012, pp. 736-741.

[5] F. Mohammadi, "Lithium-ion battery state-of-charge estimation based on an improved coulomb-counting algorithm and uncertainty evaluation," Journal of Energy Storage, vol. 48, pp. 104061, 2022.

[6] A. Manthopoulos and X. Wang, "A review and comparison of lithium-ion battery SoC estimation methods for electric vehicles," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020, pp. 2385-2392

การออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Design and Construction of Capacitor Control Cabinet for Power Factor Improvement

ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ* ชนสิษฎ์ เปลี่ยนจันทร์ และ อันวัร มัสอูดี
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: thanarat.t@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อทำการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในโรงงาน ซึ่งออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าจากพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าของโรงงานที่มีขนาด 200 kVA โดยการทำงานของตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 kVar จำนวน 6 ชุด สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบปรับค่าได้ตามผู้ปฏิบัติงาน

คำสำคัญ : ตู้ควบคุม, ตัวเก็บประจุไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Abstract

This research article studies the design and construction of a capacitor control cabinet to improve the power factor and increase the efficiency of electrical energy use in the electrical system in the factory. The design of the capacitor is based on the transformer rating of the factory which is 200 kVA. The operation of the control cabinet of the capacitor is 10 kVar, 6 sets. It can adjust the power factor value both automatically and by adjusting the value according to the operator.

Keywords : control cabinet, capacitor, power factor

1. บทนำ

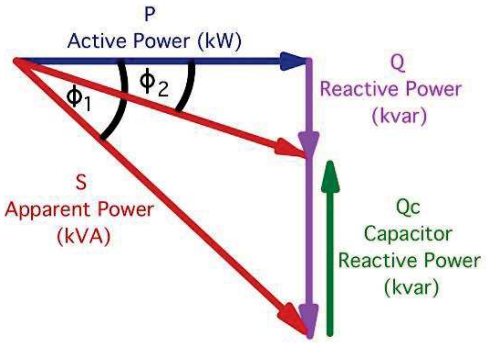
การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้ชีวิตปัจจุบัน ซึ่งแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากทุกปี ส่งผลให้ปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น [1-2] เพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการออกแบบและสร้างเทคโนโลยีนวัตกรรมระบบตรวจสอบพลังงานไฟฟ้า [3]

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า จะประกอบด้วยโหลดชนิดอินดักทีฟ ซึ่งดึงกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (kVar) ทำให้อัตราส่วนระหว่าง กำลังไฟฟ้าจริง (kW) ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA) ซึ่งทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor: PF) มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของการไฟฟ้า [4]

ดังนั้น เพื่อให้การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาการออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าขึ้น

2. การออกแบบการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า คือค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริง (P) หารด้วยกำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ (S) โดยตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) คือตัวเลขที่บอกถึงกำลังงานของไฟฟ้าที่ได้ใช้ประโยชน์ โดยค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่งดังรูปที่ 1 [5]

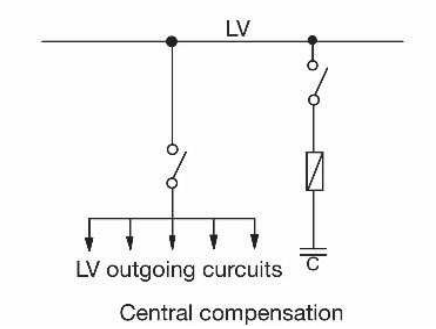


รูปที่ 1 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า (Power Triangle)

การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพราะการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) กำหนดว่าโรงงานอุตสาหกรรมหรือผู้ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง ต้องรักษาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า 0.85 หากต่ำกว่านี้ อาจมีค่าปรับตามอัตราที่กำหนด และมีผลทำให้ระบบการจ่ายไฟฟ้าที่มีคุณภาพต่ำไปด้วย เนื่องจากประโยชน์ที่จะได้รับจากกำลังไฟฟ้าจริงในระบบไฟฟ้าจะมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้การไฟฟ้าต้องเพิ่มขนาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายและอุปกรณ์ส่งไฟฟ้าให้สูงขึ้น เพื่อให้สามารถรองรับการใช้ปริมาณไฟฟ้าได้

3. การออกแบบการใช้งานตัวเก็บประจุไฟฟ้า

การออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของแผนผังไฟฟ้าเส้นเดี่ยว โดยออกแบบให้ตู้ควบคุมมีตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 kVar จำนวน 6 ชุด ให้สอดคล้องกับพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าของโรงงาน เพื่อให้สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบปรับค่าได้ตามผู้ปฏิบัติงาน ดังรูปที่ 2



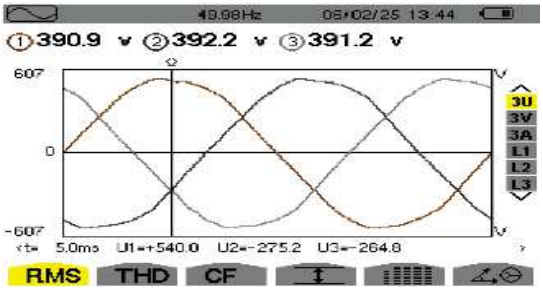
รูปที่ 2 แผนผังไฟฟ้าเส้นเดี่ยวของตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า

3.1 การวิเคราะห์โหลดไฟฟ้า

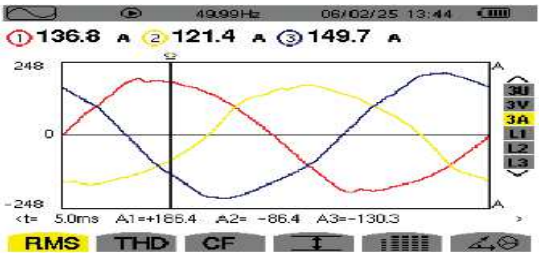
การวิเคราะห์โหลดไฟฟ้าของโรงงาน โดยการใช้เครื่องมือวัดบันทึกและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า (Chauvin Arnoux CA 8335 Power Quality Analyser, 1, 3-Phase, 6500 A, 1000 VAC/VDC) ดังรูปที่ 3 เพื่อวิเคราะห์ค่าแรงดัน ค่ากระแส ค่าพลังงานไฟฟ้า และค่าฮาร์มอนิก (Harmonic) ดังรูปที่ 4-8 ตามลำดับ ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยการออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 kVar จำนวน 6 ชุด ซึ่งได้มีค่าเท่ากับ 30 % จากพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าของโรงงานที่มีขนาด 200 kVA



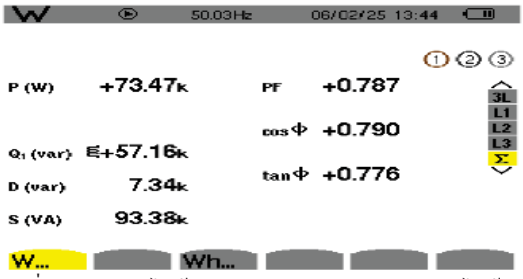
รูปที่ 3 เครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า



รูปที่ 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าก่อนปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 6 ค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

Channel	Color	Window MIN	Window AVG	Window MAX
U12 THDr		1.9 % r	2.3 % r	3 % r
U23 THDr		2.1 % r	2.6 % r	3.5 % r
U31 THDr		1.9 % r	2.5 % r	3.6 % r
U12 THDf		1.9 % f	2.3 % f	3 % f
U23 THDf		2.1 % f	2.6 % f	3.6 % f
U31 THDf		1.9 % f	2.5 % f	3.6 % f

รูปที่ 7 ค่าฮาร์มอนิก THDv

Channel	Color	Window MIN	Window AVG	Window MAX
A1 THDr		4.9 % r	9.7 % r	22.9 % r
A2 THDr		6.8 % r	13.7 % r	23.6 % r
A3 THDr		4.3 % r	8.6 % r	26.1 % r
A1 THDf		4.9 % f	9.8 % f	23.6 % f
A2 THDf		6.8 % f	13.9 % f	24.3 % f
A3 THDf		4.3 % f	8.7 % f	27.1 % f

รูปที่ 8 ค่าฮาร์มอนิก THDi

3.2 การออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า

การออกแบบและสร้างตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะมีอุปกรณ์ประกอบ ดังรูปที่ 8-9 ดังนี้

1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำหน้าที่หลักในการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (kVar) เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยการการวิเคราะห์โหลด ดังรูปที่ 5 โดยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของโรงงานจะอยู่ที่ 57.16 kVar ดังนั้นจะเลือกออกแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 kVar จำนวน 6 ชุด

2. สวิตช์ตัดไฟอัตโนมัติป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินพิกัด (MCCB :Molded Case Circuit Breaker) และฟิวส์ (Fuse) โดยคำนวณจากกระแสเกินและกระแสลัดวงจร จากสมการที่ 1-2 ตามลำดับ ดังนี้

- ขนาด MCCB

$$Ic = \frac{Qc \times 1{,}000}{V \times \text{Power Factor}} = \frac{60 \times 1{,}000}{400 \times 1} = 150\ A \qquad [1]$$

- ขนาด Fuse ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าจำนวน 6 ชุด

$$Ic = \frac{Qc \times 1{,}000}{V \times \text{Power Factor}} = \frac{10 \times 1{,}000}{400 \times 1} = 25\ A \qquad [2]$$



รูปที่ 9 อุปกรณ์หน้าตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า



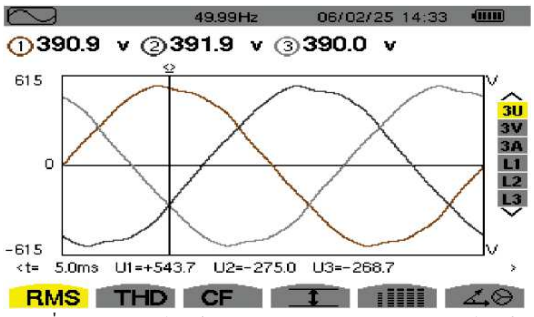
รูปที่ 10 อุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้า

3. ชุดควบคุมเพาเวอร์แฟคเตอร์คอนโทรล (Power Factor Controller) ใช้ในการควบคุมการตัดต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้เหมาะสมกับโหลดแบบอัตโนมัติ เพื่อปรับปรุงให้คุณภาพของระบบไฟฟ้าให้สูงขึ้น

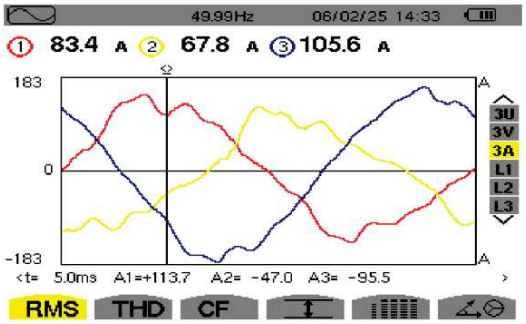
4. ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบการทำงานของตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าดังรูปที่ พบว่าค่าระดับแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 391.2 V และ 390 V ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่าระดับกระแสหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าลดลงเท่ากับ 105.6 A เมื่อเทียบกับก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 149.7 A ซึ่งหลังจากติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าภายในโรงงานให้สูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.938 เมื่อเทียบกับก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าเท่ากับ 0.787

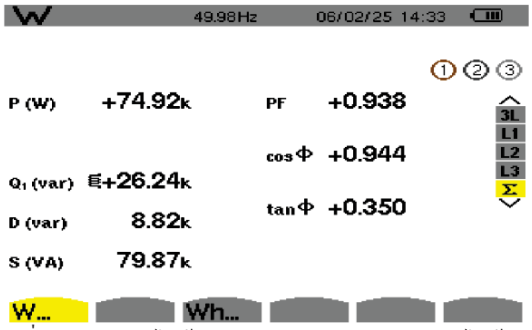
ผลการเปรียบเทียบการทำงานของตู้ควบคุมตัวเก็บประจุก่อนการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและหลังจากปรับค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าขนาด 10 kVar จำนวน 6 ชุด ซึ่งปรับเลือกได้ตั้งแต่ step 1-6 และการปรับค่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้ทำงานแบบอัตโนมัติ auto ดังรูปที่ 14



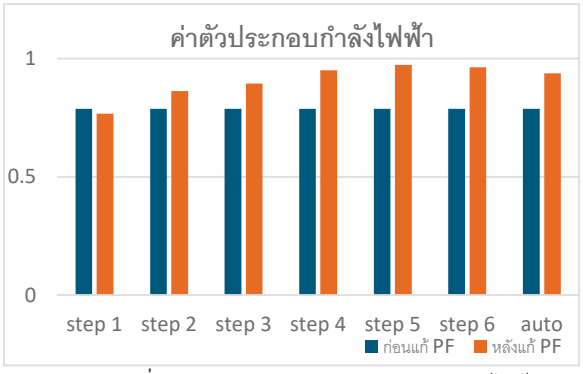
รูปที่ 11 ค่าแรงดันไฟฟ้าหลังปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 12 ค่ากระแสไฟฟ้าหลังปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 13 ค่าพลังงานไฟฟ้าหลังปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

5. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบติดตั้งตู้ควบคุมตัวเก็บประจุไฟฟ้าในโรงงาน พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในโรงงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบไฟฟ้ามีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ และค่าการใช้กระแสไฟฟ้าหลังการติดตั้งตัวเก็บประจุมีค่าลดลง รวมทั้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นทั้งแบบอัตโนมัติและแบบปรับค่าได้ตามผู้ปฏิบัติงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และบริษัท Power Quality Tech Co., Ltd.

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Parkpoom, and G. P. Harrison, “Analyzing the impact of climate change on future electricity demand in Thailand,” *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 23, pp. 1441-1448, August 2008.

[2] S. Khotmanee, and U. Pinsopon, “A study on biogas production potential in Thailand 2019,” in *IEEE 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST),* Pattaya, 2021, pp. 269-272.

[3] ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ. (2565). การออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบพลังงานไฟฟ้าผ่านโทรศัพท์มือถือ. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 14 (EENET2022).* โรงแรมฮิลตัน ภูเก็ต อาเคเดียรีสอร์ท แอนด์ สปา: 25-27 พฤษภาคม 2565, 1-4.

[4] I. Hernando-Gil, H. Shi, F. Li, S. Djokic, and M. Lehtonen, “Evaluation of fault levels and power supply network impedances in 230/400 V 50 Hz generic distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol.32, pp. 768-777, April 2017. H. Al-Bayaty, M. Amroze, and M. Z. Ahmed, “A new power theory (right-angled triangle theory),” in *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON),* Malaysia, 2015, pp. 451-456.



ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก (Ph.D.) สาขา Electronics and Electrical Engineering ณ University of Southampton, UK เชี่ยวชาญงานวิจัยระบบควบคุมอัตโนมัติ, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, การประยุกต์ใช้นวัตกรรมในระบบไฟฟ้ากำลัง



ชนสิษฎ์ เปลี่ยนจันทร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี (B.Eng.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เชี่ยวชาญงานวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง



อันวัร มัสอูดี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี (B.Eng.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เชี่ยวชาญงานวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์หาขนาดและต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง : กรณีศึกษาช่วงเวลาพลังงานไฟฟ้าเหลือใช้โซล่ารูฟท็อป

Analysis of Sizing and Costing of a Battery Energy Storage System of Middle Industry Plant: A Case Study of Remaining Energy from Solar Rooftop

นิพนธ์ พลเสน[1] นพมาศ พรมอาสา[1] ชัชนันท์ ปานะพิพัฒน์[1] สยามรัฐ เพิกอาภรณ์[1] กรัณย์ ศิริจันทร์ชื่น[1] และประมุข อุณหเลขกะ[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: Niponponsen1982@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์หาขนาดและต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางในกรณีศึกษาช่วงเวลาพลังงานไฟฟ้าเหลือใช้โซล่ารูฟท็อป มีการบันทึกข้อมูลจริงและมีการจำลองโดยโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory และวิเคราะห์ผลตอบแทนต่อต้นทุนและจุดคุ้มทุนของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ร่วมกับโซลาร์รูฟท็อปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง มีกรณีศึกษา 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 ไม่มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อปใช้ไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ช่วง peak รวมค่าไฟต่อปี 1,810,157.04 บาท และกรณีที่ 2 มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อปใช้ไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ช่วง รวมค่าไฟต่อปี 167,401.23 บาท ค่าไฟฟ้าที่ลดได้ 1,642,755.81บาท

คำสำคัญ: ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่, โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง, โซล่ารูฟท็อป

Abstract

This paper presents an analysis of the sizing and costing of a battery energy storage system (BESS) for a middle industry plant in a case study of remaining energy from a solar rooftop. The real data has been recorded and simulated using the DIgSILENT PowerFactory program. The analysis of investment and break-even point of the battery energy storage system combined with rooftop solar for medium-sized industrial plants. There are two case studies: in Case 1, without BESS and solar rooftop, annual electricity consumption at peak periods totals 1,810,157.04 baht, and in Case 2, with BESS and rooftop solar, the annual electricity usage totals 167,401.23 baht. The reduced electricity cost is 1,642,755.81 baht.

Keywords: Battery Energy Storage System Sizing, Middie Industry Plant, Solar Roortop

1. บทนำ

การติดตั้งโซล่ารูฟท็อปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง ดังรูปที่ 1 และการใช้งานของแบตเตอรี่ถือเป็นข้อกังวลที่สำคัญสำหรับการทำงานเชิงเทคโนโลยีและเศรษฐกิจของแอปพลิเคชันต่างๆ ที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงาน วิธีการชาร์จยังถือเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งในการกำหนดและส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ มีการกล่าวถึงเทคนิคการชาร์จหลายวิธี ซึ่งมีการตอบสนอง เพื่อรักษาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ วิธีการชาร์จใหม่ที่มีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ [1]



รูปที่ 1 การติดตั้งโซล่ารูฟท็อปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง การใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS)

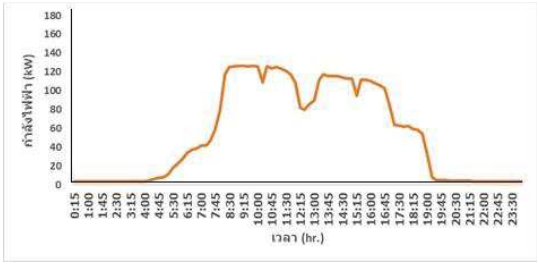
การใช้ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (BESS) เพื่อปรับปรุงลักษณะการตอบสนองของระบบพลังงานของกำลังไฟฟ้าจริงได้มีการเสนอกลยุทธ์การควบคุมแบบง่ายๆ ของ BESS[2] ความสามารถทางเทคนิคของ BESS หมายถึงประสิทธิภาพของแบตเตอรี่และระดับ

เทคโนโลยี เป็นการประเมินเทคโนโลยีที่ใช้ในระบบทั้งหมดอย่างครอบคลุม การประเมินทางเทคนิคเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับประสิทธิภาพของ BESS เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการประเมินทางเทคนิคของ BESS[3] การกำหนดขนาดที่เหมาะสมของ BESS สำหรับจุดประสงค์นี้ อาจจำเป็นต้องนำการตัดสินใจมาใช้ภายใต้ความแน่นอน [4] และแบบจำลองการลงทุนที่ค้นพบการผสมผสานที่เหมาะสมที่สุดของการลงทุนที่มีความยืดหยุ่นในการผลิตไฟฟ้าที่อยู่ในระดับสูง ได้แก่ ระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่[5]

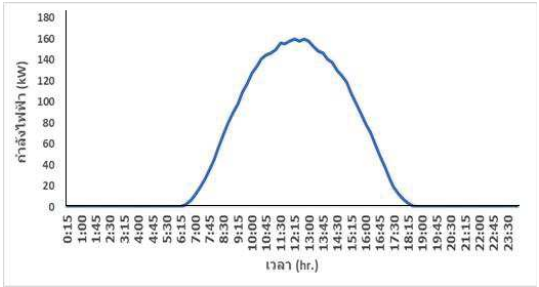
2. ระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง พื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง

2.1 ข้อมูลโหลดของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง

ข้อมูลโหลดที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลจริงของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง ใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง ในระบบไฟฟ้าขนาด 24 kV และมีการติดตั้งโซล่ารูฟท็อป ขนาด 331.5 kWp ข้อมูลการใช้โหลดดังในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



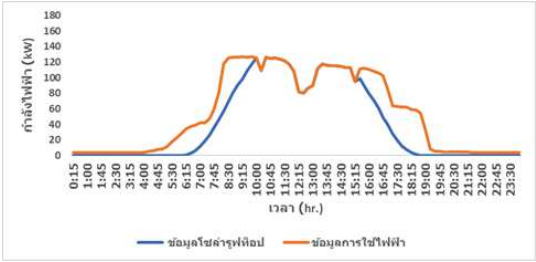
รูปที่ 2 ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง



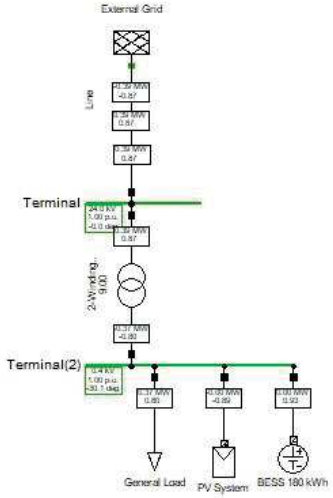
รูปที่ 3 ข้อมูลโซล่ารูฟท็อปของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง

2.2 การสร้างแบบจำลองของข้อมูลการใช้ไฟฟ้า

นำข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางมาจำลองโดยใช้โปรแกรม DIgSILENT PowerFactory โดยที่ระบบไฟฟ้าดังกล่าวจะเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 การใช้พลังงานไฟฟ้ารายวันโดยใช้ค่าเฉลี่ยทั้งปี



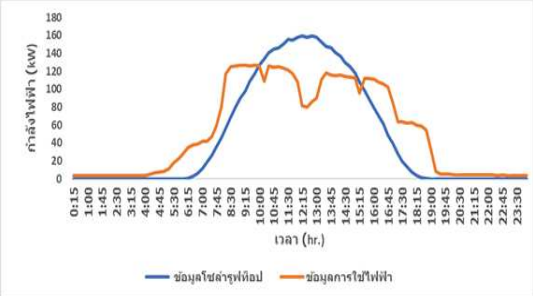
รูปที่ 5 แบบจำลองระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง

3. ผลการวิเคราะห์การหาขนาด BESS

เมื่อทำการวิเคราะห์ พบว่า มีพลังงานไฟฟ้าที่โซล่ารูฟท็อปผลิตได้มากกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางบางช่วงเวลาหายไปเกิดจากการติดตั้ง Zero Export ในระบบ ทำการป้องกันไฟฟ้าส่วนเกินไม่ให้ส่งย้อนกลับไปยังระบบโครงข่ายของการไฟฟ้านครหลวง (Grid) ขณะที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 126.68 kW

การวิเคราะห์ Load Profile โดยไม่ติดตั้ง Zero Export ในระบบ พบว่าบางช่วงเวลา โซล่ารูฟท็อปผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของโรงงานไฟฟ้าขนาดกลาง จึงมีความคิดนำ

พลังงานไฟฟ้าส่วนเกินมากักเก็บ โดย ระบบ BESS ไปชดเชยช่วงที่โซล่ารูฟท็อปผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่เพียงพอ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 Load Profile โดยไม่ติดตั้ง Zero Export

ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง

ระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ที่เหมาะสม สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง จะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากปริมาณพลังงานที่เหลือใช้ จากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถหาขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ได้จากสมการ (1)

$$E^{BESS} = \sum_{t2}^{t1}(P_{y,m,d,t}^{Load}) \times \Delta t \qquad (1)$$

โดยที่

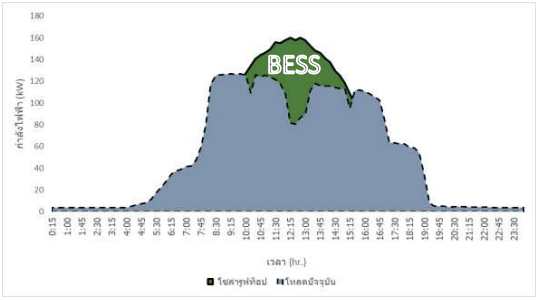
$P_{y,m,d,t}^{Load}$ = กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องการลด (kW)

E^{BESS} = ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ (kWh)

Δt = ระยะห่างของช่วงเวลาที่การไฟฟ้ามองเห็น ทุก 15 นาที (The Length of The Time Period : 0.25 hr)

$t1$ และ $t2$ = เวลาเริ่มต้น และเวลาสิ้นสุดขณะที่ BESS เก็บประจุพลังงานไฟฟ้า (hr)

ในกรณีที่ไม่**ติดตั้ง** Zero Export สามารถหาขนาด BESS คือ 180 kWh ได้จากสมการที่ 1 โดยการวิเคราะห์จากพื้นที่ของพลังงานเหลือใช้ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วิเคราะห์จากพื้นที่ของพลังงานเหลือเพื่อหาขนาด BESS

จากการวิเคราะห์ Load Profile หลังติดตั้ง BESS ขนาด 180 kWh เข้าไปในระบบจะสามารถชดเชยพลังงานไฟฟ้าที่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ Load Profile หลังการติดตั้ง BESS ขนาด 180 kWh

4. ผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนต่อต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ร่วมกับโซลาร์รูฟท็อปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง

จากการคำนวณค่าไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้ง BESS ของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลาง หากติดตั้งโซล่ารูฟท็อปเพียงอย่างเดียวจะทำให้ผู้ประกอบการเสียโอกาสในการใช้พลังงานจากโซล่ารูฟท็อปอย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากมีการติด Zero Export ในระบบทำให้เมื่อมีพลังงานไฟฟ้าที่เกิน Zero Export จะสั่ง Optimizer ไปจำกัดการผลิตจากโซล่ารูฟท็อปที่ผลิตได้ และถ้าติดตั้ง BESS จะมีโอกาสในการใช้พลังงานอย่างเต็มประสิทธิภาพเพราะในช่วงที่โซล่ารูฟท็อปผลิตเกินก็จะไปทำการกักเก็บที่ BESS และนำพลังงานมาใช้ในช่วงที่ผลิตได้น้อยกว่าความต้องการใช้ และจ่ายค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเปรียบเทียบรายปีน้อยลง

ตารางที่ 1 สภาวะที่ไม่มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อป

การคิดอัตราค่าไฟฟ้าต่อปี	หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อปี	TOU	คิดเป็นเงิน(บาท)
ช่วง Peak	376,819.47	4.2097	1,586,296.92
ช่วง off-Peak	85,134.10	2.6295	223,860.12
รวมค่าไฟฟ้าต่อปี(บาท)	1,810,157.04		

จากตารางที่ 1 พบว่า ไม่มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อปใช้ไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ช่วง peak มีค่า 376,819.47 หน่วยคิดเป็นเงินได้ 1,586,296.92 บาทต่อปี และช่วง off - peak มีค่า 85,134.10 หน่วยคิดเป็นเงินได้ 223,860.12 บาทต่อปี รวมค่าไฟต่อปี 1,810,157.04 บาท

ตารางที่ 2 สภาวะที่มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อป

การคิดอัตราค่าไฟฟ้าต่อปี	หน่วยการใช้ไฟฟ้าต่อปี	TOU	คิดเป็นเงิน(บาท)
ช่วง Peak	8,260.47	4.2097	34,774.09
ช่วง off-Peak	50,438.16	2.6295	132,627.14
รวมค่าไฟฟ้าต่อปี(บาท)	167,401.23		
ค่าไฟฟ้าที่ลดได้ (บาท)	1,642,755.81		

จากตารางที่ 2 พบว่า มี BESS และมีโซล่ารูฟท็อปใช้ไฟฟ้าต่อปีอยู่ที่ช่วง peak มีค่า 8,260.47 หน่วยคิดเป็นเงินได้ 34,774.09 บาทต่อปี และช่วง off peak มีค่า 50,438.16 หน่วยคิดเป็นเงินได้ 132,627.14 บาทต่อปี รวมค่าไฟต่อปี 167,401.23บาท ค่าไฟฟ้าที่ลดได้ 1,642,755.81 บาท

5. สรุป

จากการวิเคราะห์หาขนาด BESS ในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า หลังติดตั้ง BESS ขนาด 180 kWh ซึ่งมีค่าที่เหมาะสม การวิเคราะห์กรณีการติดตั้งโซล่ารูปท็อป ขนาด 331.5 kW ร่วมกับ BESS ขนาด 180 kWh สามารถลดการใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางได้ดี ค่าไฟฟ้าที่ลดลงคิดเป็นเงินใน 1ปี เท่ากับ 1,642,755.81 บาท ซึ่งราคา BESS ขนาด 180 kWh เท่ากับ 905,850 บาท จะคืนทุนค่า BESS ภายใน 7 เดือน

เอกสารอ้างอิง

[1] MOHAMMED M. ALHAIDER, EMAD M. AHMED, MOKHTAR ALY, HANY A. SERHAN, EMAD A. MOHAMED, and ZIAD M. ALI , " New Temperature-Compensated Multi-Step Constant-Current Charging Method for Reliable Operation of Battery Energy Storage Systems," IEEE ACCESS ,VOLUME 8, 2020 ,pp 27961-27972 , doi : 10.1109/ACCESS.2020.2972391

[2] AKM KAMRUL HASAN, MOHAMMED H.HAQUE, and SYED MAHFUZUL AZIZ , " Enhancing Frequency Response Characteristics of Low Inertia Power Systems Using Battery Energy Storage," IEEE ACCESS , VOLUME 12, 2024, pp 116861- 116874, doi : 10.1109/ACCESS.2024.3444330

[3] NANSHENG PANG ,QICHEN MENG ,and MENGFAN NAN , " Multi-Criteria Evaluation and Selection of Renewable Energy Battery Energy Storage System-A Case Study of Tibet, China," IEEE ACCESS , VOLUME 9, 2021 ,pp 119857- 119870, doi :10.1109/ACCESS.2021.3107192

[4] HUNYOUNG SHIN and JIN HUR, " Optimal Energy Storage Sizing With Battery Augmentation for Renewable-Plus-Storage Power Plants," IEEE ACCESS, VOLUME 8, 2020,pp 187730-187743, doi : 10.1109/ACCESS.2020.3031197

[5] ZORA LUBURI, HRVOJE PAND,and MIGUEL CARRIÓN, " Transmission Expansion Planning Model Considering Battery Energy Storage, TCSC and Lines Using AC OPF," IEEE ACCESS, VOLUME 8, 2020 ,pp 203429- 203439, doi : 10.1109/ACCESS. 2020.3036381

[6] กระทรวงพลังงาน " ประกาศเชิญชวนการรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย" , 2564

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

แบบจำลองต้นทุนการผลิตไฟฟ้า: กรณีศึกษาโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในภาคตะวันตกของประเทศไทย

An Electricity Generation Cost Model: A Case Study of Combined Cycle Power Plants in Western Thailand

ชยกฤตย์ ลิขิตานุสิทธิ์[1*] และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน[1]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
E-mail: L.Chyakrit@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองและประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมในพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการวางแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในภูมิภาคดังกล่าว ผลการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีที่เลือกใช้และระดับแรงดันไฟฟ้าส่งออกมีผลต่อการกำหนดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย โดยเทคโนโลยี Single Shaft CCGT ที่ระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV มีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยที่ 2.2696 และ 2.2701 บาท/kWh ตามลำดับ ในขณะที่เทคโนโลยี Multi Shaft CCGT ที่ระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV มีต้นทุนที่ 2.2922 และ 2.2927 บาท/kWh ตามลำดับ ข้อมูลผลการศึกษานี้จะช่วยเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับเงื่อนไขของโครงสร้างพื้นฐานและความต้องการใช้ไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันตกของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบจำลองโครงสร้างต้นทุน, โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม, ภาคตะวันตกของประเทศไทย

Abstract

This research aims to develop a model and evaluate the electricity production cost of combined cycle power plants in the western region of Thailand, in order to support the planning and development of the region's power system. The study found that the selected technology and transmission voltage levels significantly influence the unit cost of electricity production. Specifically, the Single Shaft CCGT technology, at transmission voltage levels of 230 kV and 500 kV, yields unit production costs of 2.2696 and 2.2701 THB/kWh, respectively, while the Multi Shaft CCGT technology, at 230 kV and 500 kV, results in costs of 2.2922 and 2.2927 THB/kWh, respectively the findings of this study will serve as a guideline for selecting the most appropriate technology to meet the infrastructure conditions and electricity demands in the western region of Thailand.

Keywords: Cost Model, Combined Cycle Power Plant, Western Thailand

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย การคาดการณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าในปี 2568-2570 พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ โดยในภาคอุตสาหกรรมคาดว่าจะมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากการฟื้นตัวของภาคผลิตและการตั้งฐานการผลิตของนักลงทุนต่างชาติ เช่นกลุ่มของ Data Center และ Cloud Service ซึ่งมีความต้องการไฟฟ้าที่มีความเสถียรอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง รวมถึงการพัฒนาโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ [1]

จากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 (Thailand Power Development Plan 2018 Rev.1; PDP 2018 Rev.1) ได้พิจารณาถึงความมั่นคงของระบบไฟฟ้าในภาคตะวันตกที่มีความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.4% ณ ปลายแผนปี 2580 จะมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด 6,214 เมกกะวัตต์ โดยกำลังการผลิตไฟฟ้าส่วนใหญ่ในภาคตะวันตกมาจากโรงไฟฟ้าหลักประเภทเชื้อเพลิงฟอสซิลของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ (Independent Power Producer; IPP) เนื่องจากโรงไฟฟ้าดังกล่าวจะเริ่มทยอยหมดอายุสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และมีแผนการปลดออกจากระบบไฟฟ้าในช่วงปี 2563-2576 [2]

ทั้งนี้เพื่อให้ระบบไฟฟ้าในภาพรวมของประเทศและในภาคตะวันตกมีความมั่นคง ตามแผน PDP 2018 Rev.1 และร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2567 – 25801 (Draft Thailand Power Development Plan 2024; Draft PDP 2024) จึงจำเป็นต้องมีโรงไฟฟ้าทดแทนและโรงไฟฟ้าใหม่โดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเป็นหลัก ตาม Draft PDP 2024 ในปี 2576 จะมีโรงไฟฟ้าใหม่ได้แก่โรงไฟฟ้า

พลังความร้อนร่วมภาคตะวันตก กำลังการผลิต 1,400 MW ที่มีกำหนดการซื้อขายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (SCOD) กับ กฟผ. [3]

ปัจจุบันภาครัฐยังไม่กำหนดพื้นที่ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้าดังกล่าวและการสร้างโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plant; CCGT) จำเป็นต้องมีความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ได้แก่ 1) ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 2) ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โดยการสร้างโรงไฟฟ้าในพื้นที่มีความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยด้วยเช่นกัน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองและประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าเพื่อช่วยสนับสนุนการวางแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยมุ่งหวังให้การผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมใหม่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต

2. วิธีการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองต้นทุน

2.1.1 กำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องและสมมุติฐานปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้างต้นทุนของกรณีศึกษา

2.1.2 คำนวณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายดำเนินงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม ระบบสายส่งไฟฟ้า ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

2.1.3 คำนวณต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจากแบบจำลองโครงสร้างต้นทุน

2.1.4 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

2.2 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้า (Capital Expenditure of Power Plant; CP_{pp}) ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ (Equipment Cost; EQ) ค่าก่อสร้าง (Construction Cost; CC) ค่าออกแบบวิศวกรรม (Engineering Cost; EC) และค่าที่ดิน (Land Cost) โดยขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีที่เลือกใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าได้แก่ 1) Single Shaft CCGT และ 2) Multi Shaft CCGT และมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนได้แก่ กำลังการผลิตติดตั้ง (Gross Capacity ; GC) และค่าที่ดิน (Land Price; LP) ดังสมการที่ 1 [4]

$$CP_{(pp)ij} = 27.21\, GC_i + 0.135\, GC_i\, LP_j \quad (1)$$
$$i \in I | I = \{Single\ shaft, Multiple\ shaft\}$$
$$j \in J | J = \{Ratchaburi, Kachanaburi, \dots, Tak\}$$

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของโรงไฟฟ้า (Operating Expenditure of Power Plant; OP_{pp}) ประกอบด้วย 1) ค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง (Fuel Cost; FC) เป็นผลคูณของอัตราการใช้เชื้อเพลิงตามเทคโนโลยีที่ใช้ (Heat Rate: HR) ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจริงในแต่ละปี (Actual Generating Output; AG) และราคาเชื้อเพลิง (Fuel Price; FP) ดังสมการที่ 2 และ 2) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานคงที่ (Fixed Operation and Maintenance Cost; FOM) แปรผันกับกำลังการผลิตติดตั้ง ดังสมการที่ 3 และ 3) ค่าใช้จ่ายการดำเนินงานผันแปร (Variable Operation and Maintenance Cost; VOM) แปรผันตามปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตจริงในแต่ละปี ดังสมการที่ 4 [5]

$$FC_{it} = Hr_{it}\, AG_t\, FP_t \quad (2)$$
$$i \in I | I = \{Single\ shaft, Multiple\ shaft\}$$
$$t \in T | T = \{1,2,3,\dots,25\}$$

$$FOM_i = 0.44 GC_i + 4E^{-3} CP_{(pp)} \quad (3)$$
$$i \in I | I = \{Single\ shaft, Multiple\ shaft\}$$

$$VOM_{it} = 5.29E^{-8} AG_{it} \quad (4)$$
$$i \in I | I = \{Single\ shaft, Multiple\ shaft\}$$
$$t \in T | T = \{1,2,3,\dots,25\}$$

โดยปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงในแต่ละปี (AG) เป็นผลคูณระหว่างกำลังการผลิตติดตั้ง (GC) และค่าตัวประกอบการผลิตไฟฟ้า (Load Factor ; LF) ดังสมการที่ 5

$$AG_{it} = 8{,}760\, GC_i\, LF_{it} \quad (5)$$
$$i \in I | I = \{Single\ shaft, Multiple\ shaft\}$$
$$t \in T | T = \{1,2,3,\dots,25\}$$

2.3 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบสายส่งไฟฟ้า

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของระบบสายส่งไฟฟ้า (Capital Expenditure of Transmission System; CP_{ts}) มีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนได้แก่ระยะทางระหว่างโรงไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Distance Transmission; DIS_t) เช่นเดียวกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบสายส่งไฟฟ้า (Operating Expenditure of Transmission System; OP_{ts}) โดยขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าดังสมการที่ 6 และ 7 [6]

$$CP_{(ts)k} = A_k DISt \quad (6)$$

$$OP_{(ts)k} = B_k DISt \quad (7)$$
$$k \in K | K = \{230kV, 500kV\}$$

2.4 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (CP_{gp}) ประกอบด้วยค่าวัสดุอุปกรณ์ (Material Cost; MR) ค่าแรงในการก่อสร้าง (Labor Cost; LC) ค่าการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Right of Way; ROW) และค่าใช้จ่ายอื่นๆ (Miscellaneous Cost; MIS) โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการลงทุนได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Diameter Gas Pipeline; Dia) และระยะทางระหว่างโรงไฟฟ้าถึงสถานีควบคุมแรงดันก๊าซธรรมชาติ (Distance Gas Pipeline ; DIS_{gp}) ดังสมการที่ 8 ถึง 11 [7]

$$\boldsymbol{MR = (330.5\,Dia^2 + 687Dia + 26,960)DISgp + 35,000} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{LC = (343Dia^2 + 2,074Dia + 170,013)DISgp + 185,000} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{RW = (577Dia^2 + 29,788)DISgp + 40,000} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{MIS = (8,471Dia + 7,324)DISgp + 95,000} \quad (11)$$

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (OP_{gp}) ขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการลงทุนดังสมการที่ 12 [8]

$$\boldsymbol{OP_{(gp)} = 0.015(MR + LC + RW + MIS)} \quad (12)$$

2.5 ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย (Unit Cost; UC) คำนวณจากผลรวมของค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Total CAPEX) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานตลอดอายุโครงการ (Total OPEX) หารด้วยการผลิตไฟฟ้าจริงตลอดอายุโครงการ (Total AGO) ดังสมการที่ 13 [9]

$$\boldsymbol{UC = \frac{\sum CP_l + \sum_o^t (OP_{lt})}{\sum_o^t AG_{it}}} \quad (13)$$

$$\begin{gathered} i \in I | I = \{ Single\ shaft, Multiple\ shaft \} \\ t \in T | T = \{1,2,3,\ldots.,25\} \\ l \in L | L = \{pp, ts, gp\} \end{gathered}$$

3. ข้อมูลในแบบจำลองโครงสร้างต้นทุน

การประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากแบบจำลองต้นทุนของกรณีศึกษา กำหนดข้อมูลประเภทโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม 2 ประเภท ได้แก่ 1) Single Shaft CCGT และ 2) Multi Shaft CCGT และระดับแรงดันไฟฟ้าจ่ายออก 2 ระดับ ได้แก่ 1) 230 kV และ 2) 500 kV และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งก๊าซธรรมชาติ 24 นิ้ว เพื่อคำนวณหาต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมมุติฐานปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างต้นทุนโรงไฟฟ้า

Parameter	Value	Unit
Project Life; PL	25	Year
Gross Capacity; GC	1,400	MW
Land Price; LP	20	mTHB/rai
Heat Rate – Single Shaft CCGT; Hr_{ss}	5609	Btu/kWh
Heat Rate – Multi Shaft CCGT; Hr_{ms}	5645	Btu/kWh
Fuel Price; FP	350	THB/mmBtu
Load Factor; LF	0.8	-
Distance Transmission; DISt	12	km
Distance Gas Pipeline; DISgp	33	km
Diameter Gas Pipeline; Dia	24	Inch

4. ผลการศึกษา

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานตลอดอายุโครงการของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมประเภท Single Shaft CCGT และ Multi Shaft CCGT กำลังการผลิตติดตั้ง 1,400 MW แสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม

หน่วย: ล้านบาท

Description	CP_{pp}	OP_{pp}
Single Shaft CCGT	41,880	514,084
Multi Shaft CCGT	44,180	517,398

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานตลอดอายุโครงการของระบบสายส่งไฟฟ้าระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV โดยมีระยะทางจากโรงไฟฟ้าถึงสถานีไฟฟ้าแรงสูง 12 km แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานของระบบสายส่งไฟฟ้า

หน่วย: ล้านบาท

Description	CP_{ts}	OP_{ts}
230 kV	10.85	39.60
500 kV	33.78	138.6

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานตลอดอายุโครงการของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ขนาด 24 Inch โดยมีระยะทางจาก

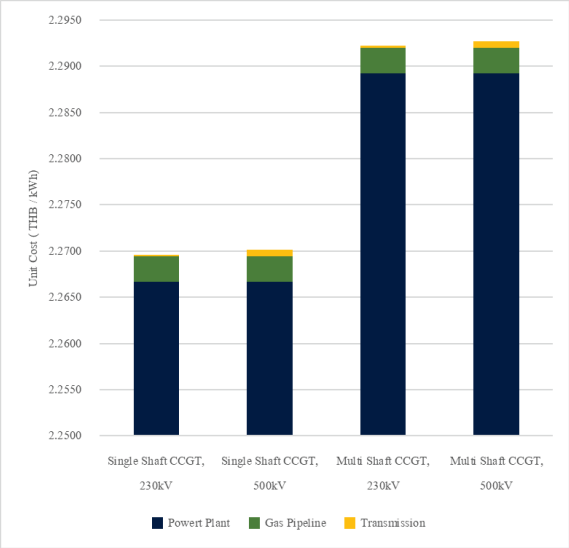
โรงไฟฟ้าถึงสถานีควบคุมแรงดันก๊าซธรรมชาติ 33 km แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานของระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

หน่วย: ล้านบาท

Description	CP_{gp}	OP_{gp}
Gas Pipeline System	495.00	185.00

ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกรณีศึกษา ประเภท Single Shaft CCGT ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าส่งออก 230 kV มีค่า 2.2696 บาท/kWh และระดับแรงดันไฟฟ้าส่งออก 500 kV มีค่า 2.2701 บาท/kWh ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมประเภท Multi Shaft CCGT ที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าส่งออก 230 kV มีค่า 2.2922 บาท/kWh และระดับแรงดันไฟฟ้าส่งออก 500 kV มีค่า 2.2927 บาท/kWh แสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของกรณีศึกษา

ผลการศึกษาพบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าจ่ายออกเดียวกัน ต้นทุนต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าประเภท Multi Shaft CCGT มีค่ามากกว่า Single Shaft CCGT 0.023 บาท/kWh (ร้อยละ 0.99) เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินงานโรงไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วน ร้อยละ 99.26 ของต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วย

5.สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้าพลังความพลังความร้อนร่วม เพื่อช่วยในการตัดสินใจวางแผนพัฒนาระบบไฟฟ้าในพื้นที่ภาคตะวันตกประเทศไทย รวมถึงสามารถใช้เป็นต้นแบบในการคำนวณต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมตามข้อจำกัดและเงื่อนไขในพื้นที่อื่นๆได้

จากผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้าพบว่าการเลือกประเภทโรงไฟฟ้ามีผลต่อต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสูงสุดดังนั้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึงเมื่อมีการพัฒนาโรงไฟฟ้าใหม่ในพื้นที่ต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] นรินทร์ ตันไพบูลย์. (2567). แนวโน้มธุรกิจและอุตสาหกรรม ปี 2568-2570 ธุรกิจไฟฟ้า (น.14). วิจัยกรุงศรี

[2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2561). แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 – 2580 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1.

[3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2567). ร่างแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2567 – 2580. กระทรวงพลังงาน

[4] Bruno deBiasi. (2024), “Capital Cost Estimates for Utility Scale Power Generation Plants”, 2024 GTW Handbook, pp.106-108.

[5] R.Martin and B.Paul, (2016), “Electricity Generation Costs and Hurdle Rates. Leigh Fisher”, pp.21.

[6] H.Catalina, B.Rodrigo, et al., (2020) "Potential Map for the Installation of Concentrated Solar Power Towers in Chile." Energies 13 DOI: 10.3390/en13092131.

[7] N.Parker. (2003), “Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs”.

[8] M.Balsamini, R.Corradi and G.Catini, (2020), “CAPEX and OPEX - ESTIMATE REPORT”, pp.6.

[9] นายเศฏฐศิษฏ์ มุสิพรม. (2563). แบบจำลองโครงสร้างต้นทุนโครงการโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติเหลวกรณีศึกษาอำเภอทับสะแก, สารนิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำจากขยะพลาสติกในทะเล

Low Speed Generator 1 Phase form Plastic waste in the ocean

ไพโรจน์ แสงอำไพ[1] นันทวัฒน์ สุวรรณ[2] สันติพงษ์ คงแก้ว[3] อภิรัญธ์ จันทร์ทอง[4] อาคม ลักษณะสกุล[5]

[1,2,3,4,5]หลักสูตรวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช

99 หมู่ที่ 4 ตำบลท้องเนียน อำเภอขนอม จังหวัดนครศรีธรรมราช 80210 E-mail: Pairote.s@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสสำหรับกังหันลมความเร็วรอบต่ำ โดยการประยุกต์ใช้วัสดุจากขวดขยะพลาสติกในทะเลมาทำโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและทำการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุที่หล่อขึ้นเพื่อใช้งานในส่วนของโครงสร้าง การออกแบบและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กจะด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาปริมาณสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำระหว่างวัสดุแผ่นเหล็กลามิเนตและโครงสร้างที่หล่อขึ้นจากขยะพลาสติกผสมเรซิน โดยมีพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส พิกัด 200 W 24V 50Hz 300 rpm 20 ขั้วแม่เหล็ก จากผลการวิเคราะห์การทดสอบทางกลและทางไฟฟ้า สามารถนำไปใช้งานกับกังหันลมความเร็วรอบต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส , ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์, ขยะพลาสติกในทะเล

Abstract

This paper presents the design and construction of a single-phase generator for a low-speed wind turbine by applying materials from marine plastic bottles to make the generator structure and testing the strength of the molded materials for use in the structure. The magnetic field design and analysis will use a finite element program to study the magnetic field quantity in a low-speed generator between a laminated steel sheet material and a molded structure made from plastic waste mixed with resin. The generator has a single-phase rated power of 200 W, 24V, 50Hz, 300 rpm, and 20 poles. From the results of the mechanical and electrical test analysis, it can be effectively used for low-speed wind turbines.

Keywords: 1 phase generators, Magnetic field density , Finite elements Method , Plastic waste in the ocean

1. บทนำ

ปัญญาขยะพลาสติกในทะเลในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก นับเป็นปัญหาหลักที่ทุกประเทศร่วมกันแก้ปัญหาและหาวิธีการกำจัดและนำมาแปลงสภาพใหม่เพื่อใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุด เช่นเดียวกับพลังงานหมุนเวียนในปัจจุบันถูกนำมาเป็นแหล่งพลังงาน ในการผลิตไฟฟ้ามากขึ้นทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคครัวเรือน ซึ่งช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเป็นการพึ่งพาตนเองในการใช้พลังงานไฟฟ้า ชุมชนชายฝั่งทะเลมีศักยภาพด้านพลังงานลมที่สามารถจะนำพลังงานมาผลิตไฟฟ้ากับกังหันลมความเร็วรอบต่ำ ซึ่งที่นิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSM) [1] ที่สามารถนำมาใช้กับกังหันลมทั้งชนิดแกนตั้ง(Vertical Axis Wind Turbine) และกังหันลมแกนนอน(Horizontal Axis Wind Turbine) ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานขึ้นอยู่สภาพความเร็วลมพื้นที่นั้นและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับกังหันลมความเร็วรอบต่ำ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี ปัจจุบันการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำจะถูกนำมาใช้งานกับวงจรเรียงกระแส 1 เฟส เพื่อแปลงพลังงานที่ได้ไปจ่ายโหลดหรือการประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ แต่ด้วยโครงสร้างและส่วนประกอบที่ทำจากวัสดุตัวนำแม่เหล็กที่เป็นโลหะ[2] เมื่อนำไปใช้ในชุมชนชายฝั่งทะเลพบว่ามีสภาพการใช้งานที่ไม่ยาวนาน อีกทั้งต้องการบำรุงดูแลรักษาอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาเปลี่ยนโครงสร้างที่เป็นวัสดุที่ทำชุดสเตเตอร์[3] สามารถพัฒนาได้รูปแบบและวัสดุในการสร้างซึ่งพบว่าสามารถพัฒนาต่อยอดได้เป็นอย่างดี

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสสำหรับกังหันลมความเร็วรอบต่ำ โดยนำขยะพลาสติกในทะเลมาทำโครงสร้างชุดสเตเตอร์และชุดโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส พิกัด 24V 50Hz 250 W 300 rpm 20 ขั้วแม่เหล็กและการศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบปริมาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ ซึ่งออกแบบและสร้างชุดขดลวดสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กจะยึดติดตั้งบนวัสดุที่หล่อขึ้นจากขยะพลาสติกในทะเล เพื่อให้ได้เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้า 1 เฟส ที่สามารถนำไปใช้งานกับชุมชนชายฝั่งทะเลกับชุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. หลักการทำงานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ ที่นิยมใช้งานและถูกสร้างขึ้นจะมีการหมุนในลักษณะการเคลื่อนที่ตามแนวรัศมี (radial-flux permanent-magnet synchronous generators) โดยมีขดลวดชุดสเตอร์และขั้วแม่เหล็กโรเตอร์ ซึ่งชุดขดลวดสเตเตอร์เป็นชุดขดลวดที่สร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นจากการหมุนโรเตอร์ที่สร้างสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและการวางตำแหน่งชุดขดลวดในสเตอร์และชุดโรเตอร์ที่มีแม่เหล็กถาวรที่เป็นชุดสร้างสนามแม่เหล็กโดยมีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบในการสร้างความถี่ทางไฟฟ้า ซึ่งแรงบิดในการหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและ ปริมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นอาศัยหลักการสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดตามการเปลี่ยนแปลงของเวลา ดังสมการที่ 1

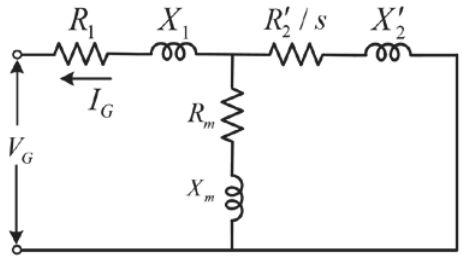
$$E_{\max} = N_C \phi \sin \omega t \tag{1}$$

ปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กตามกฎของแอมแปร์ (Ampere's Law) และ ฟลักซ์เคลื่อนที่บนแกนเหล็กด้วยระยะทางเฉลี่ย ค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของแกนสเตเตอร์และแกนโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถประมาณค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสมการที่ 2 โดยการกระจายของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux distribution) และเมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวด ดังนั้นความสัมพันธ์กันระหว่างความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กและพื้นที่ของขดลวดที่ว่างอยู่ภายในโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังในสมการที่ 3

$$\phi = BA \tag{2}$$

$$\phi = \frac{\mu A}{l} \cdot N_{ph} I \tag{3}$$

ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กโดยใช้ทฤษฎีของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [4] ดังวงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเฟส ในรูปที่ 2

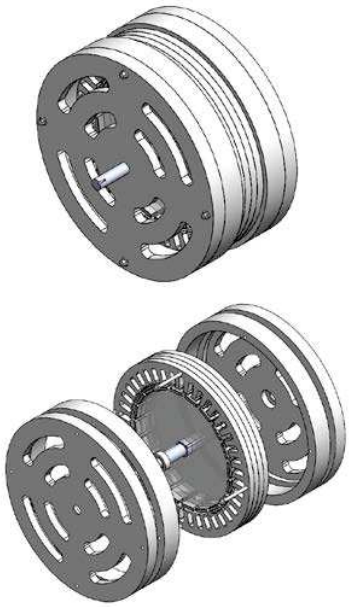


รูปที่ 1 วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อเฟส

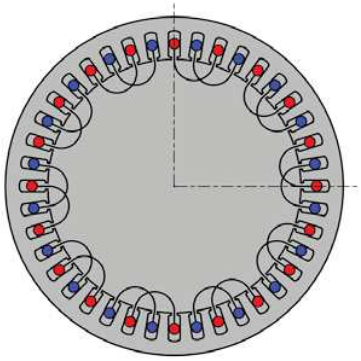
3. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสกังหันลม ความเร็วรอบต่ำ

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 ฟส

การออกแบบโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำที่พิกัด 200W 24Vrms 50Hz 200 rpm ดังรูปที่ 2 มี โครงสร้าง 2 ส่วน คือชุดโรเตอร์ใช้แม่เหล็กแรงสูง NdFeB จำนวน 20 ขั้วแม่เหล็ก มีขนาด 25 mm. x50 mm. และชุดสเตเตอร์ที่มีร่องสล็อตจำนวน 40 สล็อตโดยใช้ขดลวดทองแดงเบอร์ 22 พันในร่องสเตเตอร์เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำจากชุดโรเตอร์ มีจำนวนรอบ 250 รอบต่อชุดขดลวดและจัดวางชุดขดลวดสร้างแรงดันไฟฟ้าความถี่ 50 Hz ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 1 และมีการต่อขดลวดชุดสเตเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ 1 เฟส ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส



รูปที่ 3 ชุดขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟสความเร็วรอบต่ำ

การสร้างและทดสอบโครงสร้างเครื่องกำเนิดโดยการผสมขวดพลาสติกมาย่อยขนาดเล็กและผสมกับน้ำยาเรซินโดยใช้อัตราส่วนเท่ากันและหล่อขึ้นรูปและนำไปตัดกับเครื่อง CNC การทดสอบแผ่นโครงสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำจำนวน 6 แผ่น นำไปเป็นกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบการรับแรงอัดทางกล โดยการทดสอบใช้วิธีการทดสอบแรงอัดโดยใช้เครื่องกดไฮดรอลิค CONTROLS รุ่น DIGIMAX3 ทดสอบแรงกดบนแผ่นที่หล่อขึ้นรูป ซึ่งผลการทดสอบกำลังกดของเครื่องกดสามารถกดได้ 140 Ton โดยแผ่นโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่ความเสียหาย ดังรูปที่ 4



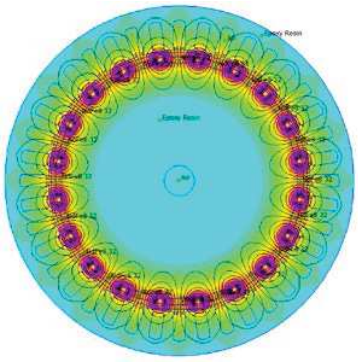
รูปที่ 4 การทดสอบด้วยเครื่องกดไฮดรอลิค รุ่น DIGIMAX3



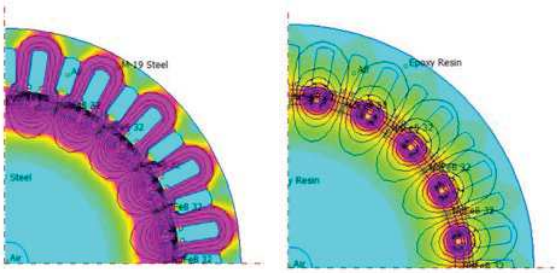
รูปที่ 5 แผ่นโครงสร้างที่หล่อขึ้นจากขยะพลาสติกและเรซิน

3.2 การจำลองสนามแม่เหล็กด้วยวิธีไฟไนเอลิเมนต์ (FEM)

การจำลองการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำ โดยใช้โปรแกรม Finite Element Magnetics Method (FEMM 4.2) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการใช้ขยะพลาสติกหล่อผสมเรซิน การจำลองปริมาณสนามแม่เหล็กโดยแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นที่หน้าตัดของวัสดุและจำลองเปรียบเทียบความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ดังผลการจำลอง ดังรูปที่ 6



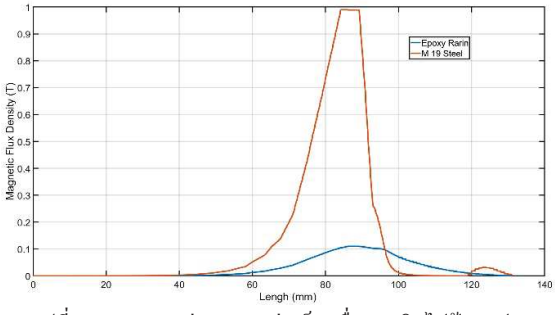
รูปที่ 6 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส



โครงสร้างแกนเหล็กลามิเนท โครงสร้างแผ่นอะคริลิค

รูปที่ 7 เปรียบเทียบความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผลจากการจำลองการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กของวัสดุดังในรูปที่ 7จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กในโครงสร้างวัสดุพลาสติกหล่อผสมเรซิน มีการกระจายตัวของปริมาณสนามแม่เหล็กที่จะนำไปสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำได้

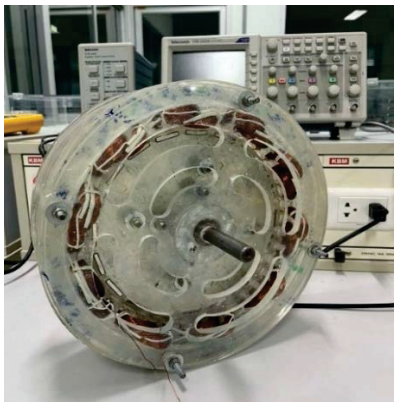


รูปที่ 8 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส

4. การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำ

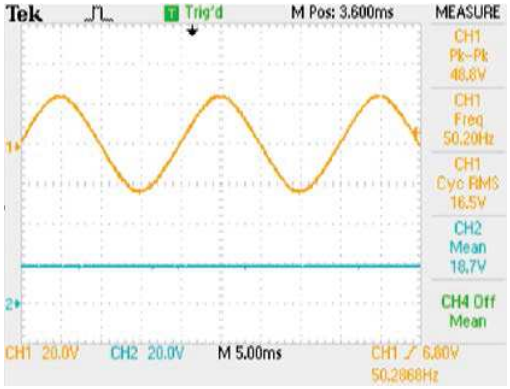
การทดสอบต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำ เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยการทดสอบ ใช้ชุดต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดในห้องปฏิบัติการเนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วรอบในระดับต่างได้คงที่ และเพื่อเปรียบเทียบปริมาณค่า

แรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสทางไฟฟ้า เมื่อความเร็วรอบที่ 200 รอบ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มีโครงสร้างภายในชุดสเตเตอร์และชุดโรเตอร์ และโครงสร้างภายนอกดังรูปที่ 11



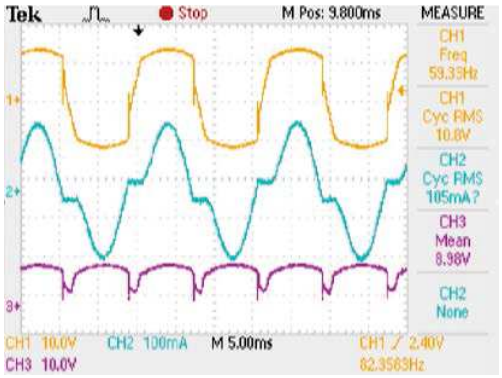
รูปที่ 9โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำ

ผลการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ด้วยชุดต้นกำลังขับเคลื่อน เพื่อวิเคราะห์วิเคราะห์แรงบิด ความเร็วรอบ และแรงดันไฟฟ้า ผลสัญญานทางไฟฟ้า 1 เฟส ความถี่ 50 Hz มีค่าแรงดันไฟฟ้า 16 Vrms ให้สัญญานแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ ดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 สัญญานแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านวงจรเร็กติไฟล์

ปริมาณค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ 50 Hz ที่ได้จาการทดสอบให้สัญญานแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ขณะไม่มีการต่อโหลดที่มีค่าฮาร์มอนิคต่ำและมีค่าความถี่และแรงดันไฟฟ้าความถูกต้อง และเมื่อนำไปทดสอบกับโหลดทางไฟฟ้า โดยต่อโหลดเพื่อวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายโหลด ดังค่ากระแสในรูปที่ 11 และจากวงจรการทดสอบเมื่อทดสอบโวลท์เตจเรกกูเลชั่นมีค่า 19 % และประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส เมื่อทดสอบจะอยู่ที่ 72 %จากคุณสมบัติในการออกแบบและทดสอบ



รูปที่ 11 สัญญานแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เฟส ขณะจ่ายโหลด

5. สรุป

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส ความเร็วรอบต่ำจากการประยุกต์ใช้วัสดุที่ไม่ใช้ตัวแม่เหล็กมาทำให้เป็นโครงสร้างชุดวางขดลวด ซึ่งต่อยอดองค์ความรู้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความเร็วรอบต่ำจากโครงสร้างแผ่นอคริลิ ซึ่งผลการทดสอบปริมาณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสามารถไปใช้งานได้ ในการออกแบบและสร้างอาจมีข้อจำกัดในด้านความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้าง ซึ่งการนำวัสดุจากขยะพลาสติกในทะเลมาย่อยและหล่อขึ้นรูปจะช่วยลดปัญหาขยะทางสิ่งแวดล้อมและเหมาะสมกับใช้งานชุมชนชายฝั่งทะเลต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Mueller, M.A. and McDonald, A.S. (2009), “A lightweight low-speed permanent magnet electrical generator for direct-drive wind turbines”, Wind Energy, Vol. 12 No. 8, pp. 768-780.

[2] M. Pinilla, S. Martinez, “Selection of Main Design Variables for Low-Speed Permanent Magnet Machines Devoted to Renewable Energy Conversion,” IEEE Transactions on Energy Conversion 2011, Volume: 26, Issue: 3, pp. 940-945

[3] S. V. A. Simion, L. Livadaru, N.D. Irimia, F. Lazr, “FEM analysis of a low-speed permanent magnet synchronous machine with external rotor for a wind generator,” Proceedings of OPTIM 2012, 24-26 May 2012, pp. 624-629.

[4] C. Dobrean, M. Greconici, G. Madescu, M. Mot, M. Biriescu, “FEM analysis of a synchronous generator with inset permanent magnet rotor”, Proceedings of OPTIM 2017, MAY 25-27, 2017

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาการวัดสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างด้วยแผ่นเพลเทียร์

A Study on Thermal Conductivity Measurement of Building Materials using Peltier Devices

อรุณสวัสดิ์ ปรีดาฉวัลย์[1*] นริส ประทินทอง[1] และ สมบูรณ์ เวชกามา[1]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
E-mail: arunsawat.preed@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างโดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้อุปกรณ์แผ่นเพลเทียร์จำนวนสองชุดสำหรับให้ความร้อนและความเย็น โดยมีวัสดุทดสอบวางอยู่ระหว่างกลางใช้แผ่นวัสดุ PMMA (Polymethyl Methacrylate) ซึ่งมีค่าสภาพนำความร้อนที่ทราบค่า ถูกใช้เป็นวัสดุอ้างอิงเพื่อคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุทดสอบ วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ แผ่นซีเมนต์บอร์ด ไม้ MDF ไม้ HMR และอิฐมวลเบา โดยค่าสภาพนำความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองเท่ากับ 0.188, 0.105, 0.104 และ 0.149 W/m·K ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่อ้างอิงจากเอกสารเผยแพร่ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 9.3%, 4.9%, 4.1% และ 8.1% ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้และความแม่นยำของวิธีการวัดที่พัฒนา พร้อมชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของอุปกรณ์ต้นแบบในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือทดสอบค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างอย่างสะดวกและเหมาะสมต่อการใช้งานภาคสนาม

คำสำคัญ: วัสดุก่อสร้าง, สภาพนำความร้อน, เพลเทียร์

Abstract

This study investigates the measurement of thermal conductivity in building materials utilizing peltier modules. A pair of peltier modules are employed as both heat and cooling sources, with the sample material positioned in between. A polymethyl methacrylate (PMMA) sheet of known thermal conductivity serves as a reference material to determine the heat transfer rate through the specimens. The tested materials include cement board, medium-density fiberboard (MDF), high-moisture-resistant board (HMR), and aerated concrete. Experimental results reveal average thermal conductivity values of 0.188, 0.105, 0.104, and 0.149 W/m·K for these materials, respectively. Comparisons between the measured values obtained using the developed device and reference values from published literature indicate percentage errors of 9.3%, 4.9%, 4.1%, and 8.1%, respectively. These findings demonstrate the feasibility and potential accuracy of the proposed method, suggesting its viability as an alternative approach for measuring the thermal conductivity of building materials. The development of this portable thermal conductivity measurement device offers significant practical advantages for field applications.

Keywords: construction materials, thermal conductivity, peltier devices

1. บทนำ

ในงานก่อสร้าง การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคาร โดยเฉพาะสมบัติด้านการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k) ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคาร วัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำสามารถช่วยลดการถ่ายโอนความร้อนเข้าสู่อาคาร ช่วยลดภาระของระบบปรับอากาศและเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานของอาคารได้ ในทางตรงกันข้าม วัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มต้นทุนด้านพลังงานในระยะยาว

การวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างจึงมีความสำคัญในการออกแบบอาคารให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงาน การทดสอบทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เครื่องวัดแบบ steady-state หรือ transient แต่เครื่องมือเหล่านี้มักมีราคาสูง และเข้าถึงยากเนื่องจากมีให้บริการในห้องปฏิบัติการเฉพาะทางเท่านั้น การเลือกวัสดุโดยพิจารณาค่าสภาพนำความร้อนจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ เจ้าของโครงการ, สถาปนิก, วิศวกร และผู้เกี่ยวข้อง สามารถเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับแนวคิดการออกแบบและประเภทของงานก่อสร้าง เพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานด้านประสิทธิภาพพลังงานขั้นต่ำ งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์วัดค่า

สภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้าง เพื่อนำเสนอแนวทางการวัดค่าสภาพนำความร้อนที่มีต้นทุนต่ำ เข้าถึงได้ง่ายและใช้งานได้สะดวกในการประเมินสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุก่อสร้าง

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การถ่ายโอนความร้อน

การถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer) เป็นกระบวนการที่พลังงานความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในสามรูปแบบหลัก ได้แก่

การนำความร้อน (Conduction) – เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านตัวกลางที่เป็นของแข็ง โดยเกิดจากการชนกันของโมเลกุลหรืออิเล็กตรอนอิสระ ค่าสภาพนำความร้อน (k) ของวัสดุมีผลโดยตรงต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุนั้น

การพาความร้อน (Convection) – เป็นการถ่ายโอนความร้อนผ่านการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น อากาศหรือน้ำ ซึ่งอัตราการถ่ายโอนความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) และอัตราการไหลของของไหล

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) – เป็นการถ่ายโอนพลังงานความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง ซึ่งพบได้ในกรณีที่วัสดุหรือพื้นผิวได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดรังสีอื่นๆ

ในการศึกษานี้ การวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุก่อสร้างมุ่งเน้นที่ การนำความร้อน (Conduction) โดยใช้แหล่งความร้อนที่ควบคุมได้และอุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถบันทึกค่าการไหลของพลังงานความร้อน

2.2 การวัดสภาพนำความร้อนแบบ Guarded Hot Plate

วิธี Guarded Hot Plate (GHP) เป็นเทคนิคมาตรฐานสำหรับการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุในสภาวะคงที่ (Steady-State) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C518 [1] อุปกรณ์ประกอบด้วยแผ่นให้ความร้อนหลัก (Hot Plate) ซึ่งวางอยู่ระหว่างตัวอย่างวัสดุ และแผ่นกันความร้อน (Guard Plate) ที่ช่วยลดการสูญเสียพลังงานความร้อนบริเวณขอบด้านข้าง เพื่อให้ความร้อนถ่ายเทผ่านวัสดุในทิศทางเดียว

กระบวนการวัดอาศัยการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองด้านของวัสดุให้คงที่ จากนั้นคำนวณค่าสภาพนำความร้อน (k) จากอัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนและความต่างอุณหภูมิ โดยใช้สมการของฟูริเยร์ (Fourier's Law) ซึ่งมีความแม่นยำสูงและมักใช้เป็นวิธีมาตรฐานในการวิจัยวัสดุก่อสร้างและวัสดุฉนวนกันความร้อน

2.3 การวัดสภาพนำความร้อนโดยใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก

เพลเทียร์ (Peltier) หรือเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) [2] เป็นอุปกรณ์ที่ผลิตจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อสร้างความร้อนและความเย็น โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ซึ่งถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ การใช้เพลเทียร์เป็นแหล่งความร้อน ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier Effect) ซึ่งเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่โมดูล จะทำให้ด้านหนึ่งร้อนและอีกด้านหนึ่งเย็น ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

$$q_{HC} = \alpha I T_{HC} + 0.5\beta I^2 - k\Delta T \quad (1)$$

$$q_{CC} = \alpha I T_{HC} - 0.5\beta I^2 - k\Delta T \quad (2)$$

การทำความร้อนและการทำความเย็น (ปริมาณความร้อนและปริมาณความเย็นที่ออกมาจากทั้งสองด้านของเทอร์โมอิเล็กทริก)

q_{HC} ในสมการ (1) คือพลังงานความร้อนที่ด้านร้อนของอุปกรณ์ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานที่เกิดจากปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect - $\alpha I T_{HC}$), พลังงานที่เกิดจากความร้อนจูล (Joule heating - $0.5\beta I^2$) และพลังงานที่สูญเสียจากการนำความร้อนผ่านอุปกรณ์ ($k\Delta T$)

q_{CC} ในสมการ (2) คือพลังงานความเย็นที่ด้านเย็นของอุปกรณ์ ซึ่งมีส่วนประกอบคล้ายกับสมการ (1) แต่ไม่มีการเพิ่มของพลังงานความร้อนจูล และยังคงมีการสูญเสียพลังงานจากการนำความร้อน

α คือ สัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient) หน่วย V/K เป็นค่าที่แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่ออุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างสองด้านของอุปกรณ์

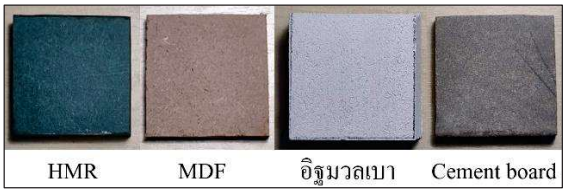
β คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทานภายใน (Internal Resistance Coefficient) หน่วย Ω ใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่เกิดจากกระแสไหลในอุปกรณ์ (Joule Heating)

I = กระแสไฟฟ้า (Current) ที่ไหลผ่านวงจรเทอร์โมอิเล็กทริก มีผลโดยตรงต่อพลังงานที่สร้างความร้อนหรือความเย็นในอุปกรณ์

3. วิธีการทดลอง

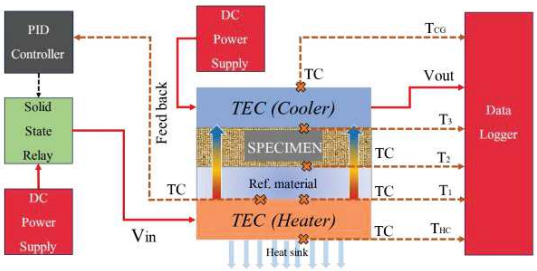
การทดลองนี้ใช้เทคนิคการถ่ายโอนความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady-State Heat Transfer) ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุทดสอบ โดยใช้เพลเทียร์ TEC-12706 [3] เป็นแหล่งกำเนิดความร้อน พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิที่แม่นยำ อุปกรณ์และขั้นตอนการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

ใช้เพลเทียร์ TEC-12706 ชุดที่หนึ่งเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน โดยถูกควบคุมอุณหภูมิผ่าน PID controller (Proportional-Integral-Derivative Controller - PID) ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเพลเทียร์ TEC-12706 ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านการควบคุมอุณหภูมิของเพลเทียร์ [4] ให้อยู่ที่ 45, 50 และ 55 °C ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C518 และใช้ Solid State Relay (SSR) เป็นอุปกรณ์ตัดต่อวงจรตามสัญญาณควบคุมจาก PID controller ช่วยให้อุณหภูมิคงที่ตามค่าที่ต้องการ วางแผ่นวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพนำความร้อน ไว้ที่ด้านร้อนของ TEC (Heater) โดยทำหน้าที่เป็นวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพนำความร้อน นำวัสดุทดสอบมาวางประกบกับแผ่นวัสดุอ้างอิง (ทีละชนิดสำหรับแต่ละครั้งการทดลอง) เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจาก TEC (Heater) ผ่านวัสดุอ้างอิงไปยังวัสดุทดสอบ



รูปที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

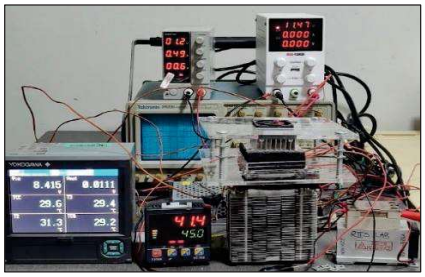
การวัดอุณหภูมิ – ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ ด้านร้อนของวัสดุอ้างอิง (T_1) ด้านเย็นของวัสดุอ้างอิง (T_2) ด้านเย็นของวัสดุทดสอบ (T_3)



รูปที่ 2 ไดอะแกรมการทำงานของชุดอุปกรณ์

ทำการติดตั้งเพลเทียร์ TEC-12706 อีกชุดที่ด้านเย็นของวัสดุทดสอบ(TEC Cooler) เพื่อควบคุมอุณหภูมิด้านเย็นของวัสดุทดสอบให้คงที่ โดยจะบันทึกอุณหภูมิที่ด้านเย็นของเพลเทียร์ TEC (Cooler) อุณหภูมิแวดล้อมอยู่ที่ 25 °C เมื่อจ่ายไฟให้กับชุดอุปกรณ์แล้วตั้งค่าอุณหภูมิ T_1 ที่ PID Controller ไปที่ 45 °C จนกระทั่งอุณหภูมิด้าน T_3 คงที่หรือระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิ T_2 และ T_3 จากนั้นปรับค่าอุณหภูมิด้านร้อนไปที่ 50 °C และ 55 °C

พื้นที่หน้าตัดของวัสดุทดสอบจะอยู่ที่ 40x40mm ส่วนความหนาของแผ่นซีเมนต์บอร์ด ไม้ MDF ไม้ HMR และอิฐมวลเบาคือ 10, 9, 12 และ 22mm ตามลำดับ



รูปที่ 3 ชุดอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อในการทดลอง

เมื่อวัดค่าอุณหภูมิ T_2 และ T_3 แล้ว จะนำมาคำนวณค่าสภาพนำความร้อนจากโดยเริ่มจากสมการฟูริเยร์

$$\dot{Q} = -k\frac{A\cdot\Delta T}{L} \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 \quad (4)$$

จากสมการ (4) ประกอบไปด้วยวัสดุสองแผ่นที่มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านวัสดุ $\dot{Q}_1$, $\dot{Q}_2$ คืออัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของวัสดุอ้างอิงและวัสดุทดสอบ

$$\dot{Q}_1 = \frac{k_{ref}\cdot\Delta T_{1-2}}{L_{ref}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_2 = \frac{k_S\cdot\Delta T_{2-3}}{L_S} \quad (6)$$

$$k_s = \frac{k_{ref}\cdot L_S\cdot\Delta T_{1-2}}{L_{ref}\cdot\Delta T_{2-3}} \quad (7)$$

จาก (4) (5) และ (6) สามารถหาค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุทดสอบ k_s ได้จากสมการ (7) ซึ่ง k_{ref} คือค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุอ้างอิง L_{ref}, L_s คืออความหนาของวัสดุอ้างอิงและวัสดุทดสอบตามลำดับ

4. ผลการทดลอง

4.1 ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการทดลอง

แผ่นซีเมนต์บอร์ด ค่าสภาพนำความร้อนเฉลี่ย 0.188 W/m·K ค่าความคลาดคลื่อน 9.3% แผ่นเอ็มดีเอฟ (MDF) ค่าสภาพนำความร้อนเฉลี่ย 0.105 W/m·K ค่าความคลาดคลื่อน 4.9% แผ่นไม้ HMR (High

Moisture Resistance) ค่าสภาพนำความร้อนเฉลี่ย 0.104 W/m·K ค่าความคลาดคลื่อน 4.1% อิฐมวลเบา ค่าสภาพนำความร้อนเฉลี่ย 0.149 W/m·K ค่าความคลาดคลื่อน 8.1%

4.2 การเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง

ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากระบบทดลองนี้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 10% เทียบกับค่าอ้างอิงของวัสดุแต่ละชนิดจากผู้ผลิต [5-7] และจากห้องปฏิบัติการของกรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการประเมินสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุก่อสร้างในระดับต้นแบบ การวิเคราะห์ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่า วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงและพื้นผิวสัมผัสเรียบจะให้ค่าการนำความร้อนที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากกว่าวัสดุที่มีรูพรุนหรือไม่เรียบสม่ำเสมอ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุทดสอบทั้ง 4 ชนิด

วัสดุทดสอบ	อุณหภูมิทดสอบ (°C)				ค่าอ้างอิง	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)
	45	50	55	เฉลี่ย		
	ค่าสภาพนำความร้อน (W/m-K)					
ซีเมนต์บอร์ด	0.188	0.188	0.188	0.188	0.172	9.3
MDF	0.107	0.104	0.103	0.105	0.101	4.9
HMR	0.102	0.105	0.106	0.104	0.100	4.1
อิฐมวลเบา	0.148	0.150	0.150	0.149	0.138	8.1

5. สรุป

การนำชุดอุปกรณ์เพลเทียร์สำหรับทดสอบสภาพนำความร้อน ของวัสดุก่อสร้าง สามารถให้ผลที่ค่อนข้างแม่นยำ มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าอ้างอิงของแต่ละวัสดุทดสอบไม่เกิน 10% คิดเป็นค่าเฉลี่ย 6%

5.1 ข้อได้เปรียบของระบบที่ใช้ทดสอบ

เมื่อเทียบกับการใช้วิธีแบบมาตรฐานกับเครื่องมือในห้องปฏิบัติการค่าบริการทดสอบจะอยู่ที่ 1,500 บาทต่อชิ้น (ขนาด 300x300mm หนาอย่างน้อย 10 mm) ชุดอุปกรณ์นี้จัดหาได้ง่ายใช้งบประมาณไม่เกิน 5,000 บาท มีขนาดกะทัดรัดสามารถใช้ในพื้นที่จำกัดได้ เวลาในการวัดค่าของแต่ละตัวอย่างประมาณ 10-15 นาที ซึ่งห้องปฏิบัติการจะใช้เวลาหลายชั่วโมง

5.2 ข้อจำกัดของระบบที่ใช้ทดสอบ

การที่วัสดุทดสอบมีขนาดหน้าตัด 40mm x 40mm และความหนาอยู่ในช่วง 9mm ถึง 22mm ทำให้ทิศทางการไหลของความร้อนจะเกิดมากขึ้นในทิศทางด้านข้างตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และการมีช่องว่างตามองค์ประกอบของวัสดุทดสอบที่ด้านข้างส่งผลให้การหุ้มฉนวนด้านข้างมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน วัสดุทดสอบที่มีลักษณะเป็นรูพรุนมากจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวัสดุที่มีกระบวนการผลิตให้มีความหนาแน่นสูงกว่า จึงอาจส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมได้

เอกสารอ้างอิง

[1] ASTM International, “ASTM C518-21: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus,” West Conshohocken, PA, USA, 2021.

[2] S. E. Sadati, N. Rahbar, H. Kargarsharifabad, and A. KhalesiDoost, “Low thermal conductivity measurement using thermoelectric technology - Mathematical modeling and experimental analysis,” Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 127, p. 105534, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer. 2021.105534

[3] E. Salsabila, T. A. Ajiwiguna, and A. Suhendi, “Performance Evaluation of TEC1-12706 Thermoelectric Cooler Module at Low Temperature Experimentally,” Proc. 2019 Int. Conf. on Information and Communications Technology (ICOIACT), Yogyakarta, Indonesia, pp. 835–837, 2019. doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938447.

[4] X. Shan, T. Cai, Z. Zong, and H. Mu, “Temperature Control System of Thermoelectric Cooler Based on Improved ADRC,” 2022 34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2022, pp. 3855–3857.

[5] บริษัท ไทยคอนโปรดักท์ จำกัด, “แคตตาล็อกผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบา”, เข้าถึงออนไลน์: https://www.thaiconproduct.com/wp-content/uploads/2023/10/Thai-Con-แคตตาล็อก-1.pdf, สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2568.

[6] T. Almazyad, M. Khaliq, and T. Sheikh, “Thermal and fire properties of medium-density fiberboard prepared with huntite, hydromagnesite, and zinc borate,” BioResources, vol. 17, no. 1, pp. 1606–1623, 2022. [Online]. Available: bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/thermal-and-fire-properties-of-medium-density-fiberboard-prepared-with-huntite-hydromagnesite-and-zinc-borate/. [Accessed: 20-Mar-2025]

[7] University of Calgary, "Thermal conductivity," Energy Education, [Online]. Available: energyeducation.ca/encyclopedia/Thermal_conductivity. [Accessed: 20-Mar-2025].

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบและพัฒนาระบบจัดการแสงสว่างด้วยเซิฟเวอร์บนเครือข่าย WLAN

Design and Development of a Lighting Management System Using a Server on a WLAN

สัญญา ผาสุข มารุต รักษา พรชัย แคล้วอ้อม จินดา สามัคคี
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: sunya.p@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบจัดการโหลดแสงสว่างภายในอาคารบนเครือข่าย WLANโดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตภายนอก ระบบประกอบด้วยเซิร์ฟเวอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม LAMPP บน Raspberry Pi ซึ่งทำหน้าที่เป็นเวปเซิฟเวอร์รับคำสั่งจากผู้ใช้งานผ่านเวปแอพพลิเคชันหรือโมบายแอปพลิเคชัน ทำให้สามารถควบคุมการเปิด-ปิดโหลดแสงสว่างได้แบบเรียลไทม์ รวมถึงกำหนดตารางเวลาเปิด-ปิดล่วงหน้าเพื่อให้ระบบทำงานโดยอัตโนมัติ การทดสอบกับระบบแสงสว่างบริเวณห้องโถงและทางเดินของอาคารศรีวิศววิทยาชั้น 10 พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 3.4 kWh ต่อวัน นอกจากนี้ระบบยังรองรับการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IoT ภายในอาคาร และสามารถขยายขอบเขตการควบคุมแสงสว่างไปยังชั้นอื่น ๆ ของอาคารซึ่งอยู่ในเครือข่ายเดียวกัน ระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานไฟฟ้าจากส่วนกลางแบบรวมศูนย์ ผลลัพธ์จากการพัฒนาระบบนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เซิฟเวอร์, การจัดการแสงสว่าง, เครือข่ายไร้สาย

Abstract

This research presents the design and development of an indoor lighting control system utilizing a local Wi-Fi network without requiring an external internet connection. The system comprises a server running LAMPP on a Raspberry Pi, which receives commands from users via a web application or a mobile application. Users can control the lights in real time and set schedules for automatic operation. Testing the system in the hallways and corridors of the 10th floor of the Sriwisawa Building demonstrated a reduction in energy consumption by 3.4 kWh per day. Additionally, the system supports integration with IoT devices within the building and can be expanded to control lighting on other floors or areas within the same network. This enhances flexibility and efficiency in energy management. The results indicate that the developed system effectively reduces energy consumption while improving user convenience.

Keywords: Server, Lighting management, WLAN

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบจัดการแสงสว่างอัตโนมัติได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน [1] ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นจากการเปิดทิ้งไว้ โดยการควบคุมการเปิดหรือปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าเป็นวิธีการป้องการการสิ้นเปลืองได้เป็นอย่างดี และเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการแสงสว่างภายในอาคารสำนักงาน และในอาคารขนาดใหญ่ เพื่อพัฒนาให้เป็นอาคารอัจฉริยะ (Smart Building) ที่สามารถบริหารจัดการและควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นการส่งเสริมสนับสนุนให้เป็นส่วนหนึ่งของการยกระดับสู่การเป็นเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ต่อไป

โครงข่าย WLAN (Wireless LAN) เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ด้วยคลื่นวิทยุที่ไม่ต้องอาศัยเครือข่ายอินเทอร์เน็ตภายนอกเป็นลักษณะเครือข่ายปิด (Basic Service Set: BSS) [2] ซึ่งช่วยให้สามารถสั่งงานแบบรวมศูนย์ได้รวดเร็ว และมีความปลอดภัยสูงขึ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ **ESP32** เป็นอุปกรณ์ลูกข่ายควบคุมโหลดแสงสว่างผ่านเครือข่าย WLAN โดยมีเซิฟเวอร์ทำหน้าที่ควบคุมสั่งการแบบรวมศูนย์ ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอถึงแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบจัดการแสงสว่างอัตโนมัติผ่านเครือข่าย WLAN และศึกษาการเชื่อมต่อระหว่างเซิฟเวอร์และอุปกรณ์ลูกข่าย รวมถึงประสิทธิภาพของระบบในการตอบสนองต่อคำสั่ง และความสามารถในการลดพลังงานไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นจากพฤติกรรมการใช้งานของคนในองค์กร เพิ่มความสะดวกแก่หน่วยงาน และได้องค์ความรู้เพื่อนำไปประยุกต์กับการบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าในทั้งอาคารขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

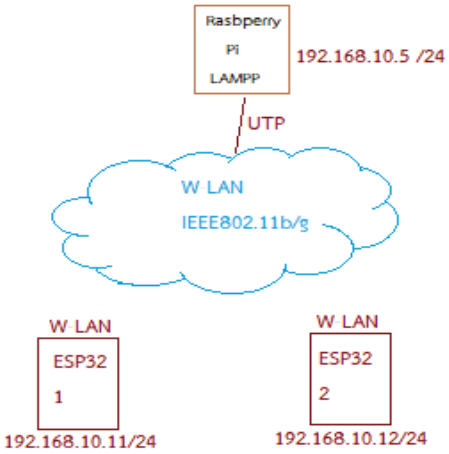
2. การออกแบบและพัฒนาระบบ

2.1 เครือข่าย WLAN

เครือข่าย WLAN เป็นระบบเครือข่ายไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.11 b/g/n ซึ่งอาจเรียกว่า WiFi รองรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไร้สายภายในพื้นที่ต่าง ๆ เช่น บ้าน อาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม โดยไม่ต้องอาศัยอินเทอร์เน็ตภายนอก ซึ่งสามารถป้องกันผู้ไม่ประสงค์ดีเข้ามาโจมตีระบบเครือข่าย ระบบนี้เซิฟเวอร์และอุปกรณ์ลูกข่ายสามารถสื่อสารและส่งข้อมูลระหว่างกันได้โดยตรงผ่านแอ๊กเซสพอยต์ (Access Point) โดยใช้เลขหมายไอพี (IP Address) กำหนดที่อยู่ของอุปกรณ์ในเครือข่าย โดย

2.2 ระบบเครือข่าย

อุปกรณ์แม่ข่ายหรือเซิฟเวอร์ (Server) ซึ่งทำหน้าที่ลงทะเบียนอนุญาตผู้ใช้งานทั้งผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งานทั่วไป การกำหนดเวลาเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่าง และการบันทึกประวัติไว้เป็นฐานของมูลนั้น การออกแบบได้ใช้ Rasbpery Pi 3 ติดตั้งซอฟแวร์ LAMPP (Linux Apache MySQL PHP) เป็นชุดซอฟต์แวร์ที่ให้บริการเวปเซิฟเวอร์ (Web Server) และฐานข้อมูล(Database) โดยระบบจะมีตารางสถานะคำสั่งไว้ให้ ESP32 ร้องขอผ่านมาทางเครือข่าย WLAN เพื่อนำสถานะคำสั่งเปิด-ปิดไปควบคุมโหลดแสงสว่างตามจุดต่าง ๆ ดังลักษณะในรูปที่ 1

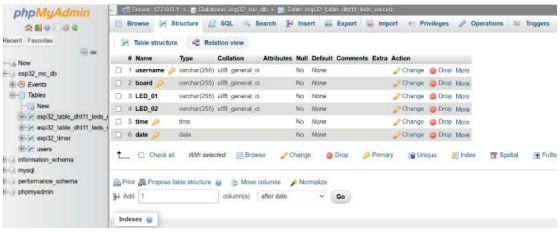


รูปที่ 1 ระบบเครือข่าย WLAN

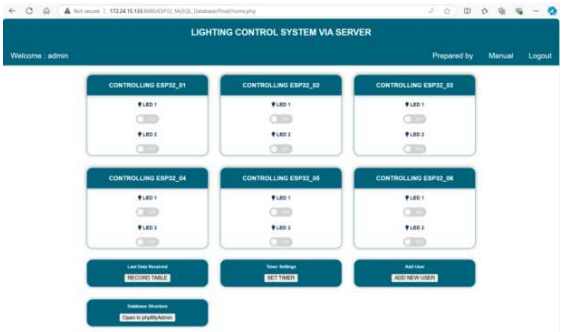
ระบบเครือข่ายได้กำหนดให้เราเตอร์ควบคุมการจัดสรรเลขหมายไอพีคลาส C เลขหมายเครือข่าย 192.168.10.0 /24 โดยกำหนดเลขหมายไอพี 192.168.10.5/24 แก่เซิฟเวอร์ และในส่วนของอุปกรณ์ลูกข่ายซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 มีโมดูลสื่อสารมาตรฐาน IEEE802.11 b/g/n ในตัว สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้โดยกำหนดเลขหมายไอพี 192.168.10.10/24 แก่อุปกรณ์ลูกข่ายตัวที่ 1 และกำหนดเลขหมายไอพี 192.168.10.11/24 แก่อุปกรณ์ลูกข่ายตัวที่ 2 โดยเลขหมายไอพีทั้ง 3 เลขหมายถือว่าอยู่ในเครือข่ายเดียวกัน

ระบบฐานข้อมูลบนเซิฟเวอร์ ได้สร้างฐานข้อมูลด้วย phpMyAdmin เพื่อสร้างตาราง MySQL ซึ่งได้ออกแบบ ให้มี 4 ตาราง คือ 1) UserName สำหรับเก็บข้อมูลผู้ใช้งาน 2) Status สำหรับเก็บสถานะการทำงานของโหลดแสงสว่าง 3) Time สำหรับข้อมูลการตั้งเวลาเปิด ปิดล่วงหน้า 4) History สำหรับเก็บประวัติการใช้งาน

การใช้งานผ่านเวปแอพพลิเคชันผู้ใช้งานต้องกรอกรหัสผ่านเพื่อความปลอดภัย จึงจะสามารถเข้าระบบเพื่อสั่งเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างแต่ละจุดแบบเรียลไทม์ หรือการตั้งค่า วัน เวลาล่วงหน้าเพื่อควบคุมโหลดแสงสว่างให้เปิดหรือปิดตามตารางเวลา



รูปที่ 2 การสร้างฐานข้อมูลใน phpMyAdmin

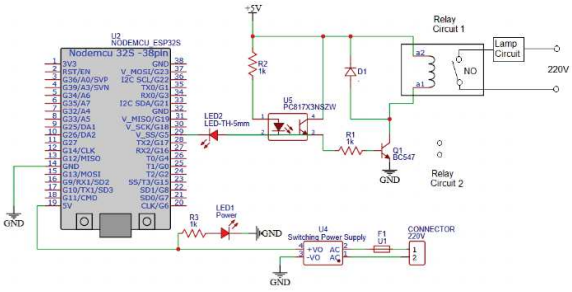


รูปที่ 3 เวปแอพพลิเคชันควบคุมเปิด ปิดโหลดแสงสว่างแบบเรียลไทม์



รูปที่ 4 การตั้งเวลาล่วงหน้าเปิด ปิด โหลดแสงสว่าง

การควบคุมการเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างนั้นจะนำเอาพุตท์ GPIO ของ ESP32 มาควบคุม PC817 เพื่อขับรีเลย์แรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลท์ หน้าสัมผัสขนาด 10 A จำนวน 2 ชุดสำหรับควบคุมโหลดแสงสว่างทางเดินในอาคาร 2 วงจรต่อจุด โดยติดตั้งร่วมกับสวิทช์ควบคุมโหลดแสงสว่างที่มีอยู่เดิม ซึ่งได้ออกแบบให้สามารถเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างได้ทั้ง 2 ระบบ คือ 1) ระบบควบคุมจากเซิฟเวอร์หรือควบคุมผ่านแอพเคชัน 2) ระบบเปิด-ปิดด้วยสวิทช์แบบเดิมในกรณีระบบสื่อสารล่มหรือมีปัญหาไม่สามารถควบคุมจากเซิฟเวอร์ได้ โดยมีลักษณะวงจรดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรขับรีเลย์ควบคุมโหลดแสงสว่างของ ESP32

2.3 การสื่อสารเครือข่าย

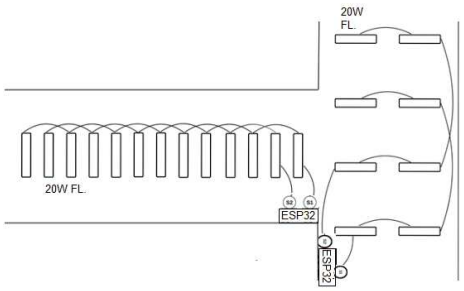
การสื่อสารระหว่างเซิฟเวอร์ซึ่งเป็น Raspberry Pi กับอุปกรณ์ลูกข่าย ESP32 ใช้รูปแบบการสื่อสารด้วยโปรโตคอล HTTP (Hypertext Transfer Protocol) ซึ่งเป็นโครงสร้างของการร้องขอ (Request) และการตอบสนอง (Response) บนเครือข่าย โดยโปรโตคอล HTTP ทำงานอยู่บนชั้นสื่อสาร TCP (Transmission Control Protocol) ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่รับประกันการส่งข้อมูลอย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยมีกระบวนการคือก่อนที่อุปกรณ์จะสามารถสื่อสารกันได้ อุปกรณ์ลูกข่าย ESP32 จะต้องเป็นผู้เริ่มต้นสร้างการเชื่อมต่อ TCP กับเซิฟเวอร์ด้วยพอร์ต 80 เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ อุปกรณ์ลูกข่ายจะส่งคำร้องขอด้วยโปรโตคอล HTTP POST Request ไปยังเซิฟเวอร์เพื่อขอข้อมูลจากฐานข้อมูล เช่น สถานะการเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างของจุดควบคุมของตนเอง เมื่อเซิฟเวอร์ได้รับคำร้องขอก็จะดำเนินการตรวจสอบฐานข้อมูลที่เก็บสถานะคำสั่งเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างของจุดที่ ESP32 ร้องขอมา และจะตอบสนอง HTTP Response กลับไปยังลูกข่าย โดยข้อมูลที่ส่งกลับไปนั้นจะอยู่ในรูปแบบ JSON ซึ่งอุปกรณ์ลูกข่ายจะนำข้อมูลที่ได้รับไปแปลเป็นคำสั่ง On หรือ Off เพื่อใช้ควบคุมขา GPIO เอาท์พุตขับรีเลย์ให้เปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างตามสถานะที่ได้ถูกกำหนดจากเซิฟเวอร์ หลังจากการสื่อสารระหว่างเซิฟเวอร์และอุปกรณ์ลูกข่ายเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว เซิฟเวอร์จะทำการปิดการเชื่อมต่อ TCP เพื่อให้สิทธิ์แก่อุปกรณ์ลูกข่ายตัวอื่น ๆ หรืออุปกรณ์ลูกข่ายเดิมในรอบถัด ๆ ไป



รูปที่ 6 การสื่อสารของเซิฟเวอร์และอุปกรณ์ลูกข่าย

3. ผลการทดลอง

การทดลองและทดสอบระบบจัดการแสงสว่างบนเครือข่าย WLAN ได้ติดตั้งเพื่อควบคุมโหลดแสงสว่างบริเวณห้องโถงและทางเดินชั้น 10 อาคารศรีวิศวเวทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ โดยมีจุดติดตั้งอุปกรณ์ลูกข่ายจำนวน 2 จุด แต่ละจุดมีการควบคุมโหลดแสงสว่าง 2 วงจร โดยจุดที่ 1 วงจรที่ 1 ควบคุมหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 20 วัตต์จำนวน 7 หลอดและวงจรที่ 2 จำนวน 6 หลอด ส่วนจุดที่ 2 วงจรที่ 1 ควบคุมโหลดจำนวน 4 หลอดและวงจรที่ 2 จำนวน 4 หลอด ดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 จุดติดตั้งและวงจรโหลดแสงสว่าง

การติดตั้งตัวกระจายสัญญาณ WLAN หรือสัญญาณ WiFi และอุปกรณ์ลูกข่าย ESP32 นั้น มีระยะทางประมาณ 10 เมตร วัดค่าความแรงของสัญญาณ RSSI (Received Signal Strength Indicator) ซึ่งบ่งบอกความแข็งแรงของสัญญาณ WLAN ได้ -60 dBm ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับเกณฑ์ดี และได้ดำเนินการทดสอบระยะเวลาการส่งและตอบกลับข้อมูลระหว่างเซิฟเวอร์กับอุปกรณ์ลูกข่ายหรืออัตราการหน่วง (Latency) ด้วยการ ping จำนวน 50 ครั้ง สามารถสื่อสารได้ทั้ง 50 ครั้งไม่มีการสูญเสียของข้อมูล โดยมีค่าอัตราการหน่วงเฉลี่ย 64 มิลลิวินาที



รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ลูกข่ายร่วมกับสวิทช์เดิม

จากการทดสอบการใช้งานของระบบจัดการแสงสว่างด้วยเซิฟเวอร์บนเครือข่าย WLAN พบว่าผู้ใช้งานสามารถสั่งการเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างของแต่ละจุดและแต่ละวงจรผ่านทางเวปแอปพลิเคชันได้ตามความต้องการ โดยมีค่าการหน่วงของการสั่งเปิด หรือ ปิด จากอุปกรณ์ลูกข่ายตอบสนองการเปิดหรือปิดอยู่ที่เวลาเฉลี่ย 1.5 วินาที เนื่องจากมีการโปรแกรมให้ EPS32 มีการร้องขอข้อมูลจากเซิฟเวอร์ทุก ๆ 1 วินาทีต่อรอบ ส่วนการทดสอบเปิดหรือปิดโหลดแสงสว่างอัตโนมัติตามวันเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งกำหนดให้เปิดเวลา 18:00 น.และปิดเวลา 20.30 น. ของทุก ๆ วัน การตั้งค่าวันและเวลาจะถูกบันทึกในฐานข้อมูลของเซิร์ฟเวอร์ เพื่อเป็นเงื่อนไขในการปรับเปลี่ยนสถานะของโหลดแสงสว่างในตารางฐานข้อมูล พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเปรียบเทียบกับกรณีเดิมที่โหลดแสงสว่างถูกเปิดทิ้งไว้ตลอดทั้งคืนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงต่อคืน ระบบจัดการโหลดแสงสว่างนี้ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 3.4 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อวัน หรือประมาณ 102 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อเดือน หากคิดอัตราค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง จะสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 4,800 บาทต่อปีต่อชั้น นอกจากนี้ยังได้ออกแบบให้สามารถควบคุมผ่านโมบายแอปพลิเคชันผ่านเครือข่าย WLAN เพื่อเพิ่มความสะดวกให้กับผู้ใช้งาน ทำให้สามารถควบคุมระบบแสงสว่างจากตำแหน่งใดก็ได้ในอาคารกรณีมีกิจกรรมที่นอกเหนือจากตารางเวลา โดยหากมีการ ขยายเครือข่ายให้ครอบคลุมพื้นที่ไปยังชั้นอื่น ๆของอาคาร ยิ่งทำให้ผู้ดูแลระบบไฟฟ้ามีความสะดวกยิ่งขึ้นในการจัดการระบบแสงสว่างในอาคารขนาดใหญ่

3. สรุป

ระบบจัดการโหลดแสงสว่างด้วยเซิฟเวอร์บนเครือข่าย WLAN ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้จริง ตอบสนองการควบคุมการเปิด หรือปิดโหลดแสงสว่างของอาคารขนาดใหญ่ ด้วยการควบคุมผ่านทางเวปแอพพลิเคชันและด้วยโมบายแอพพลิเคชันแบบเรียลไทม์ รวมทั้งสามารถควบคุมการเปิดหรือปิดตามเวลาที่กำหนดด้วยเซิฟเวอร์ ช่วยลดพลังงานไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นจากพฤติกรรมของผู้ใช้งานที่มักจะเปิดทิ้งไว้ เพิ่มความสะดวกให้กับเจ้าหน้าที่ในการดูแลและบริหารจัดการระบบแสงสว่างแบบรวมศูนย์ในอาคารขนาดใหญ่ ระบบยังได้ออกแบบให้สามารถเพิ่มจำนวนจุดควบคุมไปยังชั้นอื่น ๆ ของอาคารยิ่งทำให้สามารถลดพลังงานไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นลงได้อีกตามจำนวนจุดหรือกำลังไฟฟ้าที่ใช้ นอกจากนี้ในอนาคตยังสามารถเพิ่มเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวของผู้คนที่งานอยู่ในอาคาร จะช่วยให้ระบบจัดการแสงสว่างมีความยืดหยุ่นหรือยืดเวลาในการปิดโหลดแสงสว่างได้ดีขึ้นตามลักษณะการใช้งานจริงที่อาจจะเปลี่ยนไปแทนการปิดตามเวลาที่กำหนดไว้เพียงอย่างเดียว

เอกสารอ้างอิง

[1] กันตินันท์ ล้านภูเขียว ชนาธิป สุขสมสิน ปิติภัทร ปิ่นบุตร พรทวี ชัยคำ พรเทพ ยโสธร สุกฤษฎิ อินทโชติ ณัฐชามญช์ ศรีจำเริญรัตนา, "การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไร้สายเพื่อควบคุมแสงสว่าง," *งานประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*

[2] 9HUA Trianing.Wireless LAN.https://www.9huatraining.com /post/wireless-lan

[3] สัญญา ผาสุข. (2562). การควบคุมพลังงานไฟฟ้าภายในบ้านด้วยเลขหมายไอพีบนเครือข่าย WiFi. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 11* (น.185-188).

[4] Rui Santos. (2023). Control ESP32 and ESP8266 GPIOs from Anywhere in the World. https://randomnerdtutorials.com/ controlesp32-esp8266-gpios-from-anywhere/

[5] P. Kumar and U. Pati," Arduino and Raspberry Pi based Smart Communication and Control of Home Appliance System" in international Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET),2016.



ผศ.สัญญา ผาสุข สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา 90000. Email: sunya.p@rmutsv.ac.th



ดร.มารุต รักษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา 90000. Email: marut.r@rmutsv.ac.th



พรชัย แคล้วอ้อม สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา 90000. Email: pornchai.k@rmutsv.ac.th



ผศ.ดร จินดา สามัคคี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา 90000. Email: chinda.s@rmutsv.ac.th

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลกระทบทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม จากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานหมุนเวียน: การเปรียบเทียบระหว่างการผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์กับเชื้อเพลิงชีวมวล

The Socioeconomic and Environmental Impacts of Renewable Electricity Generation: A Comparison of Solar PV and Biomass-Based Electricity Generation

ปิฎก ค้าโค[1*] และ อำนาจ ผดุงศิลป์[2]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
E-mail: pidokkako@gmail.com*

บทคัดย่อ

จากการปรับปรุงแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan: PDP2018) พลังงานแสงอาทิตย์ถูกวางเป้าหมายให้เป็นแหล่งไฟฟ้าหลักจากพลังงานหมุนเวียนตามด้วยพลังงานชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์มีต้นทุนที่ต่ำและค่อนข้างเหมาะสมกับที่ตั้งของประเทศไทย หากแต่มีโครงสร้างต้นทุนที่ใช้ทุนเป็นหลัก (Capital Intensive) ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับประเทศผู้นำเข้าเทคโนโลยีเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่การใช้ชีวมวลเป็นการสร้างรายได้ภายในประเทศแต่ต้องแลกมาด้วยต้นทุนและผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมตลอดห่วงโซ่อุปทาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ สังคม และสิ่งแวดล้อม จากการผลิตไฟฟ้าด้วยแผงโซลาร์เซลล์ (Photovoltaic: PV) และเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยแบบจำลองปัจจัยการผลิตและผลผลิต (Input-Output: I-O) เพื่อหาผลกระทบต่อประเทศและเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างพลังงานสองประเภท ผลการศึกษาพบว่าเมื่อรวมผลการทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วการผลิตไฟฟ้าจาก PV สร้างมูลค่าเพิ่ม (Gross Domestic Product: GDP) และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้มากกว่า ส่วนพลังงานชีวมวลสามารถสร้างงานได้มากกว่า

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานชีวมวล, ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์และสังคม, ก๊าซเรือนกระจก, แบบจำลองปัจจัยการผลิตและผลผลิต

Abstract

From the latest version of the Power Development Plan (PDP2018), solar energy is targeted to be the main source of electricity from renewable energy, followed by biomass energy. Despite a decent cost-effectiveness and locational suitability of solar PV, its capital reliance in the context of the technology-importer country is worth questioning. On the other hand, biomass is domestically produced, and its use would considerably create jobs and distribute income toward farmers, yet logistics could be costly and eco-unfriendly. This study applied an input-output (I-O) analysis to quantify the impacts of electricity generation from solar PV farms and biomass on employment generation, gross domestic product (GDP), and greenhouse gases (GHG). By considering the effects of fossil fuel displacement, a comparison shows that solar PV offers slightly higher GDP and GHG savings, while biopower creates higher jobs.

Keywords: solar energy, biomass energy, socioeconomic impact, greenhouse gases, input-output (I-O) model

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 2020 แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan: PDP2018) มีเป้าหมายที่จะเพิ่มกำลังติดตั้งการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนระหว่างปี ค.ศ. 2018-2037 ประมาณ 18.7 GW โดยส่วนใหญ่เป็นพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลประมาณ 12 และ 3.5 GW [1] ตามลำดับ พลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉพาะ PV ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากทั่วโลก เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยที่ต่ำมาก เช่น ประเทศจีนและอินเดียในปี ค.ศ. 2022 มีต้นทุนใกล้เคียงกันอยู่ที่ 0.037 US$/kWh ซึ่งลดลงมาจาก 0.2 US$/kWh ในปี ค.ศ. 2012 [2] อย่างไรก็ตาม โครงสร้างต้นทุนที่เน้นทุน (Capital Intensive) อาจส่งผลกระทบที่แตกต่างจากการผลิตไฟฟ้าชีวมวลที่เน้นแรงงาน (Labor Intensive) ซึ่งอาจสร้างงานได้มากกว่า แต่ต้องแลกมาด้วยต้นทุนและผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมตลอดห่วงโซ่อุปทาน

เนื่องจากผลกระทบจากการใช้พลังงานหมุนเวียนประเภทต่าง ๆ มีความแตกต่างกันไปตามเทคโนโลยีที่ใช้และบริบทของแต่ละประเทศ การประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมในระดับมหภาคมีประโยชน์อย่างมากในการกำหนดทิศทางการใช้พลังงานหมุนเวียนประเภทต่าง ๆ จากการศึกษาในอดีตพบว่าแบบจำลอง I-O

(Input-Output Model) ได้รับความนิยมอย่างมากในการประเมินผลกระทบจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจต่อระบบเศรษฐกิจมวลรวม เช่น การประเมินผลกระทบการจ้างงานจากการผลิตไฟฟ้า PV [3] และการประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์มหภาคจากการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ [4]

จากความสำคัญของพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลในแผนพัฒนาพลังงานของประเทศไทย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ สังคม และสิ่งแวดล้อม ทางด้าน Gross Domestic Product (GDP) จำนวนการจ้างงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการผลิตไฟฟ้าจาก PV และเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยแบบจำลอง I-O เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบนโยบายสนับสนุนพลังงานหมุนเวียนให้เหมาะสมภายใต้บริบทของประเทศ

2. การวิเคราะห์ปัจจัยการผลิตและผลผลิต

2.1 ตารางปัจจัยการผลิตและผลผลิต

ตาราง I-O เป็นฐานข้อมูลสำคัญในการใช้แบบจำลอง I-O โดยข้อมูลในตารางคือความสัมพันธ์ของปัจจัยการผลิตและผลผลิตระหว่างภาคส่วนในเศรษฐกิจ โดยมีทั้งหมด 180 ภาคส่วน และเผยแพร่ฉบับล่าสุดเป็นตาราง I-O ที่เป็นข้อมูลปี ค.ศ. 2015 หรือ I-O 2015 [5]

ตารางที่ 1 ตัวอย่างตารางปัจจัยการผลิตและผลผลิต

จาก \ ถึง		ปัจจัยการผลิต 1	2	3	อุปสงค์ขั้นสุดท้าย (F)	ผลผลิตรวม
ปัจจัยการผลิต	1	z11	z12	z13	F1	X1
	2	z21	z22	z23	F2	X2
	3	z31	z32	z33	F3	X3
มูลค่าเพิ่ม (V)		V1	V2	V3		
นำเข้า (M)		M1	M2	M3		
ผลผลิตรวม		Z1	Z2	Z3		

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างตาราง I-O ประกอบด้วย 3 ภาคส่วน โดยปัจจัยการผลิตและผลผลิตในแต่ละภาคส่วนถูกจัดอยู่ในคอลัมน์และแถว ตามลำดับ เช่น ข้อมูลตัวเลขในตาราง z11 คือมูลค่าปัจจัยการผลิตของภาคส่วนที่ 1 ได้มาจากภาคส่วนที่ 1 ส่วน z13 คือผลผลิตจากภาคส่วนที่ 1 ใช้เป็นปัจจัยการผลิตในภาคส่วนที่ 3 โดยเมื่อ z11 z12 และ z13 รวมกับผลผลิตที่ใช้สำหรับอุปสงค์ขั้นสุดท้าย (F1) จะเท่ากับผลผลิตทั้งหมด (X1)

2.2 แบบจำลองปัจจัยการผลิตและผลผลิต

การคำนวณของแบบจำลองเริ่มจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การผลิต (Technical/Input Coefficients) จากสมการดังนี้

$$a_{ij} = z_{ij}/Z_j \quad (1)$$

โดยที่ z_{ij} คือมูลค่าปัจจัยการผลิตจากภาคส่วน i ที่ใช้ผลิตสินค้าและบริการในภาคส่วน j และ Z_j คือ มูลค่าผลผลิตของภาคส่วน j ดังนั้น a_{ij} คือ สัดส่วนของมูลค่าปัจจัยการผลิตจากภาคส่วน i ต่อมูลค่าผลผลิต j หรือเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การผลิต

$$X = AX+F \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 กำหนดให้ A เป็นเมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์การผลิตที่รวมค่าสัมประสิทธิ์การผลิตจาก 180 แถว 180 คอลัมน์ ซึ่งเมื่อคูณกับผลผลิตในภาคส่วนใด ๆ และบวกกับอุปสงค์ขั้นสุดท้ายของภาคส่วนนั้นจะได้ผลผลิตในภาคส่วนนั้น ๆ

$$\Delta X = (I-A)^{-1}\Delta F \quad (3)$$

เพื่อหาผลกระทบจากอุปสงค์ขั้นสุดท้ายของภาคส่วนต่าง ๆ ซึ่งหมายถึงการผลิต (F) ต่อผลผลิตรวม (X) สมการที่ 2 ถูกจัดให้อยู่ในรูปของสมการที่ 3 โดยใช้เมทริกซ์เอกลักษณ์ ผลรวมจากทุกแถวในคอลัมน์ใด ๆ ในเมทริกซ์ $(I-A)^{-1}$ คือผลผลิตรวมที่เปลี่ยนแปลง (ΔX) เมื่อมีการผลิตสินค้าและบริการจากภาคส่วนนั้น ๆ (ΔF) หนึ่งหน่วย ซึ่งสามารถแปลงเป็นผลกระทบต่อ GDP การนำเข้า จำนวนการสร้างงาน และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยการคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวชี้วัดนั้น ๆ

$$l = L/X \quad (4)$$

สมการที่ 4 เป็นตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การจ้างงาน (l) ซึ่งเป็นสัดส่วนของจำนวนแรงงานในภาคส่วนใด ๆ (L) ต่อมูลค่าผลผลิตในภาคส่วนนั้น ๆ (X) ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวชี้วัดใด ๆ ของทุกภาคส่วนถูกรวมอยู่ในรูปของเวกเตอร์และคูณกับ สมการที่ 3 เพื่อแปลงผลผลิตที่เปลี่ยนไป (ΔX) เป็นผลกระทบต่อตัวชี้วัดนั้น ๆ โดยจำนวนแรงงาน (คน) และก๊าซเรือนกระจก (CO_2e) ในแต่ละภาคส่วนอ้างอิงจาก [6], [7] ส่วนมูลค่าเพิ่ม (V) หรือ GDP และการนำเข้า (M) ต่อมูลค่าผลผลิต (X) ในแต่ละภาคส่วนมีอยู่ในตาราง I-O

2.3 การเก็บและเตรียมข้อมูล

เนื่องจากการผลิตไฟฟ้าด้วยสัดส่วนเชื้อเพลิงการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน (Electricity Mix: EM) หรือ ภาคส่วนการไฟฟ้า ที่มีอยู่ในตาราง I-O 2015 ดั้งเดิมนั้นไม่สามารถแยกเป็นภาคส่วนย่อยตามประเภทของแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ ภาคส่วนใหม่ 4 ภาคส่วน

จึงถูกสร้างเพิ่มในตาราง I-O โดยใช้ข้อมูลใหม่เพื่อจำลองให้มีอยู่ในระบบเศรษฐกิจจริง ได้แก่ ภาคส่วนการผลิตไฟฟ้า PV และภาคส่วนการผลิตไฟฟ้าชีวมวล (Biopower: BP) โดยแยกเป็น 3 ภาคส่วน ตามพืช 3 ชนิด ที่มีศักยภาพของชีวมวลสำหรับกำลังผลิตไฟฟ้าสูงที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ข้าว (R) ข้าวโพด (M) และอ้อย (S) [8]

ข้อมูลที่ใช้สร้างภาคส่วน PV อ้างอิงปัจจัยการผลิตจาก [2] โดยใช้ต้นทุนเฉลี่ยของประเทศจีนและอินเดียเนื่องจากเป็นประเทศที่มีการใช้ในเชิงพาณิชย์ มีต้นทุนที่ต่ำ มีค่าศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ใกล้เคียงกับของประเทศไทย [9] เพื่อสะท้อนโครงสร้างต้นทุนที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตอันใกล้ของประเทศไทยที่กำลังการผลิตไฟฟ้า PV อาจเพิ่มขึ้นอย่างมากและส่งผลให้ต้นทุนลดลงใกล้เคียงกับของสองประเทศดังกล่าว โดยอ้างอิงจำนวนพนักงานของโรงไฟฟ้า PV ขนาด 5 MW ในประเทศไทย [10] และอัตราเงินเดือนเดียวกันกับของโรงไฟฟ้าชีวมวล

ต้นทุนคงที่และค่าแรงงานภาคส่วน BP อ้างอิงจากโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 10 MW ในประเทศไทย [11] ต้นทุนค่าจัดหาชีวมวลประกอบไปด้วยค่าชีวมวลจากราคารับซื้อเฉลี่ย [12] อ้างอิงค่าความร้อน [8] โดยปรับตามสัดส่วนน้ำหนักแห้งของชีวมวลที่รับซื้อ ค่าอัดก้อน ค่าบรรทุกและขนส่ง และค่าเก็บรักษา [13]

โรงไฟฟ้า PV ใช้สมมุติฐานอัตรา Capacity Factor (CF) ประมาณร้อยละ 16 และอายุโครงการ 25 ปี [2] เพื่อคำนวนต้นทุนต่อ kWh ส่วนโรงไฟฟ้า BP มีอัตราประสิทธิภาพร้อยละ 23 [13] อายุโครงการ 20 ปี และอัตรา CF ร้อยละ 90 [14]

ผลกระทบจากการผลิตไฟฟ้าด้วยสัดส่วนเชื้อเพลิงการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน (EM) หรือ ภาคส่วนการไฟฟ้าที่มีอยู่ในตาราง I-O ดั้งเดิม จะได้รับการประเมินเป็นผลการทดแทนจากการผลิตไฟฟ้า PV และ BP โดยใช้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าประมาณ 3 บาท/kWh [15]

2.4 ขอบเขตและข้อจำกัด

จากแหล่งข้อมูลโครงสร้างต้นทุนส่วนใหญ่ที่ใช้ ขอบเขตการประเมินครอบคลุมโรงไฟฟ้าขนาด 5-10 MW ในประเทศไทย ซึ่งอาจมีสัดส่วนต้นทุนค่าพนักงานและต้นทุนต่อหน่วยผลิตไฟฟ้าที่สูงกว่าโรงไฟฟ้าที่มีกำลังผลิตที่สูงกว่า การใช้ข้อมูลจากต่างประเทศบางส่วนนั้นเป็นการสะท้อนต้นทุนที่อาจเกิดขึ้นในประเทศไทยเมื่อกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น

การประเมินใช้ข้อมูลหลักจากตาราง I-O และโครงสร้างต้นทุนของภาคส่วน PV และ BP ซึ่งเป็นข้อมูลในอดีตในการประเมินผลกระทบ ข้อมูลเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุปสงค์และอุปทาน เทคโนโลยี และค่าแรงงาน เป็นต้น โดยเฉพาะค่าชีวมวลที่มีความผันผวนได้ระหว่างปี ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้แบบจำลองและการใช้สมมุติฐานเพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในอนาคตอยู่นอกเหนือขอบเขตการศึกษานี้

3. ผลการศึกษา

ตารางที่ 2 ผลกระทบต่อการจ้างงาน GDP และก๊าซเรือนกระจก

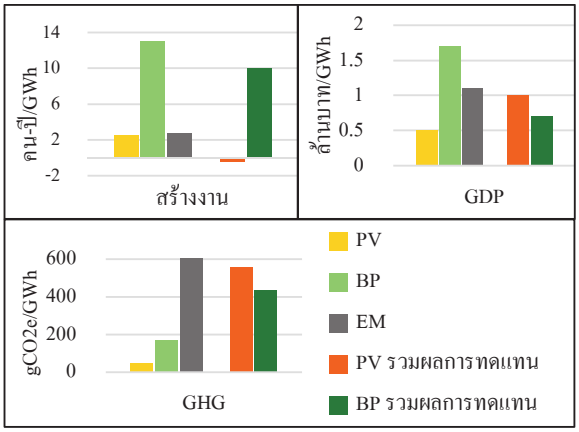
ภาคส่วน / ผลกระทบ	PV	BP			EM
		R	M	S	
สร้างงาน (คน-ปี/ล้านบาท)	1.8	4.6	4.7	4.6	0.9
สร้างงาน (คน-ปี/GWh)	2.5	13.6	13.2	12.6	2.7
สร้างงานสุทธิ รวมผลการทดแทน	-0.2	10.9	10. 5	9.8	
GDP (ล้านบาท/GWh)	1.2	2.8	2.7	2.7	2.4
นำเข้า	0.7	1	1.1	1	1.3
GDP สุทธิ	0.5	1.8	1.6	1.6	1.1
ต้นทุน	1.4	3	2.8	2.7	3
ส่วนต่าง	1.6	0	0.2	0.3	
GDP สุทธิ รวมผลการทดแทน	1	0.7	0.7	0.8	
GHG (gCO_2e/kWh)	46	177	170	164	606
GHG saving รวมผลการทดแทน	561	429	436	443	

จากตารางที่ 2 พบว่าผลกระทบต่อการจ้างงานของการผลิตไฟฟ้า PV หนึ่งล้านบาทสามารถสร้างงานได้ 1.8 คนตลอดระยะเวลา 1 ปี (คน-ปี) หรือ 2.5 คน-ปี/GWh เมื่อคูณกับต้นทุนไฟฟ้า 1.4 บาท/kWh ในขณะที่การผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงชีวมวล (BP) สร้างงานได้ 4.6–4.7 คน-ปี/ล้านบาท หรือ 12.6–13.6 คน-ปี/GWh และการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบัน (EM) สร้างงานได้ 0.9 คน-ปี/ล้านบาท หรือ 2.7 คน-ปี/GWh

ด้วยโครงสร้างต้นทุนที่ต่างกัน ภาคส่วน BP สร้างงานได้กว่าสองเท่าของภาคส่วน PV ที่มูลค่าเท่ากัน และภาคส่วน PV สร้างงานได้เป็นสองเท่าของภาคส่วน EM ที่มูลค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าที่ต่ำกว่า การจ้างงานของภาคส่วน PV สุทธิลดลง 0.2 คน-ปี/GWh ในขณะที่ของภาคส่วน BP เป็น 9.8–10.9 คน-ปี/GWh เมื่อรวมผลการทดแทน

การสร้าง GDP ต่อมูลค่าการผลิตไฟฟ้าหนึ่งล้านบาทมีความแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อคูณกับต้นทุนการผลิตไฟฟ้าแล้ว ภาคส่วน PV BP และ EM สร้างมูลค่าเพิ่มได้ 1.2 2.7–2.8 และ 2.4 ล้านบาท/GWh ตามลำดับ และนำเข้า 0.7 1–1.1 และ 1.3 ล้านบาท/GWh ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 58 37 และ 54 ของมูลค่าเพิ่มที่สร้าง ตามลำดับ ดังนั้น มูลค่าเพิ่มสุทธิจึงเป็น 0.5 1.6–1.8 และ 1.1 ล้านบาท/GWh ตามลำดับ เมื่อหักลบผลการทดแทน 1.1 ล้านบาท/GWh และส่วนต่างต้นทุนแล้ว การสร้างมูลค่าเพิ่มสุทธิจากภาคส่วน PV และ BP กลายเป็น 1 และ 0.7–0.8 ล้านบาท/GWh ตามลำดับ

การผลิตไฟฟ้า PV ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 46 gCO_2e/kWh ซึ่งคิดเป็นเพียงร้อยละ 28 ของภาคส่วน BP ที่ปล่อยประมาณ 170 gCO_2e/kWh เมื่อเปรียบเทียบกับของภาคส่วน EM ที่ 606 gCO_2e/kWh ภาคส่วน PV และ BP สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึงประมาณ 560 และ 440 gCO_2e/kWh ตามลำดับ เมื่อรวมผลการทดแทน



รูปที่ 1 สรุปผลกระทบการสร้างงาน GDP และ GHG

จากผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากการศึกษา รูปที่ 1 ได้รวบรวมภาพรวมของผลลัพธ์การสร้างงาน GDP และ GHG จากการผลิตไฟฟ้า PV BP และ EM ทั้งก่อนและหลังรวมผลการทดแทน

4. สรุป

การศึกษาใช้แบบจำลองทางด้านเศรษฐศาสตร์มหภาค (I-O) ประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์ สังคม และสิ่งแวดล้อม จากการผลิตไฟฟ้า PV ที่เป็น Capital Intensive และชีวมวลที่เป็น Labor Intensive ภายใต้บริบทของประเทศไทย เมื่อรวมผลการทดแทนการผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันแล้ว พลังงาน PV สร้าง GDP สุทธิได้ 1 ล้านบาท/GWh ซึ่งสูงกว่าของพลังงานชีวมวลที่สร้างได้ 0.7–0.8 ล้านบาท/GWh เนื่องจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้า PV ที่ต่ำกว่ามาก นอกจากนี้ พลังงาน PV ยังลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 560 gCO_2e/kWh ซึ่งสูงกว่าของพลังงานชีวมวลที่ลดได้ 440 gCO_2e/kWh ในทางกลับกัน พลังงานชีวมวลสามารถสร้างงานได้ประมาณ 10 คน-ปี/GWh ในขณะที่พลังงาน PV ส่งผลให้การจ้างงานลดลง 0.2 คน-ปี/GWh

เอกสารอ้างอิง

[1] EPPO, "Thailand Power Development Plan 2018-2037 (PDP2018)," 2019. [Online]. Available: http://www.eppo.go.th/images/POLICY/PDF/PDP2018.pdf

[2] International Renewable Energy Agency, "Renewable Power Generation Costs in 2022." [Online]. Available: https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022

[3] D. G. Loomis, J. H. Jo, and M. R. Aldeman, "Economic impact potential of solar photovoltaics in Illinois," *Renew Energy*, vol. 87, pp. 253–258, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.021.

[4] B. Wicke, E. Smeets, A. Tabeau, J. Hilbert, and A. Faaij, "Macroeconomic impacts of bioenergy production on surplus agricultural land-A case study of Argentina," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2463–2473, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2009.05.010.

[5] NESDC, "ตารางปัจจัยการผลิตและผลผลิต," สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. [Online]. Available: https://www.nesdc.go.th/main.php?filename=io_page

[6] ธนาคารแห่งประเทศไทย, "ภาวะการทำงานของประชากร จำแนกตามประเภทธุรกิจ." [Online]. Available: https://app.bot.or.th/BTWS_STAT/statistics/BOTWEBSTAT.aspx?reportID=638&language=th.

[7] "THAILAND'S FOURTH BIENNIAL UPDATE REPORT," 2023. Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.onep.go.th/book/thailands-fourth-biennial-update-report/

[8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "ศักยภาพชีวมวลในประเทศ." Accessed: Sep. 30, 2024. [Online]. Available: https://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html

[9] Global Solar Atlas, "Global Photovoltaic Power Potential by Country." Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: https://globalsolaratlas.info/global-pv-potential-study

[10] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก,"รายงานการตรวจสอบความใช้ได้ (Validation Report)," 2022. [Online]. Available: https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-database-and-statistics/t-ver-registered-project/item/2924-k-one-energy-2-company-limited-nong-bunmak.html

[11] S. Mantanacharu, "A valuation of biomass power plant: case study of Burirum energy power plant," 2014. Accessed: Sep. 29, 2024. [Online]. Available: https://digital.library.tu.ac.th/tu_dc/frontend/Info/item/dc:143657

[12] Absolute Clean Energy Public Company Limited,"โรงไฟฟ้าพลังงานสะอาดเถิน." Accessed: Sep. 30, 2024. [Online]. Available: https://www.facebook.com/cleanpower.thoen

[13] M. K. Delivand, M. Barz, and S. H. Gheewala, "Logistics cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand," *Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1435–1441, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.01.026.

[14] Y. Kanchanaroek, O. Meangbua, and T. Rattanakaew, "Cost-Benefit Analysis of agricultural waste management methods," 2023. Accessed: Sep. 29, 2024. [Online]. Available: https://www.agripolicyresearch.com/?p=5839

[15] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, "อัตราค่าไฟฟ้า." Accessed: Sep. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.egat.co.th/home/egat-price/

An Examination of Functionality Renewable Microgrids: Khlong Ruea, Thailand

Montri Ngao-det[1], Jutturit Thongpron[1], Anon Namin[1], Nopporn Patcharaprakiti[1], Worrajak Muangjai[1], Naris Khampangkaew[1], Kittinun Srasuay[1], Nattawat Panlawan[1], Kan nakaiam[1],and Teerasak Somsak[1*]

[1*] Clean Energy System (CES-RMUTL), Division of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna
E-mail: dhirasak@rmutl.ac.th[*]

Abstract

This research examines the functionality of a renewable microgrid in Khlong Ruea, Thailand, focusing on the integration of photovoltaic (PV) and battery storage systems to address energy security challenges in rural areas. The study investigates a hybrid AC/DC microgrid configuration designed for the community, which currently relies on a hydroelectric generator and a diesel generator. The proposed system incorporates a 48 kWh battery, a 20 kW solar panel system, and a 48 kW diesel engine, managed by a sophisticated control system. The investigation assesses the system's power generation, storage, and distribution capabilities, referencing IEEE standards for safety and reliability. Performance metrics such as power quality, efficiency, and reliability were evaluated through experimental tests, including the system's response during black start events when transitioning from diesel to battery power. The findings contribute to the development of sustainable energy solutions for rural communities facing similar energy challenges.

Keywords: renewable energy, microgrid, photovoltaic, battery, sustainable

1. Introduction

Climate change and energy security challenges are significant global concerns, with greenhouse gas emissions from fossil fuel-based energy sectors being a primary driver of global warming [1]. United Nations (UN) data indicates a consistent increase in global carbon dioxide emissions over the past decade [2]. The transition to renewable energy sources is imperative to mitigate these impacts [3]. Renewable microgrids possess the potential to enhance energy system sustainability and resilience [4]. The application of solar photovoltaic technology and energy storage systems presents a crucial alternative [5]. Research and development in this domain are vital for achieving clean energy goals [6]. Solar energy utilization for electricity generation offers a pathway to reduce reliance on fossil fuels [7]. The development of efficient energy storage solutions is essential for maintaining microgrid stability [8]. Evaluating the socio-economic impacts of microgrids is crucial for effective implementation planning [9]. Supportive policies and regulations are critical factors in promoting renewable energy adoption [10].

In Thailand, particularly within rural areas energy security challenges are exacerbated [11]. These communities often face unstable and costly electricity access [12]. Reliance on diesel generators as a primary power source contributes to environmental and public health concerns [13]. Insufficient energy infrastructure impedes socio-economic development in these regions [14]. Solar photovoltaic and energy storage systems can address these issues [16]. Developing renewable microgrids in these areas is therefore critical [17]. Community engagement in planning and implementation is essential for project success [18]. Government and private sector support is necessary to promote renewable energy adoption in rural regions [19]. Evaluating the socio-economic impacts of microgrids within the Thai context is vital [20].

The primary objective of this research is to examine the functionality investigation of renewable microgrids in Khlong Ruea, Thailand, focusing on the integration of photovoltaic and energy storage systems. This study will contribute to the development of sustainable energy solutions for rural communities in Thailand and similar regions.

2. System Configuration

2.1 Site information

Figure 1 depicts Khlong Ruea Village, situated at 9°41′19.4274″ N, 98°40′9.48″ E in Pato district, Chumphon province, at 220–260 m above sea level. The community is distant and without power plant electricity. In 2024, the village had 306 residents and 81 homes, most of whom worked in agriculture. Khlong Ruea Village lies atop a hill with different heights. The mountain town is surrounded by greenery. The terrain is difficult, yet it allows for a microgrid layout that uses local resources. A community-specific microgrid is possible in Khlong Ruea Village due to its location and geography. Due to the difficult terrain and abundant natural resources, microgrids can be reliable, sustainable, and cost-effective.

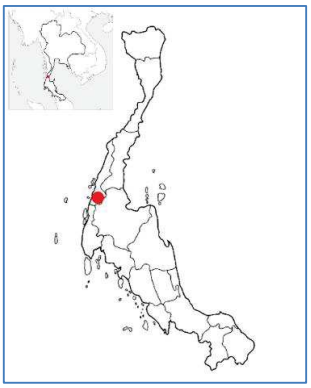


Fig. 1 Khlong Ruea Village, Thailand Location.

2.2 Proposed configuration system

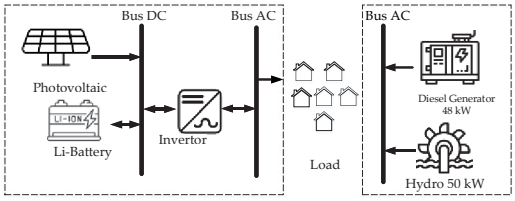


Fig. 2 Microgrid hybrid configuration

Hybrid AC/DC microgrid architecture is used. The DC Bus integrates the PV system with battery storage, whereas the AC Bus powers the load and integrates conventional generating. Power flow and voltage adjustment are easy thanks to the inverter's DC-AC interface.

A sophisticated control system may optimize energy source use based on load demand, solar irradiance, battery state-of-charge, and grid circumstances. It would maximize renewable energy, limit diesel generator use, and offer a stable and reliable power supply to the load.

3. Functionality Investigation of Renewable Microgrids

This section provides a detailed exploration of investigating the functionality of renewable microgrids with PV and battery systems, incorporating IEEE standards and similar guidelines, with step-by-step instructions and an equation, as requested.

Renewable microgrids are localized power systems that integrate renewable energy sources, such as photovoltaic (PV) panels, with energy storage like batteries, to provide reliable electricity. They can operate independently (islanded mode) or connected to the main grid, offering solutions for remote areas, campuses, or communities seeking sustainable energy. The functionality investigation focuses on assessing how well these systems perform in terms of power generation, storage, distribution, and meeting load demands, while adhering to established standards.

Safety, reliability, and interoperability depend on IEEE standards, especially IEEE Power and Energy Society standards. IEEE 1562-2021, IEEE 2030.7-2017, and IEEE 2030.8-2018 are important standards for sizing stand-alone PV systems, microgrid controller requirements, and testing. Table 1 shows how these standards ensure the microgrid meets technical and regulatory criteria for design, operation, and testing.

Table 1 Summarizing key IEEE standards relevant to the investigation

Standard	Focus Area	Relevance to Investigation
IEEE 1562-2021	Sizing PV array and battery	Guides component sizing for stand-alone systems
IEEE 2030.7-2017	Microgrid controller specification	Ensures proper control for operation modes
IEEE 2030.8-2018	Testing microgrid controllers	Validates controller performance under test
IEEE 2030.10-2021	DC microgrids for rural applications	Relevant for remote PV-battery systems

To investigate the functionality, follow these detailed steps, ensuring alignment with standards:

1) Define the Load Profile:

Determine the daily energy demand (Wh) and peak power requirement (W) of the loads. This involves analyzing historical consumption data or estimating based on the number of households, businesses, or facilities served.

Consider variability, such as peak usage times (e.g., evenings for residential areas) and seasonal changes.

2) Assess Solar Resource:

Obtain data on average daily solar irradiance and peak sun hours for the location, typically from meteorological records or solar resource

Account for shading, tilt angle, and orientation to estimate effective solar energy available for PV generation.

3) Size the PV Array:

Use the formula to estimate required PV power:

$$P_{PV} = \frac{E_{load} \times Safety\ factor}{H \times \eta_{system}} \qquad (1)$$

This ensures the PV array can generate sufficient energy to meet daily needs, guided by IEEE 1562-2021.

4) Size the Battery Storage:

Calculate the required battery capacity based on autonomy days (days the system can operate without sunlight).

$$C_{battery} = \frac{E_{load} \times autonomy\ days \times depth\ of\ discharge\ factor}{battery\ voltage \times \eta_{system}} \qquad (2)$$

This step ensures energy storage can cover periods of low solar generation, aligning with IEEE 1562-2021.

5) Design the Microgrid Controller:

Implement a power management strategy to coordinate PV, battery, and loads, ensuring efficient power flow and grid interaction if applicable. Use a double closed-loop PI control for DC bus voltage regulation, as seen in experimental studies The outer loop stabilizes voltage, while the inner loop manages current, preventing overcharging or deep discharging.

Follow IEEE 2030.7-2017 for controller specifications, ensuring seamless operation in both islanded and grid-connected modes.

6) Test and Validate the System:

Conduct simulations using tools like MATLAB/Simulink or HOMER to test the microgrid under varying conditions (e.g., cloudy days, load spikes, grid outages). Perform experimental tests on a lab-scale or field-deployed system, measuring performance metrics such as: Power quality (voltage stability, frequency regulation). Efficiency (ratio of energy output to input).

Reliability (uptime, ability to meet load during outages). Validate against IEEE standards, including IEEE 2030.8-2018 for controller testing, to ensure compliance.

4. Results and Discussion

This section describes the investigation of the microgrid hybrid system following a part of IEEE standard in section 3.

4.1 Energy flow in the case of a 50-kilowatt hydropower generator and 48-kilowatt diesel generator.

From the survey of energy sources in the Ban Klong Ruea community, it was found that there are currently two sources of energy: a hydroelectric generator and a diesel generator.

1) Hydroelectric generator

The hydroelectric generator in the Ban Klong Ruea community has been designed to operate continuously for 24 hours, starting to supply electricity to the villagers. The load profile shows in the Figure 4.

2) Diesel generator

Diesel fuel power generation is a backup energy source for the community in case the hydroelectric generator cannot supply power. The villagers have decided to use the electrical energy from 5:00 PM to 10:30 PM, totaling 5 hours and 30 minutes. The load profile shows in the Figure 4.

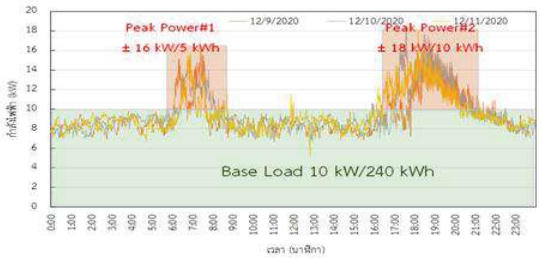


Fig. 2 Load profile of the hydroelectric generator

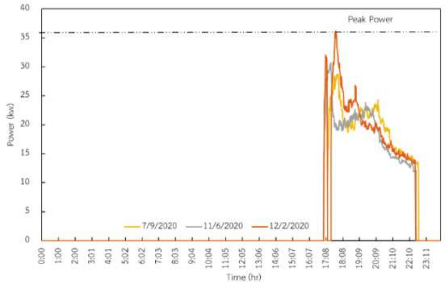


Fig. 3 Load profile of the diesel generator

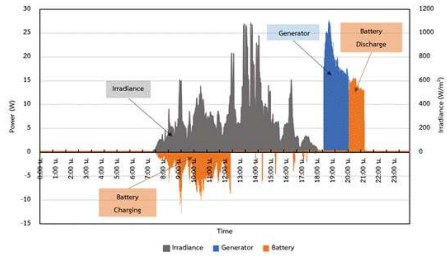


Fig. 4 Load profile of the hybrid system and diesel generator

Figure 4 shows the microgrid's 24-hour energy usage with a 48 kWh battery, 20-kW solar panel system, and 48 kW diesel engine. For community power, a 22 kW bidirectional inverter transforms direct current from batteries to alternating current. Solar panels charge the 48 kWh battery from 07:00 to 18:00. The bidirectional inverter stops charging immediately. Even when the battery is charged, the solar panels generate energy until 18:00. Later, I started the diesel generator between 6:24 and 8:00 p.m. The maximum output of the 48-kilowatt diesel generator was 27.70 kW, 75.75% of its capacity. The average output was 20 kW. The diesel generator was turned off for battery maintenance at 8:00 PM after a two-minute transition. Since midnight electricity demand is lower than evening demand, Khlong Ruea House's electricity delivery restarted at 8:02 PM. The average battery consumption was 14.26 kW, peaking at 15.93. At 9:00 p.m., power went off.

4.2 Power quality of the system

Figure 5 displays the voltage and current readings for each phase in Ban Klong Ruea hamlet from 18:00 to 20:00, when a diesel generator powers it. Rectangle B shows the voltage and current readings for each phase in the Ban Klong Ruea community from 20:00 to 21:00, when a battery powers it. The diesel generator measured the community's gearbox system's voltage at 228.53 volts for phase A, 225.69 for phase B, and 231.18 for phase C. Phases A, B, and C average 42.54, 36.72, and 34.23 amps. Phase A's current surpasses the phase difference. Battery-powered community gearbox system averaged 220.04 volts for phase A, 219.81 for phase B, and 219.95 for phase C. The mean currents for phases A, B, and C were 26.04, 21.03, and 25.70 amps. The voltage data from the batteries powering each phase were similar, but the current numbers varied greatly.

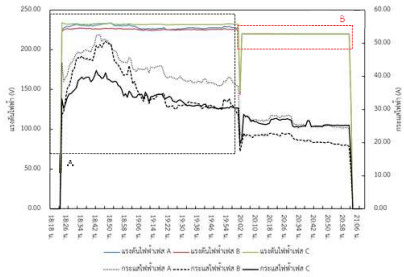


Fig. 5 Voltage and current of the system

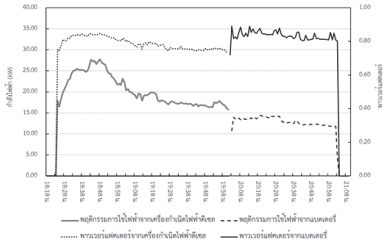


Fig.6 Active power and power factor of the system

Figure 6, Using the diesel generator, the community's energy usage peaked at 27.70 kW from 6:00 PM to 8:00 PM and reduced to 20 kW from 7:00 PM to 8:00 PM.

5. Conclusion

The study tested a renewable microgrid in Khlong Ruea, Thailand, integrating PV and battery storage devices. The findings suggest that such systems could deliver reliable and sustainable electricity to isolated people, addressing the problems of inconsistent and expensive access in rural areas. The hybrid AC/DC microgrid architecture, with a 48 kWh battery, 20 kW solar panel system, and 48 kW diesel generator, showed how renewable energy sources may work with traditional backup.

Partially following IEEE standards, the inquiry examined energy flow and power quality. The results indicated that the solar panel system charges the battery during daytime hours and supplies power during peak demand and diesel generator outages. The power quality study showed standard voltage values but phase-to-phase current fluctuations. Batteries had a better power factor than diesel generators.

Khlong Ruea's renewable microgrid shows that rural Thailand and other places may improve energy security and sustainable development. Using renewable energy technologies for decentralized power generation requires proper system configuration and compliance with necessary standards, as this study shows. Further research could examine the community's long-term economic and social effects from microgrids.

References

[1] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis," Cambridge University Press, 2021.
[2] UN, "Sustainable Development Goals Report 2023," United Nations, 2023.
[3] REN21, "Renewables 2023 Global Status Report," REN21 Secretariat, 2023.
[4] IEEE, "IEEE Standard for Microgrid Controllers," IEEE Std 2030.7-2017, 2017.
[5] Elsevier, "Solar Photovoltaic Technology and Systems," Elsevier, 2022.
[6] ScienceDirect, "Energy Storage Systems," ScienceDirect, 2023.
[7] MDPI, "Advances in Solar Energy Conversion," MDPI, 2023.
[8] IEEE, "IEEE Guide for Design and Operation of Microgrids," IEEE Std 2030.9-2019, 2019.
[9] World Economic Forum, "The Future of Energy," World Economic Forum, 2023.
[10] UNFCCC, "Paris Agreement," United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.
[11] EGAT, "Thailand Power Development Plan," Electricity Generating Authority of Thailand, 2023.
[12] Energy Policy and Planning Office, "Thailand Energy Situation Report," EPPO, 2023.
[13] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Renewable Energy Development Plan," DEDE, 2023.
[14] World Bank, "Thailand Rural Electrification Project," World Bank, 2023.
[15] Khlong Ruea Community Data, "Energy Consumption and Challenges," Local Report, 2023.
[16] IEEE, "Microgrid Applications in Rural Areas," IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022.
[17] ScienceDirect, "Decentralized Energy Systems in Developing Countries," ScienceDirect, 2023.
[18] MDPI, "Community Engagement in Renewable Energy Projects," MDPI, 2023.
[19] Asian Development Bank, "Renewable Energy Development in Southeast Asia," ADB, 2023.
[20] Elsevier, "Socio-Economic Impacts of Microgrids in Rural Communities," Elsevier, 2023.



Montri Ngao-det is a lecturer in the Electrical Engineering Department at Rajamangala University of Technology Lanna, Thailand. He earned his Bachelor of Education degree from Rajamangala University of Technology in 1997 and his Master of Engineering degree from Chiang Mai University in 2008. Currently, he serves as the Deputy Director of the Community Technology Transfer Institute. His research interests include electrical system design, lighting system design, and microgrid design.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบและวิเคราะห์ต้นทุนการติดตั้งโซล่าร์รูฟทอปร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ขนาดกำลังการผลิต 22 กิโลวัตต์ สำหรับบ้านพักอาศัย

Design and cost analysis of 22 kWp solar rooftop installation with energy storage system for residential homes

เฉลิม จินาตุน[1*], อนุชิต อุไรรัตน์[1], ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1], สมพล บุญญสุวรรณโณ[1], สมควร มณีนาค[1] และ สุเมธ เทศกุล[2]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: chalerm.jin@rmutr.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการออกแบบและวิเคราะห์ต้นทุนการติดตั้งโซล่าร์รูฟทอปร่วมกับระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ ขนาดการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 22 kWp โดยมีข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 1 ปี และเก็บรวบรวมข้อมูลหลังการติดตั้งใช้งาน 1 ปี หลังการติดตั้งในปีแรก แบบจำลองสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งปี 31.134 MWh ใช้งานจริง 15.828 MWh (50.84%) ใช้งานกลางวัน 11.269 MWh (35.01%) กักเก็บพลังงานลงในแบตเตอรี่และใช้งานกลางคืน 4.559 MWh (14.16%) ใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 16.361 MWh เปรียบเทียบผลการใช้งานจริง ปี พ.ศ. 2567 จำนวน 32 MWh แบ่งออกเป็นจากการไฟฟ้า 14.14 MWh (56.05%) และผลิตใช้งานเองทั้งระบบ 18.04 MWh (43.95%) มีพลังงานเหลือทิ้งจากการผลิต 15.306 MWh (49.16 %) เนื่องจากพื้นที่การจัดเก็บพลังงานลงแบตเตอรี่สำรองไฟไม่เพียงพอ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ 73,411.93 บาทต่อปียังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม มีระยะเวลาคืนทุนรวม 8.1 ปี

คำสำคัญ: โซล่าร์รูฟทอป, ระบบจัดเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่

Abstract

This article studies the design and cost analysis of rooftop solar system combined with battery energy storage system with solar panel installation size of 22 kWp. The design uses 1-year retrospective electricity consumption data and collects data after the first year of installation. The model can produce electricity for the whole year 31.134 MWh, actual use 15.828 MWh (50.84%), use during the day 11.269 MWh (35.01%), store energy in the battery and use at night 4.559 MWh (14.16%), use electricity from the Provincial Electricity Authority 16.361 MWh, compare the actual usage results throughout the year 2024, 32 MWh, divided into 14.14 MWh from the Provincial Electricity Authority (56.05%) and produce and use the whole system 18.04 MWh (43.95%), there is a waste of energy from production 15.306 MWh (49.16%) due to insufficient space for storing energy in the backup battery, can save electricity costs 73,411.93 baht per year, excluding VAT, with a total payback period of 8.1 years.

Keywords: Solar Rooftop, Battery Energy Storage System

1. บทนำ

ราคาพลังงานไฟฟ้าในภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม รวมทั้งภาคภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทยถือเป็นต้นทุนด้านพลังงานที่สำคัญและจำเป็นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากไม่มีมาตรการกำกับดูแลโดยหน่วยงานของภาครัฐ ที่เข้ามาช่วยเหลือในการตรึงราคาค่าพลังงานโดยเฉพาะของภาคครัวเรือน โดยเฉพาะการติดตั้งโซล่าร์รูฟ ที่มีการอุดหนุนจากภาครัฐในการประกาศรับซื้อพลังงานไฟฟ้าโดยคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (สำนักงาน กกพ.) ในการส่งเสริมให้ประชาชนผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ใช้เองและรับซื้อคืนเข้าสู่ระบบ ตามมติเห็นชอบประกาศรับซื้อไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop) สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย ปี 2565 เป็นการบรรเทาภาระค่าไฟฟ้าและขายส่วนที่เหลือเข้าสู่ระบบไฟฟ้า [1] ราคาของแผงโซล่าร์เซลล์ในปัจจุบันมีราคาลดลงในปี 2024 และมีแนวโน้มปรับตัวต่ำในระหว่างปี 2568 - 2569 เนื่องด้วยเทคโนโลยี การแข่งขัน แต่มีนัยสำคัญลดลงน้อย ด้วยกำลังการผลิต การแข่งขัน การเคลียร์ตลาด ความก้าวหน้าในนวัตกรรม และพลวัตของอุปทาน-อุปสงค์ [2] และในส่วนของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่มีราคาลดลงมากแต่มีความจุเพิ่มมากขึ้นด้วยราคาที่ลดลงในปัจจุบัน

ดังนั้นการลงทุนติดตั้งโซลาร์รูฟทอปร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่จึงมีความน่าสนใจในการลงทุนเนื่องจากข้อจำกัดในการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากภาครัฐที่ยังคงมีข้อจำกัดด้านกำลังการผลิตไม่เกิน 5 กิโลวัตต์ สำหรับระบบไฟฟ้าแบบซิงเกิลเฟส และ ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ สำหรับระบบไฟฟ้าแบบสามเฟส ทั้งนี้ยังรวมถึงข้อจำกัดด้านพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงต้องไม่เกินร้อยละ 20 ของพลังงานไฟฟ้าที่รับซื้อคืนจากภาคประชาชนในแต่ละพื้นที่ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้ง ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมทั้งความคุ้มทุนในการผลิตและขายคืนพลังงานไฟฟ้าให้กับภาครัฐอาจจะไม่ตอบโจทย์สำหรับประชาชนที่สนใจและมีแหล่งเงินทุนเพียงพอต่อระบบที่มีการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าแบบผลิตใช้เองและไม่สามารถขายคืนกับการไฟฟ้าได้ ด้วยข้อจำกัดของระบบที่ติดตั้งร่วมกับแบตเตอรี่ และวัสดุและอุปกรณ์มีราคาลดต่ำลง เทคโนโลยีการผลิตและประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้น การลงทุนการติดตั้งโซล่าร์รูฟทอปร่วมระบบกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแบตเตอรี่ ทำให้มีแนวโน้มความคุ้มค่าในการลงทุนผลตอบแทนระยะเวลาคืนทุนที่สั้นลง เพิ่มโอกาสในการตัดสินใจลงทุนติดตั้งใช้งานเป็นที่นิยมของภาคประชาชนที่มีกำลังซื้อและลงทุนกับเทคโนโลยีพลังงานสะอาดที่ยั่งยืนด้วยการออกแบบและติดตั้งใช้งาน

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ และติดตั้งโซล่าร์รูฟทอปร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยแบตเตอรี่ โดยการออกแบบติดตั้งบนหลังคาอาคารตามขนาดพื้นที่บนหลังคาที่เหมาะสมและให้ได้กำลังการผลิตสูงสุด โดยมีระบบกักเก็บพลังงานบางส่วนในการทดลองติดตั้งด้วยข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า 1 ปี เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลการติดตั้งใช้งานในปีแรกของการลงทุนและนำไปวิเคราะห์ผลการออกแบบติดตั้งเพื่อคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน และข้อดีข้อเสีย ตลอดจนแนวทางการปฏิบัติในอนาคตสำหรับการลงทุนติดตั้งระบบโซล่าร์รูฟทอปแบบผสมผสาน

2. การดำเนินการและออกแบบติดตั้ง

งานวิจัยนี้มีกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์ต้นทุนการการติดตั้งโซล่าร์รูฟทอป โดยการนำข้อมูลการใช้พลังงานในแต่ละเดือนของผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นระยะเวลาย้อนหลัง 1 ปี และเปรียบเทียบกับการออกแบบจากพื้นที่ว่างบนหลังคาในทิศทางที่เหมาะสมที่สุดตามสภาพพื้นที่ในการติดตั้งแผงโซล่าร์เซลล์ โดยมีเหตุผลหลักทางด้านราคาของอุปกรณ์แผงโซล่าร์เซลล์ที่มีราคาเฉลี่ยวัตต์ละ 4 บาท หรือต่ำกว่าขึ้นอยู่กับคุณภาพของผู้ผลิตแต่ละรายโดยมีระยะเวลาการใช้งานที่ยาวนานมากกว่า 20-25 ปี ส่วนที่เหลือเป็นระบบแปลงผันพลังงานไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ซึ่งมีอายุการใช้งานและการรับประกันจากผู้ผลิตไม่น้อยกว่า 10 ปี ส่วนของแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานที่ยังคงมีราคาแพงมีการรับประกันไม่น้อยกว่า 10 ปี เช่นกัน เป้าหมายของการศึกษาออกแบบวิเคราห์ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ไม่เกิน 10 ปี ภายใต้สมการในการศึกษาระยะเวลาคืนทุน ดังสมการที่ 1 โดยมีเกณฑ์การตัดสินใจมีระยะเวลาคืนทุนไม่เกิน 7-8 ปี ลดค่าพลังงานไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

ระยะเวลาคืนทุน = เงินลงทุนปีที่ 0 / ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้รายปี (1)

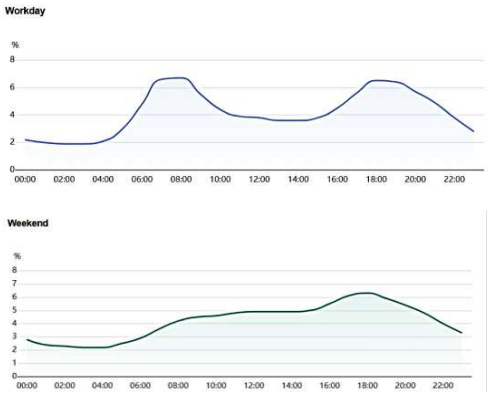
2.1 โซล่าร์รูฟทอป

โซล่าร์รูฟทอปคือระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ที่ติดตั้งบนหลังคาอาคารหรือโรงงาน และทำการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงทำที่ได้เป็นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับโดยอินเวอร์เตอร์เพื่อให้กับโหลดหรือภาระทางไฟฟ้าที่ต่อใช้งานอยู่ในระบบ แบ่งออกแบบ 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ 1. ชนิดเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ระบบนี้เป็นที่นิยมมากที่สุดใช้เงินลงทุนไม่มาก ประสิทธิภาพสูง แต่ต้องขออนุญาตเชื่อมต่อระบบกับการไฟฟ้าฯ ใช้ได้เฉพาะในเวลากลางวัน พลังงานส่วนที่เหลือไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ยกเว้นกรณีมีการขายคืนเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแต่ราคารับซื้อทำให้ระยะเวลาคืนทุนยังไม่คุ้มค่าการลงทุน 2. ชนิดออฟกริด ระบบนี้เหมาะสำหรับอาคารบ้านพักอาศัยที่ไม่มีไฟฟ้าเข้าถึงที่พักอาศัยเนื่องจากต้องมีแบตเตอรี่ในการสำรองพลังงานเพื่อให้สามารถใช้ได้ในเวลากลางคืนที่ไม่มีแสงแดด ข้อดีคือไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ข้อด้วย ต้องการการออกแบบและคำนวณปริมาณการใช้งานของโหลด ความจุของแบตเตอรี่สำรองไฟต้องเพียงพอต่อการใช้งาน และรองรับการทำงานของโหลดทางไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและเพียงพอ และ 3. ระบบไฮบริด ระบบนี้นำเอาแบตเตอรี่สำรองพลังงานไฟฟ้าร่วมกับอินเวอร์เตอร์ที่เข้ามาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า หรือ ออนกริด ทำให้สามารถสำรองพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตเหลือใช้ในเวลากลางวันลงแบตเตอรี่และนำกลับมาใช้งานได้ในเวลากลางคืน ซึ่งกำลังเป็นที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเทคโนยีประสิทธิภาพ และราคาของวัสดุแบตเตอรี่ลิเทียมมีราคาลดลง มากกว่าร้อยละ 89-90 ตั้งแต่ปี 2563 เป็นต้นมา [3] ทำให้ราคาของแบตเตอรี่ลดลงไปมากว่าร้อยละ 50 ในปัจจุบัน จึงเป็นเหตุผลให้ระบบไฮบริดได้รับความนิยมมากในปัจจุบันและอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์หลากหลายชนิดก็มีราคาถูกลงตามปัจจัยของตลาด เช่นกัน

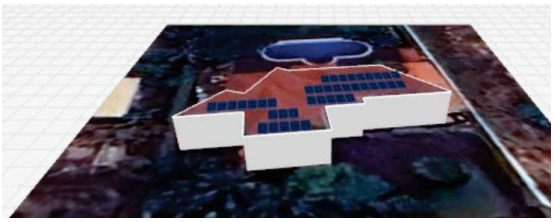
2.2 การออกแบบติดตั้ง

การออกแบบและติดตั้งด้วยโปรแกรม SmartDesign ในการระบุพิกัดของสถานที่ตรงตามพิกัดตำแหน่งที่แท้จริงเพื่อทำการประเมินสภาพพื้นที่การติดตั้งและทิศทางที่เหมาะสม ตลอดจนจำนวนพื้นที่ว่างบนหลังคาให้ได้พื้นที่ในการติดตั้ง เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานของแต่ละเดือน โดยจำแนกพฤติกรรมการใช้พลังงานออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การใช้พลังงานในเวลาทำงานปกติ จันทร์ ถึง ศุกร์

กำหนดให้ปริมาณการใช้พลังงานในช่วงเช้า และช่วงค่ำของวันตามพฤติกรรมที่มีการอยู่อาศัยของผู้ใช้งาน และส่วนที่ 2 การใช้พลังงานในช่วงเวลาวันหยุด เสาร์-อาทิตย์ กำหนดให้มีพฤติการการใช้พลังงานเฉลี่ยตลอดทั้งวันและในช่วงค่ำของวัน ตามรูปที่ 1 การกำหนดค่าเฉลี่ยร้อยละของการใช้พลังงานต่อวันในหนึ่งเดือน โดยผู้ออกแบบและทำการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูล จำแนกออกเป็น 2 กลุ่มคือช่วงวันทำงานปกติ และช่วงวันหยุดของต่อสัปดาห์ และในรูปที่ 2 แสดงแบบจำลองการออกแบบและติดตั้งแผงโซล่าเซลล์ บนพื้นที่จริงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 การกำหนดค่าเฉลี่ยร้อยละของการใช้พลังงานต่อวันในหนึ่งเดือน



รูปที่ 2 แบบจำลองการออกแบบและติดตั้งแผงโซล่าเซลล์บนหลังคา

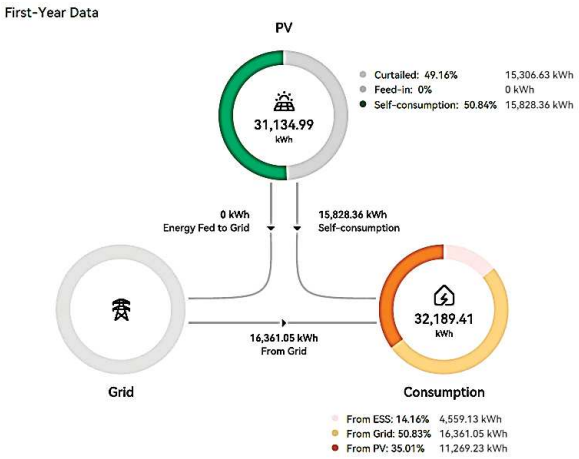
การออกแบบและตัดสินใจในการเลือกอุปกรณ์ทำงานและการติดตั้งจากแบบจำลองและซอฟแวร์โดยมีการปรับปรุงแก้ไขขนาดและชนิดของอุปกรณ์ให้เป็นไปตามท้องตลาดที่มีการจัดจำหน่ายและเลือกชนิดอุปกรณ์คุณภาพประกอบการตัดสินใจด้านการรับประกันอุปกรณ์ไม่น้อยกว่า 10 ปี เพื่อลดภาระด้านการซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ตามอายุการใช้งานที่ 5 ปี เพิ่มโอกาสในการประเมินการลงทุนให้มีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นลง เป็นแรงจูงใจให้ผู้ลงทุนในการติดตั้งและลดระยะเวลาที่คืนทุน ซึ่งเป็นปัจจัยและอิทธิพลในการตัดสินใจของผู้ลงทุน [4] โดยมีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นไม่เกิน 10 ปี สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการโซล่ารูฟเสรี [5] มีอุปกรณ์ทำงานหลักดังตารางที่ 1 รายการอุปกรณ์ติดตั้งหลัก โดยคิดราคารวมอุปกรณ์และนำไปรวมกับค่าใช้จ่ายงานติดตั้งจริงที่เกิดขึ้นเพื่อใช้การคำนวณในลำดับต่อไป

ตารางที่ 1 รายการอุปกรณ์การติดตั้งหลัก

รายการ	รายละเอียด	จำนวน
1. PV Module 550 Wp	SRP-550-BTC-HV	40 แผง
2. Inverter 3 phase 10kW	SUN2000-10KTL-M1	2 ตัว
3. Power control module	LUNA2000-5KW-C0	1 ตัว
4. Battery expansion module 5 kWh	LUNA2000-5-E0	3 ตัว
5. Smart meter 3 phase (CT 250A)	DTSU666-H	1 ตัว

2.3 ผลการออกแบบและติดตั้ง

ผลการออกแบบและติดตั้งใช้งานจริงดังรูปที่ 3 ในปีที่ 1 ของการลงทุนติดตั้ง มีข้อกำหนดสำคัญคือไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ โดยมีพลังงานที่ผลิตได้ส่วนเกินเป็นจำนวนมาก ผู้ออกแบบได้พิจารณาแล้วในการคงกำลังการผลิตไว้คงเดิมและสามารถเพิ่มอุปกรณ์กักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ในอนาคต โดยไม่เพิ่มอุปกรณ์กักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่แต่จะยังคงกำลังการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซล่าร์เซลล์ที่ออกแบบไว้บนหลังคาในทิศทางที่เหมาะสมที่สุดและได้จำนวนการติดตั้งอย่างเพียงพอและเผื่อสำหรับอนาคตที่ราคาของแบตเตอรี่ลดลง ในรูปที่ 1 จะประกอบไปด้วย พลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) พลังงานจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Grid) และ โหลดการใช้งานภายในบ้านพักอาศัย (Consumption) ที่ได้จากโปรแกรมออกแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3 ข้อมูลการผลิตพลังงานในปีที่ 1

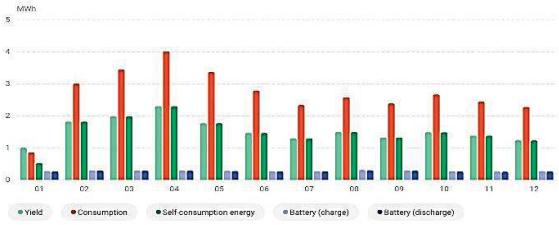
2.4 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน

การคำนวนระยะเวลาคืนทุนโดยใช้สมการการคำนวณอย่างง่ายเนื่องจากเป็นการลงทุนขนาดเล็กไม่เกิน 1 ล้านบาท โดยมีมูลค่าการลงทุนในโครงการทั้งสิ้นจำนวน 600,800.00 บาท รวมค่าติดตั้ง จะได้ระยะเวลาคืนทุนที่ 8.1 ปี คิดจากมูลค่าการลงทุนในปีแรกต่อจำนวนเงินการประหยัดพลังงาน โดยไม่คิดภาษีมูลค่าเพิ่มด้านการลงทุน รวมทั้งภาษีมูลค่าเพิ่มและค่าไฟฟ้าผันแปรทางด้านค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้จากการลงทุนในเบื้องต้นของการออกแบบ



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานในปีที่ 1

3. บทสรุป



รูปที่ 5 ข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้งานจริงรายเดือน



รูปที่ 6 ข้อมูลการผลิตพลังงานไฟฟ้าใช้งานจริงในปีที่ 1 (พ.ศ. 2567)

ขนาดการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 545 Wp จำนวน 20 โมดูล ทางทิศใต้มุม Azimuth -7 องศา ทำมุมเอียงกับระนาบของหลังคา 17 องศา ใช้อินเวอร์เตอร์ขนาด 10 kW 2 ตัว รวม 20 kW ด้วยระบบกักเก็บพลังงานแสงอาทิตย์ในแบตเตอรี่ 15 kW ใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 1 ปี เปรียบเทียบข้อมูลการผลิตใช้งานจริง 1 ปี หลังการติดตั้งในปีแรก สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งปี 31.134 MWh ใช้งานจริง 15.828 MWh (50.84%) ใช้งานเวลากลางวัน 11.269 MWh (35.01%) กักเก็บพลังงานลงในแบตเตอรี่และใช้งาน 4.559 MWh (14.16%) ใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 16.361 MWh เปรียบเทียบผลการใช้งานจริงตลอด ปี พ.ศ. 2567 จำนวน 32 MWh แบ่งออกเป็น จากการไฟฟ้า 14.14 MWh (56.05%) และผลิตใช้งานเองทั้งระบบ 18.04 MWh (43.95%) ประหยัดค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ 73,411.93 บาทต่อปี แสดงตามรูปที่ 5-6 ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม มีระยะเวลาคืนทุนรวม 8.1 ปี ผลการออกแบบมีพลังงานเหลือใช้จากแผงโซล่าร์เซลล์เกินใช้งาน 18.04 MWh (49.16 %) ต่อปี มีความเป็นไปได้ 2 ทางเลือก คือลดจำนวนการติดตั้งแผงโซล่าร์เซลล์และอุปกรณ์ให้เหมาะสม หรือเพิ่มแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในการศึกษาและเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนที่เหมาะสมประกอบการตัดสินใจเพิ่มเติม

เอกสารอ้างอิง

[1] เรวัต อินทดีรี.(2567). การวิเคราะห์การลงทุนและผลตอบแทนระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา : กรณีศึกษาอาคารคอนโดมิเนียม ลุมพินีเพลส พระราม 8. *สารนิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*. มหาวิทยาลัยสยาม.

[2] การวิเคราะห์แนวโน้มราคาแผงโซลาร์เซลล์และผลกระทบต่ออุตสาหกรรมในปี 2025-2026. (2566). สืบค้นจาก http://www.bluecarbontech.com

[3] ชารีฟ พงษ์วิจารณ์. (2566). การศึกษาความเป็นไปได้ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดสาหรับอาคารที่พักอาศัย กรณีศึกษาอพาร์ทเม้นท์ขนาด 26 ห้อง. *วิศวสารลาดกระบังปี ที่ 39 ฉบับที่ 3 กันยายน 2565.*

[4] วรากร พิเศษธนกิจกุล. (2565). ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความตั้งใจใช้งานเทคโนโลยีผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคาในเขตกรุงเทพมหานคร. *วารสารสหวิทยาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 3 (กันยายน – ธันวาคม 2564).*

[5] วสุพร ติ๋วงาม. (2559). การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการติดตั้งโซลาร์รูฟอย่างเสรี สาหรับบ้านที่อยู่อาศัย. *วิทยานิพนธ์เศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต*. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยข้อมูลย้อนหลัง 10 ปีของโรงงานและอาคารภายในประเทศไทย

Economic Evaluation of Solar Generating System Using a Decade Data of Thailand

ปุรเชษฐ์ ตราหยก[1*] เบญจมาภรณ์ ภูมี[1] วรรัตน์ ปัตรประกร[2] และ พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
E-mail: purachet.tray@dome.tu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ของอาคารและโรงงานควบคุมในประเทศไทย จากข้อมูลมาตรการอนุรักษ์พลังงานในรายงานการจัดการพลังงานที่จัดส่งกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ในระยะตลอด 10 ปี มาทำการวิเคราะห์และคำนวณต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น พบว่าค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย มีแนวโน้มลดลงแบบกำลัง โดยลดจาก 5.32 เป็น 2.67 บาทต่อหน่วยในระยะเวลา 10 ปี จากปี 2557-2567 และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงมีจุดเหมาะสมสำหรับการติดตั้งอยู่ที่ปี 2560 ที่ราคา 3.60 บาทต่อหน่วย หากลงทุนติดตั้งก่อนจุดเหมาะสมจะมีระยะเวลาคืนทุนที่นานกว่าและขาดทุน แต่หากทำการลงทุนหลังจากจุดเหมาะสมจะเกิดการเสียโอกาสจากการตัดสินใจที่ล่าช้า

คำสำคัญ: ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์, การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

Abstract

This article presents the analysis of economic evaluation for solar electricity generate system (solar PV) to find the optimum point of actions by using a decade data that apply an energy management report to the Department of Energy and Efficiency plan (DEDE) and find electricity price per kWh of solar PV, which have lower due to new technology , then compare to price per kWh from electricity provider, which price is increasing continuously. From the research, we found that price per kWh of solar PV have decrease exponentially from 5.32 to 2.67 baht in 10 years from 2557-2567 and have optimum point at 3.60 baht in 2560. From the analysis result, if invest before optimum point will have longer payback period, in the other hand, investment after optimum point might loss opportunities due to late decision.

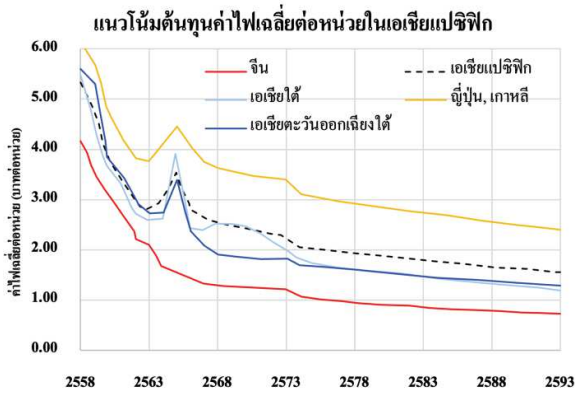
Keywords: solar electricity , economic evaluation , solar PV

1. บทนำ

จากสถานการณ์ต้นทุนของพลังงานทดแทนในปัจจุบัน บ่งชี้ว่ากำลังลดราคาลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับพลังงานฟอสซิลหรือพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ต้นทุนพลังงานทดแทนในด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์มีการลดลงอย่างมาก [1] ในปีพ.ศ.2566 สำหรับประเทศในกลุ่มเอเชียแปซิฟิก (APAC) มีต้นทุนถูกกว่าพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปถึงร้อยละ 13 และคาดว่าจะต่ำกว่าพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปร้อยละ 32 ในปีพ.ศ.2573 โดยสาธารณรัฐประชาชนจีนมีต้นทุนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ถูกที่สุดในกลุ่มเอเชียแปซิฟิก ดังภาพที่ 1 โดยมีต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกกว่าค่าเฉลี่ยถึงร้อยละ 40-70 ค่าไฟเฉลี่ยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในระยะเวลาเพียง 2 ปีนับจากพ.ศ.2565-2567 ถึงร้อยละ 23 และคาดว่ายังสามารถลดต้นทุนลงได้อีกจนเหลือเป็นครึ่งหนึ่งในปี 2593 ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าวยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดลงของต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศอื่นๆ ที่จะลดต่ำลงในอนาคตในลักษณะเดียวกัน

จากรายงานการวิเคราะห์ต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยที่เปลี่ยนแปลง ในปีพ.ศ.2567 (ค.ศ.2024) [2] ได้ระบุถึงการลดลงของต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ปีพ.ศ. 2553-2567 ว่ามีการลดลงจาก 16.1 บาทต่อหน่วย เหลือเพียง 1.54 บาทต่อหน่วย ซึ่งลดลงร้อยละ 90.43 โดยปัจจัยที่ทำให้ต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยลดลงมากที่สุดได้แก่ ต้นทุนอุปกรณ์ ประกอบด้วยต้นทุนค่าแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์(โมดูล) และอินเวอร์เตอร์ ลดลงเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 45 และร้อยละ 9 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า

สูงขึ้นจากร้อยละ 14 เป็นประมาณร้อยละ 22 ตามเทคโนโลยีที่พัฒนาทำให้อุปกรณ์มีต้นทุนต่อกำลังผลิตที่ถูกลง อีกทั้งปัจจัยเกี่ยวกับต้นทุนการติดตั้งได้แก่ ค่าติดตั้ง ค่าอุปกรณ์โครงสร้าง ที่เกิดการแข่งขันภายในตลาดที่มีผู้ติดตั้งเพิ่มมากขึ้นหลายราย ที่มีสัดส่วนทำให้ลดลงอีกร้อยละ 37



รูปที่ 1 แนวโน้มต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในกลุ่มประเทศเอเชียแปซิฟิก

สำหรับแนวโน้มของค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าของประเทศไทย มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยด้านต่างๆที่ส่งผลต่อค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย ได้แก่ การวางแผนการผลิตไฟฟ้าภายในประเทศ ซึ่งจะจัดสรรการผลิตจากหลากหลายแหล่งพลังงาน โดยกระจายเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานหลากหลายชนิด เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงทางด้านพลังงาน [3] ในพ.ศ. 2564 ประเทศไทยผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติร้อยละ 58 ถ่านหินร้อยละ 14 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 10 และพลังงานน้ำร้อยละ 3 ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนสัดส่วน เพื่อควบคุมสมดุลด้านความมั่นคง ราคาพลังงานและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ในแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ จะมีการปรับลดสัดส่วนก๊าซธรรมชาติลงเหลือร้อยละ 48 ซึ่งยังมีสัดส่วนที่สูง ส่งผลให้ในอนาคตราคาพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทย จะขึ้นอยู่กับราคาก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [4]

2.กระบวนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

2.1 ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้า

สามารถวิเคราะห์ได้จาก ราคาพลังงานไฟฟ้าภาพรวม เทียบสัดส่วนกับพลังงานไฟฟ้าขั้นสุดท้ายของประเทศ จากรายงานสถิติพลังงานประจำปี เพื่อคำนวณหาค่าไฟเฉลี่ยต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมง หรือค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย ซึ่งเป็นราคาเฉลี่ยสำหรับไฟฟ้าขายปลีกจากทั้งอุตสาหกรรมและบ้านอยู่อาศัยภายในประเทศไทย

2.2 การคำนวณค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การคำนวณค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จาก ต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย ซึ่งคำนวณได้จากค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดอายุโครงการ ส่วนด้วยพลังงานทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดอายุโครงการเป็นระยะเวลา 20 ปี ดังสมการที่ 1

$$LCOE = \frac{LC}{LE} \tag{1}$$

$LCOE$ คือ ต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย (บาทต่อหน่วย)
LC คือ ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าตลอดอายุโครงการ (บาท)
LE คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดอายุโครงการ (หน่วย)

$$LC = I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{(I_t + M_t)}{(1+r)^t} \tag{2}$$

I_0 คือ ค่าเงินลงทุนทั้งหมดในปีที่ 0, I_t คือ เงินลงทุนค่าเปลี่ยนอินเวอร์เตอร์ ในปีที่ 10, M_t คือ ค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์และค่าเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ชำรุดในปีที่ t, r คือ อัตราคิดลด และ n คือ อายุโครงการ ซึ่งในที่นี้กำหนดเป็น 20 ปี

$$LE = \sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t} \tag{3}$$

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ตลอดอายุโครงการสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3 โดย E_t คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีที่ t ซึ่งจะลดลงเนื่องจากประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ที่ลดลงตามอายุการใช้งาน คำนวณได้ใช้งานดังสมการที่ 4

$$E_t = E_0 \times (1 - DE)^{t-1} \tag{4}$$

โดย DE คือ สัดส่วนประสิทธิภาพที่ลดลงโดยรวมของแผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ที่ลดลงต่อปี

2.3 การวิเคราะห์ดัชนีการเงิน

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะใช้การคำนวณดัชนีการเงิน คือ ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย ซึ่งจะชี้วัดเบื้องต้นว่า การลงทุนมีระยะเวลานานเท่าใดที่ทำให้รายได้รวมมีค่าเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น เพื่อเป็นดัชนีประกอบการตัดสินใจในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยคำนวณจากระยะเวลา (PB_t) ในหน่วยปี ที่ทำให้ผลรวมของรายรับต่อปี (C_t) มีค่าเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น (I_0) ดังสมการที่ 5

$$I_0 = \sum_{t=1}^{PB_t} Ct \quad (5)$$

โดย C_t คำนวณได้จากจากการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปี E_t กับค่าไฟเฉลี่ยจากการไฟฟ้าในแต่ละปี EP_t หักลบกับค่าบำรุงรักษา M_t และค่าเปลี่ยนอุปกรณ์ในแต่ละปี I_t ดังสมการที่ 6

$$C_t = (E_t \times EP_t) - (M_t + I_t) \quad (6)$$

2.4 จุดที่เหมาะสม

จากเส้นแนวของโน้มค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้า และค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มา สามารถหาจุดที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากจุดที่ค่าไฟต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงจนตัดกับค่าไฟต่อหน่วยจากการไฟฟ้า การลงทุนที่เกิดขึ้นก่อนจุดที่เหมาะสม จะเกิดการขาดทุน ในการวิเคราะห์ด้วยค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย หากไม่พิจารณาโครงการการสนับสนุนจากภาครัฐหรือหน่วยงานต่างๆ การลงทุนที่เกิดขึ้นหลังจุดที่เหมาะสม จะเกิดการเสียโอกาสจากค่าไฟต่อหน่วยที่ต้องจ่ายแพงกว่าค่าไฟต่อหน่วยจากไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณร้อยละของการเสียโอกาส (LO) จากผลเฉลี่ยพื้นที่ใต้กราฟของค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยทั้งสองรูปแบบได้ดังสมการที่ 7

$$LO = \frac{1}{b-a}\int_a^b 1 - \frac{LCOE(t)}{EP(t)}\,dt \quad (7)$$

โดย $LCOE(t)$ คือ ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปีที่ t, $EP(t)$ คือ ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าในปีที่ t และช่วงระยะเวลาที่สนใจคือตั้งแต่ปีที่ a ถึงปีที่ b

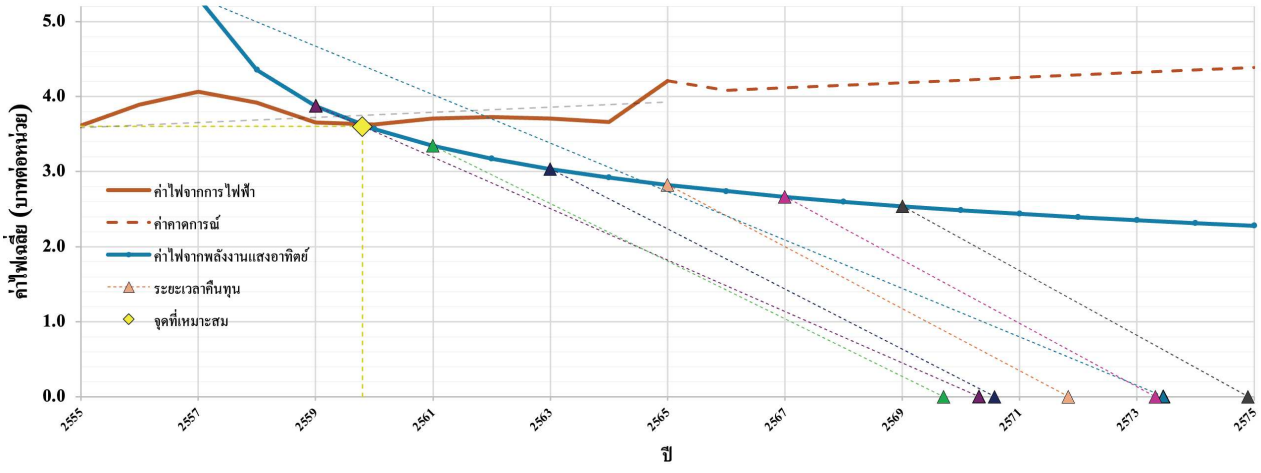
2.5 แนวทางการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าของต้นทุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะใช้ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระยะเวลาคืนทุนอย่างง่าย รวมถึงร้อยละของการเสียโอกาส มาใช้วิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและแนวโน้มของต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และวิเคราะห์จุดที่เหมาะสม รวมถึงแสดงค่าการเสียโอกาสเป็นร้อยละต่อกำลังติดตั้งสูงสุด เพื่อหาศักยภาพที่เหมาะสมในการลงทุน

3. ผลลัพธ์

ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยย้อนหลังตั้งแต่ปี พ.ศ.2555-2565 ดังรูปที่ 2 พบว่าค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยมีความผันผวนแต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยในอนาคตที่จะเกิดขึ้น ที่อาจสูงขึ้นเป็น 4.40 บาทต่อหน่วย อย่างไรก็ตามแนวโน้มที่เห็นนี้เกิดจากการสนับสนุนของกองทุนจากภาครัฐ (Subsidized) ที่ช่วยตรึงค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยไว้ ทำให้ค่าไฟที่เห็นจากเส้นแนวโน้มยังไม่สะท้อนราคาตามราคาเชื้อเพลิงอย่างชัดเจน แต่หากมีการยกเลิกหรือปรับลดการสนับสนุน จะส่งผลให้แนวโน้มค่าไฟตามจริงในอนาคต จะปรับตัวสูงขึ้นกว่าเส้นแนวโน้มอย่างแน่นอน

จากแนวโน้มข้างต้นจะเห็นได้ว่าระยะเวลาคืนทุนที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่จะคืนทุน



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าเทียบกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รายปี

เร็วขึ้นตลอดทุกปี โดยต้นทุนค่าไฟเฉลี่ยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีความสัมพันธ์แบบกำลัง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้า ที่ช่วงแรกจะมีราคาที่สูง เนื่องจากเป็นสิ่งใหม่และจำนวนผู้ใช้งานเริ่มต้นยังมีน้อย และจะมีการลดลงจนถึงจุดอิ่มตัวที่ราคาค่อนข้างคงที่ จนกว่าจะมีเทคโนโลยีใหม่มาทดแทนและเกิดเป็นแนวโน้มแบบเดิมอีกครั้ง โดยระยะเวลาคืนทุนซึ่งคิดจากการที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นศูนย์ จะมีแนวโน้มลดลงอย่างมากในช่วงแรก ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ในปี 2557, 2559, 2561, 2563, 2565, 2567 และ 2569 จะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 16.46 ปี , 11.30 ปี , 8.70 ปี, 7.57 ปี, 6.83 ปี, 6.31 ปี และ 5.89 ปีตามลำดับ แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าการลงทุนในช่วงแรกที่ยังมีต้นทุนที่สูง ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนมีระยะเวลาที่นาน เช่น ในปี 2557 มีระยะเวลาคืนทุน 16.46 ปี จะลดเวลาลงเป็นครึ่งหนึ่งในปี 2562 ด้วยระยะเวลาลงมือทำที่ห่างกัน 5 ปีแต่สามารถลดระยะเวลาคืนทุนไปได้ถึง 8 ปี แสดงให้เห็นว่าการลงทุนก่อนจุดที่เหมาะสมทำให้เกิดการขาดทุนได้ จากราคาต้นทุนที่สูงเกินจุดที่เหมาะสมในการลงมือทำ

จุดที่เหมาะสมสำหรับทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ จุดตัดของค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าและจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเป็นปี 2560 ซึ่งมีค่าไฟเฉลี่ยเท่ากับ 3.60 บาทต่อหน่วย เนื่องจาก ณ จุดนี้ ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะเริ่มมีต้นทุนที่ถูกกว่าค่าไฟจากการไฟฟ้า การลงมือทำหลังจากจุดเหมาะสมจะเป็นช่วงเวลาที่ดี สังเกตได้จากการลงทุนในปี 2559 และปี 2561 ที่มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 11.30 ปี และ 8.70 ปี ซึ่งหากกันเพียง 2.4 ปีผ่านการลงทุนที่หากกัน 2 ปี จึงทำให้ระยะเวลาคืนทุนเกิดที่เวลาใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ปี 2559 เกิดการขาดทุนเป็นระยะเวลา 2 ปีจากช่วงเวลาที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เป็นกำไรน้อยลง ซึ่งคิดได้จากอายุการใช้งานที่เหลือ หลังหักระยะเวลาคืนทุนออกไป

ร้อยละของการเสียโอกาสแสดงให้เห็นว่าหากติดตั้งในปี 2561 ซึ่งทำหลังจากจุดเหมาะสม จะเกิดการเสียโอกาสร้อยละ 5.77 ของพลังงานที่ผลิตได้ในช่วงเวลาหนึ่งปี หากติดตั้งที่กำลังหนึ่งกิโลวัตต์ จะเกิดการเสียโอกาส ซึ่งสามารถคำนวณจากส่วนต่างของค่าไฟต่อหน่วยคิดเป็นเงิน 296.73 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี

ช่วงปีที่สนใจ	ร้อยละของการเสียโอกาส	มูลค่าเงินที่เสียโอกาส (บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี)
2560-2561	5.77	296.73
2561-2562	12.35	638.82
2562-2563	16.50	848.54
2563-2564	19.19	974.90
2564-2565	27.01	1,575.88

ตารางที่ 1 ร้อยละของการเสียโอกาสเมื่อติดตั้งหลังจากจุดเหมาะสม

ร้อยละของการเสียโอกาสจะสูงมากขึ้น เมื่อส่วนต่างระหว่างค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้าเทียบกับจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีช่วงที่กว้างขึ้น ดังตัวอย่างช่วงปี 2564-2565 ที่ค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วยจากการไฟฟ้ามีราคาที่แพงขึ้น ทำให้ร้อยละของการเสียโอกาสเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 27.01 หรือคิดเป็นเงิน 1,575.88 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี ซึ่งหากติดตั้ง 1 เมกะวัตต์จะเสียโอกาสคิดเป็นเงิน 1.51 ล้านบาท

4.สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของโรงงานและอาคารควบคุมทั่วประเทศ ผลลัพธ์พบว่าแนวโน้มของค่าไฟเฉลี่ยต่อหน่วย มีแนวโน้มที่ลดลงตัดกับค่าไฟเฉลี่ยจากการไฟฟ้า โดยมีจุดเหมาะสมสำหรับการลงทุนติดตั้งในปี 2560 ที่ราคาค่าไฟต่อหน่วย 3.60 บาท ระยะเวลาคืนทุนที่ลดลงต่อเนื่องทุกปี แสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนติดตั้ง ภายใต้ข้อมูลย้อนหลังการลงทุนเฉลี่ยของโรงงานและอาคารควบคุมทั่วประเทศ ในอนาคตหากพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมในด้านต่างๆ เช่น ลักษณะการใช้ไฟฟ้า ภูมิภาคที่ติดตั้ง ลักษณะการติดตั้ง อาจให้ผลลัพธ์ที่เฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น ซึ่งการพิจารณาปัจจัยเหล่านี้ร่วมกับการวิเคราะห์ในบทความนี้ สามารถช่วยวิเคราะห์ความคุ้มค่า ประกอบการตัดสินใจสำหรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่จะดำเนินการในอนาคตต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Solar inflation reverses as renewable costs in Asia reach all-time low : Plummeting Utility PV solar costs, 29 Feb. 2024. [Online]. Available: https://www.woodmac.com/press-releases/asia-lcoe

[2] Global LCOE competitiveness of wind power and photovoltaic is increasing, 25 Oct. 2024. [Online]. Available: https://www.evwind.es/2024/ 10/25/global-lcoe-levelized-cost-of-electricity-competitiveness-of-wind-power-and-photovoltaic-pv-is-increasing/

[3] รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2567 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 7 Aug. 2024. [Online]. Available: https://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/20753-energy-statistics-2567

[4] แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ.2561-2580, 19 Mar. 2020. [Online]. Avaiable: https://www.eppo.go.th/images/Infromation_service/pdp2018/PDP2018Rev1.pdf

Balancing Grid Demand and Battery Availability: NSGA-II-Based Optimization for Battery Swapping Station

Trinnapop Boonseng[1*] Waraporn Luejai[1] Wikorn Wongsathian[1] Suwat Sakulchat[1] and Niyawadee Srisuwan[1]

[1*]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architechture, Rajamangala University of Technology Suvannabhumi
E-mail: trinnapop.b@rmutsb.ac.th[*]

Abstract

The increasing adoption of heavy electric vehicles (HEVs) necessitates efficient. Battery Swapping Station (BSS) operations to ensure grid stability while meeting customer demand. This study proposes a multi-objective optimization framework using the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) to simultaneously minimize peak electricity demand and maximize the availability of fully charged batteries. Three operational scenarios were analyzed: (1) a maximum charging rate, (2) a minimum charging rate, and (3) an optimized charging rate based on Pareto-optimal solutions, which effectively balanced peak loads while maintaining battery availability. The results indicate that the optimal charging strategy reduces grid stress while ensuring a daily availability of approximately 92 fully charged batteries. These findings demonstrate the effectiveness of multi-objective optimization in improving BSS operations, supporting sustainable energy management, and enhancing customer satisfaction. Future research can extend this approach by incorporating real traffic data and real local demand.

Keywords: NSGA II, BSS, Heavy EV cars.

1. Introduction

Transportation is one of the most significant contributors to greenhouse gas emissions, with internal combustion engine (ICE) vehicles playing a significant role in global pollution, which has severe environmental and health impacts. As a result, transitioning from ICE vehicles to electric vehicles (EVs) has become an essential strategy to mitigate environmental damage and move towards a more sustainable future.

EV adoption has been a key solution for reducing emissions. The penetration of EV cars has increased every year, particularly in the city area, not only for light cars but also for heavy cars such as trucks and line hauls. However, the high penetration of EV electrification of heavy vehicles presents new challenges, particularly concerning battery capacity and its impact on the existing power system. Heavy vehicles require larger battery capacities, leading to higher energy consumption peak demand and more waiting time. The consequences affect both the customer and the power system issues that must be addressed.

From the customer's perspective, several concerns arise with EV charging. Long waiting times at charging stations are notable challenges. While fast-charging technology can reduce wait times, it can accelerate battery wear and impact long-term vehicle performance. In this case, battery swapping should take place. Recent studies have explored various aspects of battery swapping and charging station optimization to maintain the abovementioned problem, starting with optimal site selection for BSS and charging stations. In [1], discusses an optimal placement model for battery swapping and charging stations in urban areas, particularly for battery electric buses (BEBs). The model optimizes accessibility, construction costs, and land prices. [2] presents a method for siting and capacity determination of battery swapping stations for electric ships, minimizing total construction and operation costs while ensuring operational feasibility. The battery dispatch and charging power management are also important for mitigation in the power system. [3] introduces a battery scheduling framework that efficiently manages battery dispatch between battery charging stations (BCS) and swapping stations (BSS) with a charging power dispatch model, and [4] establishes a bi-level optimization model for integrated charging and swapping stations, considering life cycle benefits, grid support strategies, and time-of-use tariffs. The capacity and the number of battery swaps can reduce the problem on the customer's side. In [5], optimizing the number of EV battery packs and chargers in a station is investigated to enhance efficiency. [6] proposes an optimization framework to determine the most efficient inventory capacity for a BSS while reducing customer wait times and improving battery state-of-health (SoH). Multi-objective optimization techniques play an essential role in mitigating challenges in battery swapping stations (BSS). [7] focuses on multi-objective optimal scheduling for EV batteries in BSS, optimizing the number of batteries taken from stock while considering degradation costs and electricity costs. [8] presents an optimization technique for charging schedules in BSS, specifically for electric buses (EBs) in public transportation.

However, no study has investigated minimizing peak demand by maximizing the availability of fully charged

batteries in swapping battery systems. This paper presents the optimization method to mitigate peak demand and availability of fully charged batteries, as shown in Fig 1., which aims to compromise both the power system and the customer side.

The paper has been organized as follows. In section 2, mathematical problem formulation is presented. In section 3, the proposed method can solve the given problem is presented. In section 4, the optimal solution is presented . The conclusion is located in the last section.



Fig. 1 Challenges associated with the BSS implementation

2. Problem formulation

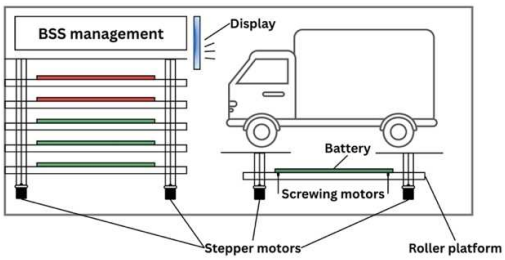


Fig. 2 Battery swapping station infrastructure.

With the increasing penetration of heavy electric vehicles (HEVs), BSS have emerged as a viable solution to reduce charging time and enhance convenience for EV users. Fig. 2 shows the BSS infrastructure. However, operating an efficient BSS presents significant challenges, particularly in managing power demand and ensuring battery availability.

The first objective function is to maximize the availability of fully charged batteries. Customers expect fully charged batteries to always be available to avoid long waiting periods or unsuccessful swaps.

Inefficient scheduling may result in battery shortages during peak usage hours, negatively affecting customer satisfaction and station efficiency.

The objective function can be represented by equation (1)

$$max \sum_{t=ts}^{te} N(t)_{Avail} = N(t-1)_{Avail} - N(t)_d + N(t-1)_{FChg} \quad (1)$$

Where $N(t)_{Avail}$ is the availability number of batteries, $N(t)_d$ is the number of heavy EV required swapping and$N(t)_{FChg}$is the fully charged batteries.

The second objective function is to minimize peak load demand during certain periods of the day. Uncontrolled recharging of multiple batteries in swapping stations can cause spikes in electricity demand, leading to grid instability and voltage variation. The equation (2) shows the minimizing peak demand equation.

$$min \sum_{t=ts}^{te} |P(t)_{demand} - P(t)_{supply}| \quad (2)$$

Where $P(t)_{demand}$ is the total demand in the t time and $P(t)_{supply}$ is the total supply from the grid in the time t.

The constraints are shown in equation(3) and (4).

$$P_{MaxChg} \leq P_{Chg} \leq P_{MinChg} \quad (3)$$

$$95 \leq SOC_{BS}^{i} \leq 100 \quad (4)$$

Where P_{Chg} is the charging power to restore batteries and the SOC_{BS}^{i} is the state of charge in the number i of the batteries.

3. Solution methodology

This study focuses on optimizing the operation of a BSS by minimizing peak load demand while maximizing the availability of fully charged batteries of heavy EV trucks, as shown in Fig. 3. These two objectives are inherently conflicting, making NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) an ideal choice for deriving Pareto-optimal solutions.

Solving the mathematical model outlined in Section II, the proposed method can be applied. Identifying the charging for the Battery Swapping and the availability of fully charged batteries requires analysis. The methodology for selecting the optimal charging point, considering the power system side and customer side, is illustrated in Fig. 4.



Fig. 3 BYD 8TT

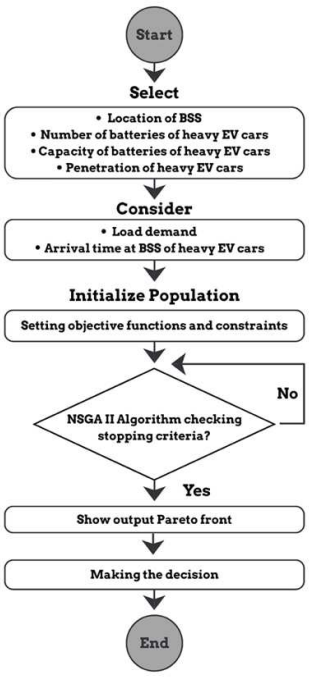


Fig. 4 Proposed method for minimizing peak demand and maximize availability of fully charged batteries.

4. Simulation and Results

4.1 Parameters and data for simulation

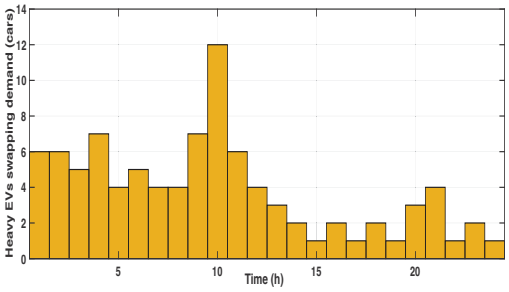


Fig. 5 Battery swapping requirement.

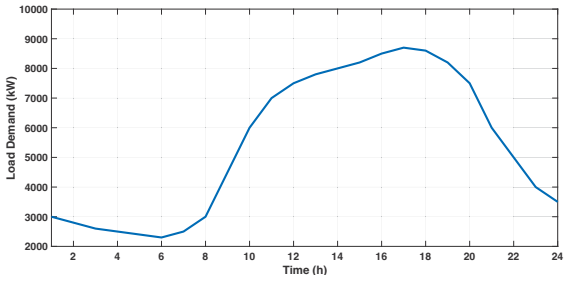


Fig. 6 Load profile.

The BYD 8TT in Fig 3. is the EV car for testing in this paper. It is a fully electric truck designed for long-distance travel with zero emissions. It features a 435 kWh battery capacity. The swapping demand and load curve are shown in Fig. 5 and Fig. 6, respectively. The swapping battery in the stock will restore their SOC with a DC charging station standard of J1772 Combo, CHAdeMO, GB/T 27930. The proposed method from the previous section will be used to implement the maximum availability of fully charged batteries and maintain peak demand.

4.2 Results

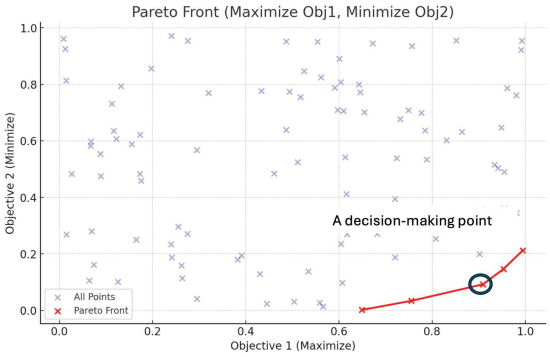


Fig. 7 Pareto front

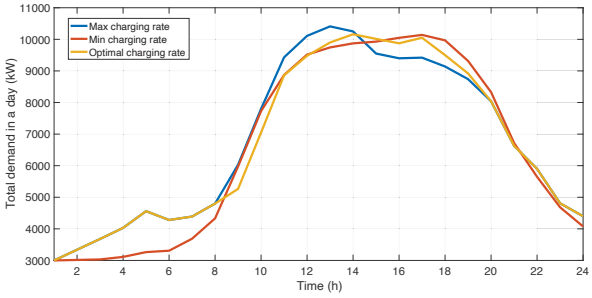


Fig. 8 Total demand(kW)

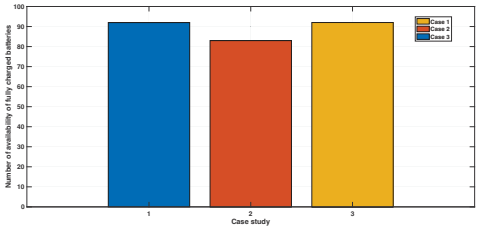


Fig 9. availability number of batteries

Fig. 7 illustrates the Pareto front obtained from the NSGA-II optimization. The x-axis represents the maximized availability of fully charged batteries, while the y-axis shows the minimized peak electricity demand. A total of 100 candidate solutions were generated during the optimization process. Among them, five non-

dominated solutions form the Pareto front, representing the trade-offs between the two objective functions.

At this stage, the decision-maker must select a suitable trade-off solution for BSS operation. Several decision-making approaches are available, such as the Utopia Point method, Max-Min fuzzy decision-making, and others [9]. In this study, since the Pareto front contains only five points, the middle point (highlighted with a circle) is selected as the best solution.

Choosing a point further to the left on the Pareto front would reduce peak demand but may not provide sufficient battery availability to meet user needs. On the other hand, selecting a point on the far right would increase battery availability but also lead to a higher peak demand, potentially stressing the power grid. Therefore, the selected middle point offers a balanced trade-off between service availability and grid efficiency.

Fig.8 and Fig.9 presents the total electricity demand under three different scenarios:

Case 1: The grid supplies a constant charging demand of 90 kW. The results indicate that the peak electricity demand occurs between 12:00 and 14:00, reaching a maximum of 10,500 kW. The battery availability under this scenario is 92 fully charged batteries per day.

Case 2: The charging demand is supplied at the minimum rate of 36 kW. While this reduces the peak demand between 12:00 and 14:00, it causes a new peak to emerge between 16:00 and 18:00. The maximum peak demand in this scenario is 9,780 kW, and the battery availability is 83 fully charged batteries per day.

Case 3: The charging rate is determined using the optimal solution selected from the Pareto front. This approach effectively balances the peak demand characteristics observed in the first two cases. The maximum peak demand is reduced to 9,580 kW, while maintaining a high battery availability of 92 fully charged batteries per day.

5. Conclusion

This study proposed an NSGA-II-based multi-objective optimization framework for Battery Swapping Station (BSS) operations, targeting the minimization of peak electricity demand and the maximization of battery availability. The optimal solution from the Pareto front effectively balances grid load and service reliability.

The proposed method, compared to Case 1, the optimized solution reduces peak demand by 8.76% without sacrificing battery availability. Compared to Case 2, it increases battery availability by 10.84% while also lowering peak demand by 2.04%. These results highlight the effectiveness of the proposed method in reducing grid stress while maintaining operational performance.

Future work may consider further integrating real traffic flow data and localized grid constraints to make it more realistic.

References

[1] S. S. Kumbhar and V. N. Kalkhambkar, “Optimal Planning of Battery Swapping and Charging Stations for the Urban Cities,” 2023 International Conference on Advanced Computing Technologies and Applications (ICACTA), 2023, doi: 10.1109/ICACTA58201.2023.10392556.

[2] C. Wang, J. Li, B, Xu, Y. Yang and O. Postolache, “Optimization of Ship Battery Swapping Station Siting on the Yangtze River Mainline Based on Particle Swarm Algorithm,” 2024 International Symposium on Sensing and Instrumentation in 5G and IoT Era (ISSI), 2024, doi: 10.1109/ISSI63632.2024.10720502.

[3] X. Zhang and G. Wang, “Optimal Dispatch of Electric Vehicle Batteries between Battery Swapping Stations and Charging Stations,” 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016, doi: 10.1109/PESGM.2016.7741893.

[4] H. Ye, A. Guo, C. Dai and Y. Wang, “Optimization of Battery Swap and Energy Storage Integrated Station Considering Life Cycle Benefit and Support Ability to Grid,” 2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2023, pp. 777-782, doi: 10.1109/ACPEE56931.2023.10135728

[5] L. Xinyi, L. Nian, H. Yangqi, Z. Jianhua and Z. Nan, “Optimal Configuration of EV Battery Swapping Station Considering Service Availability,” 2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), 2014, doi: 10.1109/IGBSG.2014.6835217.

[6] A. Siddiqua, V. Cherala and P. K. Yemula, “Optimal Sizing and Adaptive Charging Strategy for the Battery Swapping Station,” 2023 IEEE PES 15th Asia- Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2023 , pp. 1-6, doi: 10.1109/APPEEC57400.2023.10561997.

[7] G. Battapothula, C. Yammani and S. Maheswarapu, “Multi-Objective Optimal Scheduling of Electric Vehicle batteries in Battery Swapping Station,” 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2019, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905586.

[8] M. C. Kocer, O. Yurdakul and S. Albayrak, “Optimal Scheduling of Battery Swapping Stations for Electric Public Transportation,” 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 2021,doi:10.1109/ISGTEurope52324.2021.9639941

[9] M. Aghaei, M. Imani, M. Aghaei, and M. Gitizadeh, “Multi-objective scheduling of electric vehicles intelligent parking lot in the presence of hydrogen storage system under peak load management,” Energy, vol. 88, pp. 387–400, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.065.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

อินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดเชื่อมต่อกริดโดยการใช้แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้า

Single Phase Grid Connected Inverter Using Predictive Current Control Model

อนุชิต อุไรรัตน์[1] เฉลิม จินาตุน[1] ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1] สมควร มณีนาค[1] หาญศึก สุชาติกุล[1] สมพล บุญสุวรรณโณ[1] สุนัน หนองเหล็ก[1] และ สุเมธ เทศกุล[2]
[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ตำบลหนองแก อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110 E-mail: anuchit.aur@rmutr.ac.th
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง 12110 จังหวัดปทุมธานี 48000 E-mail: sumeth_t@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนออินเวอร์เตอร์เฟสเดียวชนิดเชื่อมต่อกริดโดยการใช้แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ด้วยอัลกอริทึมแบบจำลองการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า โดยวัดสัญญาณกระแสและนำมาใช้ทำนายการไหลของกระแสการสุ่มตัวอย่างครั้งต่อไป (t + 1) ทดสอบโดยการจำลองโดยใช้แมทแลปซิมมูลิงค์ (MATLAB/Simulink) ควบคุมจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยอัลกอลิทึมการรบกวนและสังเกตุ(P&O)

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์, การทำนาย, การสุ่มตัวอย่าง, รบกวนและสังเกตุ

Abstract

This paper presents the 1 phase inverter, which uses a predictive current control model to control 1 phase inverter. The predictive current control model algorithm scheme was done to measure the simultaneous current signal including predicting the next sampling current flow (t + 1). This concept was experimented with by using MATLAB/Simulink. The P&O maximum power point tracking is used.

Keywords: inverter, predictive, sampling, P&O

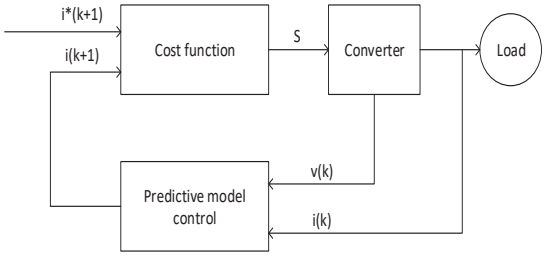
1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีบทบาทสำคัญในการใช้พลังงานสะอาด อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์จำเป็นต้องมีพื้นที่ขนาดใหญ่ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและพื้นที่เกษตรกรรม ดังนั้น อีกวิธีหนึ่งคือการติดตั้งบนหลังคา แต่จำเป็นต้องมีระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) ที่ดีที่สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ เนื่องจากบางครั้งแสงและอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงรวมถึงแผงถูกบังบางส่วน ตัวอย่างของระบบที่ถูกปิดกั้นบางส่วน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ที่บนหลังคา เพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้าขาออกมีหลายวิธีเช่น การรบกวนและการสังเกตุ (P&O) การนำไฟฟ้า (INC) ลอจิกฟัซซี (FL) การเพิ่มประสิทธิภาพกลุ่มอนุภาค (PSO) รวมถึงไฮบริด (HYBRID) ส่วนอื่นๆ ของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์คืออินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้า(MPC) เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ร่วมกับเทคนิคการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบการรบกวนและการสังเกต การควบคุมอินเวอร์เตอร์กริดหนึ่งเฟสใช้แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริดซึ่งข้อดีของอัลกอริทึมนี้คือคือไม่ซับซ้อน ทำงานได้อย่างรวดเร็ว ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิคของกระแสไฟฟ้า(THDi)ต่ำ [1]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้า

แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าถูกนำมาใช้ในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ สำหรับการควบคุมการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง[2-3] งานวิจัยนี้นำเอาหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับกริด ทฤษฎีนี้นำเสนอโดยอ้างอิงการควบคุมการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อความง่ายในการศึกษาและทำความเข้าใจดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ไดอะแกรมแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 1 ปริมาณกระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดด้วยจำนวนสถานะที่เป็นไปได้ของแหล่งจ่ายไฟคงที่ซึ่งมาจากสถานะของการทำงานของตัวแปลงพลังงาน โดยกระบวนการข้างต้นช่วยให้สามารถคาดการณ์สถานะครั้งต่อไปได้ ค่าที่คาดการณ์จะคำนวณสถานะของการดำเนินการที่ถูกต้องและจะถูกเลือกโดยฟังก์ชันต้นทุน เทคนิคการควบคุมสามารถสรุปได้ดังนี้

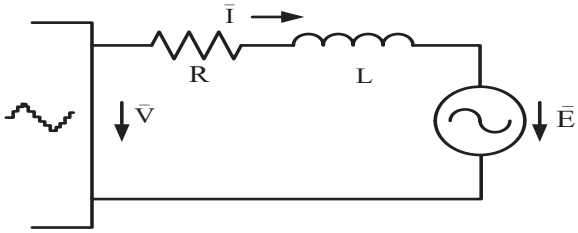
1. ตั้งค่าฟังก์ชันสมการต้นทุน
2. สร้างแบบจำลองอินเวอร์เตอร์และออกแบบสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์
3. สร้างแบบจำลองสำหรับการทำนาย

จุดประสงค์ของแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าคือการจำกัดข้อผิดพลาดระหว่างกระแสที่วัดได้และกระแสอ้างอิง ฟังก์ชันต้นทุนสามารถเขียนได้ในรูปของแกนตั้งฉาก การวัดข้อผิดพลาดระหว่างค่าอ้างอิงและค่าที่วัดได้ดังแสดงในสมการที่ 1

$$g = \left|i_{\alpha}^{*}(k+1) - i_{\alpha}^{p}(k+1)\right| + \left|i_{\beta}^{*}(k+1) - i_{\beta}^{p}(k+1)\right| \quad (1)$$

เมื่อ $i_{\alpha}^{p}(k+1)$ และ $i_{\beta}^{p}(k+1)$ คือจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพตามลำดับ ในแง่ของการทำนายค่าของเวกเตอร์โหลดนั้น $i^{p}(k+1)$ ใช้ในการกำหนดเวกเตอร์แรงดันไฟฟ้า กระแสที่ทำนายนี้ใช้สำหรับแบบจำลองโหลด $i_{\alpha}^{*}(k+1)$ และ $i_{\beta}^{p}(k+1)$ เป็นส่วนจริงและจินตภาพของกระแสอ้างอิง

หลักการทำนายกระแสของอินเวอร์เตอร์สามารถกำหนดได้จากแรงดันตกและแรงดันไฟฟ้าของกริด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของการต่ออินเวอร์เตอร์

ตัวทำนายกระแสโหลดในแบบจำลองแยกส่วนสามารถอธิบายได้ตามสมการ 2

$$v = Ri + L\frac{d_i}{d_t} + e \quad (2)$$

สมการ 2 สามารถแสดงด้วยฟังก์ชันไม่ต่อเนื่องทางเวลาโดยประมาณ Ts คือเวลาการสุ่มตัวอย่าง ซึ่งแสดงอยู่ในสมการที่ 3

$$\frac{d_i}{d_t} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{Ts} \quad (3)$$

แทนค่าสมการ 3 ในสมการ 2 ทำให้ได้สมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

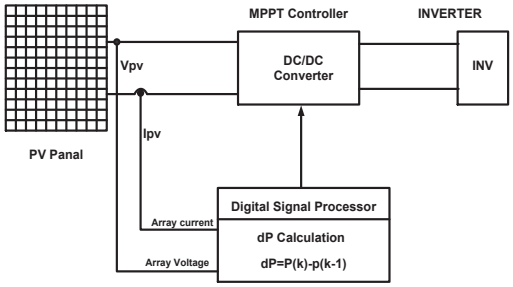
$$v_k = Ri(k) + L\frac{i(k+1) - i(k)}{Ts} + e(k) \quad (4)$$

จากสมการ 4 นำมาหาสมการที่ 5 ซึ่งเป็นสมการทำนายค่ากระแสไฟฟ้า

$$i(k+1) = \frac{T_s}{L}(v(k) - e(k) + i(k)\left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \quad (5)$$

2.2 การติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด

วิธีการการรบกวนและการสังเกตุ (P&O) ถูกนำมาใช้ในการติดตามจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไดอะแกรมวิธีการรบกวนและสังเกตุ

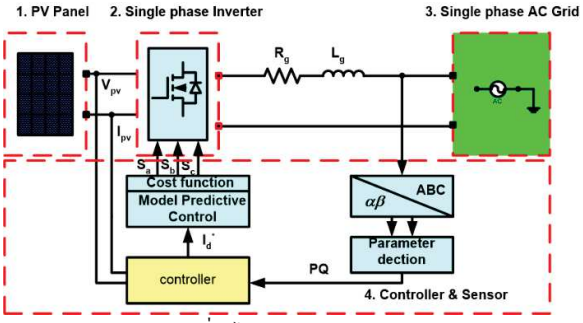
วิธีนี้จะทำงานเป็นช่วงๆ โดยใช้การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลาปัจจุบันกับช่วงเวลาก่อนหน้า หากอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นบวก ระบบจะปรับแรงดันไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน แต่หากอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นลบ ระบบจะปรับแรงดันไฟฟ้าไปในทิศทางตรงข้ามโดยการปรับวัฏจักรหน้าที่(duty cycle)ของสัญญาณขับเกตเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในย่านจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ข้อดีคือง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถทำงานได้ดีในสภาวะความเข้มของแสงและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้า[4-5]

3. ขั้นตอนการดำเนินการ

เพื่อทดสอบอัลกอริทึมแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์แมทแล็บ-ซิมูลิงค์ในการจำลอง ไดอะแกรมการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 4 ประกอบด้วย 4 ส่วนดังต่อไปนี้

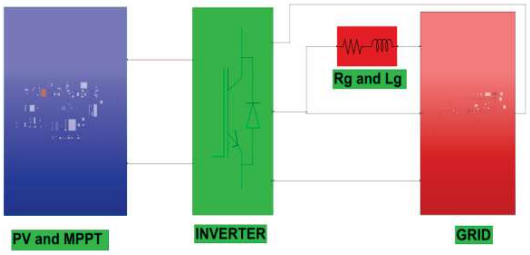
1. เซลล์แสงอาทิตย์
2. วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงและชุดควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3. อินเวอร์เตอร์ 1 เฟส
4. กริด 1 เฟส
5. เซ็นเซอร์

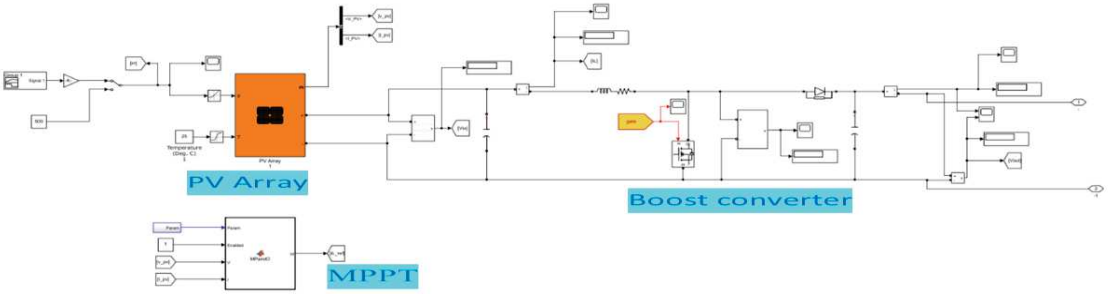


รูปที่ 4 ไดอะแกรมการจำลอง

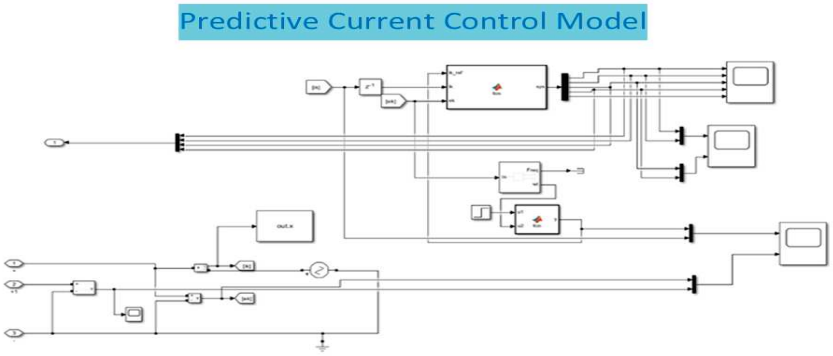
การวิจัยนี้ดำเนินการโดยการจำลองระบบโดยใช้โปรแกรมแมทแลป/ซิมมูลิงค์ (Matlab / Simulink) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่ เซลล์แสงอาทิตย์และชุดอัลลกอลิทึมการติดตามจุดจ่ายกำลังสูงสุด(PV and MPPT) ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งควบคุมจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยผ่านวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงชนิดทบแรงดัน(Boost Converter) ดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้นส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ซึ่งทำหน้าที่แปลงผันจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อเชื่อมต่อกับกริดโดยใช้แบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 5 การจำลองด้วยซิมมูลิงค์



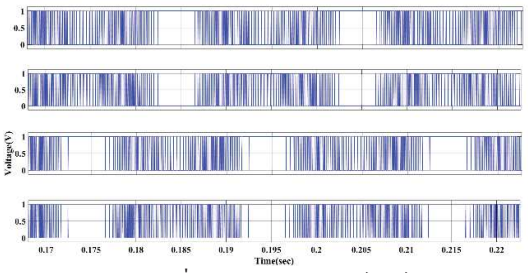
รูปที่ 6 วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 7 ส่วนควบคุมอินเวอร์เตอร์

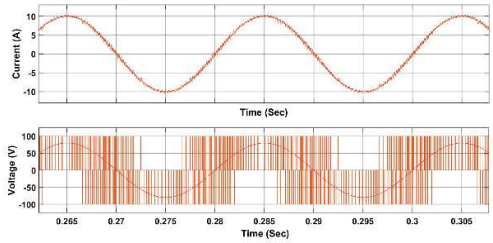
4. ผลการจำลอง

สัญญาณขับอินเวอร์เตอร์จากแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 8

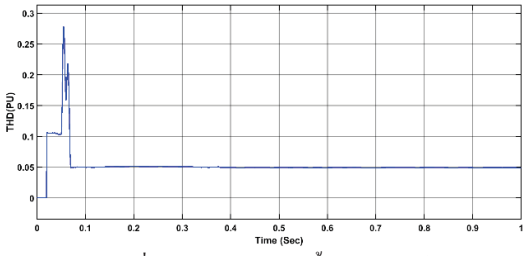


รูปที่ 8 สัญญาณขับอินเวอร์เตอร์

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยอัลกอลิทึมแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผ่านการฟิลเตอร์มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซด์ ผลรวมของความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์ขณะสภาวะคงตัวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 กระแสและแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 10 ผลรวมความผิดเพี้ยนฮามอนิกส์

5. สรุป

ผลการจำลองการทำงานด้วย MATLAB / Simulink อัลกอริทึมแบบจำลองการทำนายกระแสไฟฟ้าสามารถควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่ความถี่ 50 Hz สามารถควบคุมแรงดันและกระแสไฟฟ้าขาออก 1 เฟส เพื่อจ่ายกระสไฟฟ้าเข้าสู่กริดได้ ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิคของกระแสไฟฟ้า(THDi) เท่ากับ 4.91 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่เกินค่าเกณฑ์มาตรฐาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ เป็นอย่างสูงที่ให้ใช้สถานที่ตลอดจนโปรแกรมแมทแลป/ซิมมูลิงค์ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Patricio Cortes, Samir Kouro, Francisco Barrios and Jose Rodriguez “Predictive Control of a Single-phase Cascaded H-Bridge Photovoltaic Energy Conversion System” IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, pp.1423-1428, June 2-5, 2012

[2] Patricio Cortés, Alan Wilson, Samir Kouro, Jose Rodriguez, and Haitham Abu-Rub “Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters” IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 8, pp.2691-2699, AUGUST 2010

[3] Marek Pástorand Jaroslav Dudrik “PredictiveCurrentControlofGrid-tiedCascadeH-bridge Inverter” Online ISSN 1848-3380, Print ISSN 0005-1144 ATKAFF 54(3), pp.308–315, 2013

[4] Bin Yu and Liuchen Chang “Improved Predictive Current Controlled PWM for Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters” IEEE, pp.231-236

[5] Kamel Barra and Djamel Rahem “Predictive direct power control for photovoltaic grid connected syatem:An approch based on multilevel converters” Energy Conversion and Management 78, pp.825-834, 2014



อนุชิต อุไรรัตน์ จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ พลังงานทดแทน



เฉลิม จินาตุน จบการศึกษาปริญญาโทจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ พลังงานทดแทน



สุเมธ เทศกุล จบการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจ พลังงานทดแทน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ไฮบริดออฟกริดและการตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT สำหรับฟาร์มสุกรอัจฉริยะ

Hybrid Off-Grid Solar Energy System and Energy Monitoring with IIoT for Smart Pig Farms

ธีรยุทธ ทองทวี[1] ธวัช ชูชิต[2] ธนวัฒน์ ศรีรักษา[3] และ อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
E-mail: anone@webmail.npru.ac.th*

บทคัดย่อ

ฟาร์มสุกรอัจฉริยะต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพและต้นทุนต่ำ เพื่อรองรับระบบควบคุมปัจจัยการเจริญเติบโต ระบบให้อาหารอัตโนมัติ และอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์ระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริด ออฟกริด (Hybrid Off-grid Solar System) โดยใช้ระบบ IIoT สำหรับฟาร์มสุกร โดยศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในฟาร์ม และกำหนดขนาดของแผงโซล่าเซลล์ อินเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์เสริมอื่น ๆ เพื่อให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า ระบบสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้ 36.72% และเพิ่มความเสถียรของพลังงานในฟาร์ม ทั้งนี้ ระบบดังกล่าวยังช่วยส่งเสริมแนวทางการทำฟาร์มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, ระบบไฮบริดออฟกริด, ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT)

Abstract

Smart pig farms require stable and cost-effective electricity to support growth factor control systems, automated feeding systems, and various monitoring devices. This study presents the design and analysis of a Hybrid Off-grid Solar System utilizing IIoT for pig farms. The research examines electricity consumption within the farm and determines the appropriate sizing of solar panels, inverters, and other auxiliary components to ensure optimal power generation. The results indicate that the system can reduce electricity costs by 36.72% while enhancing energy stability within the farm. Furthermore, this system promotes environmentally friendly farming practices.

Keywords: Solar Energy, Hybrid Off-Grid System, Internet of Things (IoT)

1. บทนำ

ปัจจุบัน เทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญในการลดต้นทุนพลังงาน และเสริมความยั่งยืนให้ผู้ประกอบการ โดยเฉพาะในฟาร์มสุกรอัจฉริยะซึ่งต้องใช้พลังงานต่อเนื่องสำหรับควบคุมปัจจัยการเจริญเติบโต ระบบให้อาหารอัตโนมัติและอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ อย่างไรก็ตามการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่ายหลักเพียงอย่างเดียวอาจมีต้นทุนสูงและไม่เสถียรในบางช่วงเวลา ดังนั้นการออกแบบระบบโซลาร์เซลล์แบบไฮบริดออฟกริดจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมเพื่อให้ฟาร์มใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับไฟฟ้าจากโครงข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก

ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์และ IoT มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรมและถูกนำมาใช้หลากหลายรูปแบบ เช่น การอ่านค่าเซ็นเซอร์เพื่อตรวจวัดพลังงานของระบบโซล่าเซลล์[1] การควบคุมสายพานลำเลียงด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ[2] และการจำลองระบบสื่อสารหลายโหมดในงานเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรด้วย IIoT [3]

ระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริดออฟกริดช่วยเพิ่มเสถียรภาพด้านพลังงานในฟาร์ม ลดค่าไฟ และส่งเสริมการทำฟาร์มที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การออกแบบระบบที่เหมาะสมควรคำนึงถึงปริมาณพลังงานที่ใช้ในแต่ละวันและการบริหารโหลดไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนพลังงานในฟาร์มสุกรอัจฉริยะโดยออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริดออฟกริดร่วมกับเทคโนโลยี IIoT เพื่อให้สามารถตรวจวัดและจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

ระบบโซล่าเซลล์ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ระบบโซล่าเซลล์แบบ

ออนกริด ระบบโซล่าเซลล์แบบออฟกริด และระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริด [4] โดยแต่ละระบบมีลักษณะการทำงานและการใช้งานที่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ดังนี้ไ

1. ระบบโซล่าเซลล์แบบออนกริด คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงโซล่าเซลล์ พร้อมเชื่อมต่อกับโครงข่ายของการไฟฟ้า และสามารถส่งไฟส่วนเกินไปขายยังการไฟฟ้าได้ ระบบนี้ใช้อินเวอเตอร์ชนิด Grid-tie Inverter อินเวอเตอร์ชนิดนี้มี 2 ประเภท ได้แก่ Micro Grid Inverter และ String Solar Inverter

2. ระบบโซล่าเซลล์แบบออฟกริด คือ ระบบโซล่าเซลล์ที่ทำงานอิสระโดยที่ไม่เชื่อมต่อกับการไฟฟ้า มีแบตเตอรี่เป็นตัวเก็บพลังงานเพื่อจ่ายไฟในช่วงที่ไม่มีแสงแดด สำหรับระบบนี้ใช้ off-grid อินเวอร์เตอร์จะแบ่งออกเป็นอีก 2 ประเภทคือแบบ สวิทชิ่ง และแบบหม้อแปลงเทอรอยด์ แบบสวิทชิ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อย คือ Pure Sine Wave และ Modified Sine Wave

3. ระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริด คือ ระบบที่มีหรือไม่มีแบตเตอรี่ที่สามารถทำงานร่วมกับโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้มีพลังงานใช้อย่างต่อเนื่องแม้ไม่มีแสงแดด ระบบนี้มี 3 ชนิดได้แก่ ระบบไฮบริดแบบออนกริด คือ ระบบที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายการไฟฟ้าสามารถจ่ายไฟย้อนได้ และระบบไฮบริดแบบออฟกริด คือ ระบบที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายการไฟฟ้าแต่ปิดกริดไม่จ่ายไฟย้อนกลับไปยังโครงข่ายการไฟฟ้า และระบบไฮบริดแบบออนกริด/ออฟกริด คือ ระบบที่อินเวอร์เตอร์ได้รวมทั้งสองระบบเข้าด้วยกันขึ้นอยู่กับการเลือกตั้งค่าการใช้งานโดยที่ยังสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกอื่นๆ เช่น เครื่องปั่นไฟหรือโครงข่ายการไฟฟ้าร่วมกับแบตเตอรี่ อีกทั้งยังมีระบบที่คอยควบคุมการใช้ไฟอัตโนมัติ

จากข้อดีและข้อเสียดังกล่าว ในงานวิจัยได้นำเสนอการออกแบบระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริดแบบออฟกริดสำหรับฟาร์มสุกร โดยระบบนี้ได้เลือกใช้อินเวอร์เตอร์ SOFAR SOLAR 5kW เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช่ร่วมกับแบตเตอรี่

3. การออกแบบ

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดแบบออฟกริดพร้อมระบบตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT งานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบที่ ปพนวิชญ์ฟาร์ม ตั้งอยู่เลขที่ 35 หมู่ 8 ตำบลโคกชะงาย อำเภอเมือง จังหวัดพัทลุง ซึ่งเป็นฟาร์มระบบปิดขนาดกลาง การออกแบบและสร้างชุดทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

3.1 การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ไฮบริดแบบออฟกริด

การออกแบบระบบไฮบริดแบบออฟกริดสำหรับฟาร์มสุกรเริ่มต้นจากการข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการเลี้ยงสุกร 1 รุ่น (เป็นระยะเวลา 4 เดือน) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการเลี้ยงสุกร 1 รุ่น

เดือน/ปี	พลังงานไฟฟ้า(kWh)	พลังงานไฟฟ้าต่อวัน(kWh)
08/67	2908	93.81
09/67	2876	95.87
10/67	4376	141.16
11/67	3298	109.93
ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อวัน		110.19

จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในตารางที่ 1 สามารถนำมาออกแบบระบบ โดยใช้ค่าเฉลี่ยใน 4 เดือน พบว่าค่าเฉลี่ยใช้ไฟต่อวัน 110.19 kWh ดังนั้นสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงได้จากสมการที่ 1 มีค่าเป็น 4.59 kW ต่อชั่วโมง

$$P_{avge} = \frac{E_{avge}}{24} \quad (1)$$

โดยที่ E_{avge} คือ ค่าไฟเฉลี่ยต่อวัน (kWh)

P_{avge} คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง (kW)

จากข้อมูลแสงแดดจากกรมอุตุนิยมวิทยา จังหวัดพัทลุง พบว่ามีชั่วโมงแดดเฉลี่ยรายเดือนโดยฤดูแล้ง (ธันวาคม–เมษายน) มีชั่วโมงแดดเฉลี่ยประมาณ 6–8 ชั่วโมงต่อวัน ฤดูฝน (พฤษภาคม–พฤศจิกายน) มีชั่วโมงแดดเฉลี่ยประมาณ 3–5 ชั่วโมงต่อวัน[5] อาจจะทำให้มีผลกระทบต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า

3.1.1 การออกแบบจำนวนแผงโซล่าเซลล์

การออกแบบจำนวนแผงโซล่าเซลล์จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อชั่วโมงกับกำลังไฟฟ้าของแผงโซล่าเซลล์ ดังนั้นวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผงโซล่าเซลล์ ขนาด 550 W จากสมการที่ 2 พบว่าใช้แผงโซล่าเซลล์จำนวน 8.35 แผง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเผื่อโหลดไว้ที่ 10 แผง

$$N_{panel} = \frac{P_{avge}}{P_{panel}} = \frac{4590}{550} = 8.35 \quad (2)$$

โดยที่ N_{panel} คือ จำนวนแผงโซล่าเซลล์

P_{panel} คือ กำลังไฟฟ้าของแผงโซล่าเซลล์ 1 แผง (W)

3.1.2 การเลือกอินเวอเตอร์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อินเวอเตอร์ขนาด 5 kW แบรนด์ SOFAR SOLAR 5kW Inverter Grid tie/on Grid Inverter อินเวอเตอร์

ชนิดนี้สามารถทำได้ทั้ง ระบบออนกริด ระบบออฟกริด และระบบไฮบริดออฟกริด

3.1.3 การคำนวณจุดคุ้มทุน

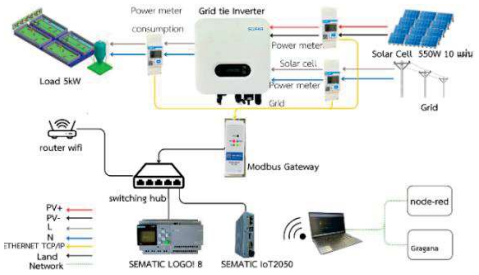
จากการติดตั้งชุดทดลอง ต้นทุนทั้งหมด 83,500 บาท ประกอบไปด้วยค่าอินเวอเตอร์ 18,000 บาท แผงโซล่าเซลล์ 550 W 10 แผง 25,000 บาท อุปกรณ์เมาน์ติ้ง 8,000 บาท สายไฟและอุปกรณ์ 5,000 บาท และค่าติดตั้ง 27,500 บาท ระบบนี้คืนทุนได้ภายใน 2 ปี 4 เดือนซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3 [7] โดย 1 ปี โซล่าเซลล์ผลิตพลังงานได้ 8.2125 MWh เมื่อคิดเป็นเงิน 32,850 บาท/ปี

$$BEP_{years} \approx \frac{I_0}{P \times H \times 365 \times C \times \frac{1-(1-r)^n}{r}} \quad (3)$$

โดยที่ I_0 คือ ต้นทุนเริ่มต้น (บาท)
P คือ ขนาดระบบ (kW)
H คือ ชั่วโมงแดดเฉลี่ย/วัน
C คือ ค่าไฟฟ้า (บาท/หน่วย)
r คือ อัตราเสื่อม (%/ปี) เช่น 0.007
n คือ อายุระบบ (ปี) เช่น 25

3.2 การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT

ระบบตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT วัดพลังงาน 3 จุด คือ 1) วัดพลังงานที่ใช้ในฟาร์มทั้งหมด 2) วัดพลังงานที่โซล่าเซลล์ผลิตได้ และ 3) วัดพลังงานที่มาจากการไฟฟ้าใช้พาวเวอร์มิเตอร์ 3 ตัว จากนั้นใช้ SEMATIC LOGO !8 อ่านค่าจากพาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นส่งค่าไปแสดงบน Grafana dashboard ผ่าน SIMATIC IoT 2050 แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดพลังงานด้วย IIoT

3.2.1 การออกแบบหน้าจอแสดงผล

หน้าจอแสดงผลของระบบตรวจวัดบน Grafana dashboard [5] แสดงผลในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วย ค่าอุณหภูมิและความชื้น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้าทั้ง 3 ตัว คือ Grid Solar cell และ consumption ข้อมูลทั้งหมดเก็บแบบ Real-time ใช้ Protocol Modbus RTU/TCP



รูปที่ 2 หน้าจอตรวจวัดพลังงานด้วยระบบ IIoT บน Grafana dashboard

3.3 การติดตั้งชุดทดสอบ

การติดตั้งชุดทดสอบได้ติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) พื้นที่โล่งทำมุมเอียง 15 องศาทางทิศใต้แสดงในรูปที่ 3 โดยใช้สมการที่ 4 คำนวณพื้นที่ติดตั้ง และติดตั้งอินเวอเตอร์ชนิดกริดไท SOFAR 5 kW

$$A = \frac{P_{avge}}{P_{panel}} \times A_{panel} \quad (4)$$

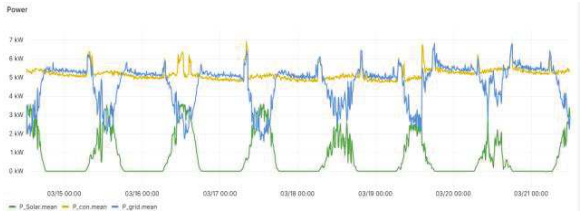
โดยที่ A คือ พื้นที่ติดตั้งทั้งหมด
P_{avge} คือ กำลังการผลิตรวมที่ต้องการ (kW)
P_{panel} คือ กำลังของแผงโซล่าเซลล์ต่อแผง (W)
A_{panel} คือ พื้นที่ของแผงโซล่าเซลล์ 1 แผง (m^2/แผง)



รูปที่ 3 การออกแบบและติดตั้งโซล่าเซลล์บนหลังคา (Solar Rooftop)

3.4 ผลการทดสอบ

จากการทดลองเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าพบว่ากำลังไฟฟ้าในแต่ละวันไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศของต่ละวัน โดยปริมาณการผลิตโซล่าเซลล์ในช่วงวันที่ 3-21 กุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งเป็นผลทดสอบเบื้องต้นแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การผลิตไฟฟ้าโซล่าเซลล์ในแต่ละวันของเดือนในระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม 2568

โหลดของระบบประกอบด้วย พัดลมในฟาร์ม 6 ตัว ไฟแสงสว่าง ปั๊มน้ำ และมอเตอร์จ่ายอาหารสุกร โดยทำการเก็บผลทดลอง 7 วัน ได้ดังนี้

ตารางที่ 2 การใช้พลังงานไฟฟ้าในแต่ละวัน

วันที่ (มี.ค. 68)	Solar (Unit)	Grid (Unit)	Consumption (Unit)	% การประหยัดพลังงาน
10	17	35	52	33.33
11	16	38	54	32
12	19	32	51	38.7
13	16	36	48	32.65
14	16	32	48	35.55
15	16	33	49	33.33
16	21	28	49	43.75

จากการคำนวณ พบว่าแผงโซล่าเซลล์สามารถผลิตพลังงานเฉลี่ยได้ประมาณ 22.5 kWh/วัน ภายใต้เงื่อนไขแสงแดด 4.5 ชั่วโมงต่อวันในพื้นที่ภาคใต้ อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่าพลังงานที่ผลิตได้จริงอยู่ระหว่าง 16–21 kWh/วัน สะท้อนให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของค่าที่ได้จากการใช้งานจริงเมื่อเทียบกับค่าคำนวณ แต่ยังอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน

พลังงานที่ผลิตได้จริงมีความผันผวนตามที่แสดงในรูปที่ 4 โดยมีปัจจัยหลักจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงโซล่าเซลล์ อัตราการประหยัดพลังงานตลอดช่วงทดลองอยู่ระหว่าง 32%–43.75% โดยในวันที่ 16 มีนาคม 2568 ระบบสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 21 kWh/วัน คิดเป็นมูลค่า 26,127.36 บาทต่อปี และสามารถคืนทุนภายในระยะเวลา 3 ปี 2 เดือน

4.สรุป

การวิจัยนี้ออกแบบและวิเคราะห์ระบบโซล่าเซลล์แบบไฮบริดออฟกริดสำหรับฟาร์มสุกรอัจฉริยะ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มเสถียรภาพของระบบภายในฟาร์ม ระบบใช้แผงโซล่าเซลล์ขนาด 550 W จำนวน 10 แผง และอินเวอร์เตอร์ขนาด 5 kW จากแบรนด์ SOFAR SOLAR ติดตั้งแบบ Solar Rooftop ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตพลังงานเฉลี่ย 16–21 kWh/วัน ใกล้เคียงกับค่าคำนวณที่ 22.5 kWh/วัน ลดค่าไฟได้เฉลี่ย 32–43.75% ใช้งบติดตั้งรวม 83,500 บาท และสามารถคืนทุนได้ภายใน 3 ปี 2 เดือน ระบบทำงานได้ดีที่สุดในช่วงเวลา 10:00–15:00 น. โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพคือสภาพอากาศที่แปรปรวน ซึ่งอาจทำให้ผลผลิตคลาดเคลื่อนจากค่าที่คำนวณไว้ อย่างไรก็ตามผลลัพธ์โดยรวมสอดคล้องกับการคำนวณเบื้องต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] นราวิชญ์ จันสุข และ คณะ ,2565. “ระบบตรวจวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบโซลาเซลล์โดยใช้ IIoT” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 (หน้า720-723)

[2] อานนท์ เฟลเลอร์ และ คณะ, 2564. “ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการควบคุมสายพานลำเลียงโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ” การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่31, (หน้า 84-91

[3] B. Almadani and S. M. Mostafa, "IIoT Based Multimodal Communication Model for Agriculture and Agro-Industries," IEEE Access, vol. 9, pp. 10070–10085, Jan. 2021

[4] Energy for Dummies, “Inverter Types: Different Types of Inverters and Their Applications,” Energy for Dummies, 2025. [Online]. Available: https://energyfordummies.com/inverter-type/. [Accessed: Apr. 23, 2025].

[5] กรมอุตุนิยมวิทยา, “ข้อมูลสภาพอากาศจังหวัดพัทลุง,” [ออนไลน์]. Available: https://tmd.go.th/weather/province/pattalung. [เข้าถึงเมื่อ: 23 เม.ย. 2025].

[6] Grafana Labs, “Grafana: The Open-Source Data Visualization Platform,” 2023. [Online]. Available: https://grafana.com. [Accessed: Mar. 27, 2025].

[7] M. H. Jahangir, A. Hossain, M. R. R. I. Ripon, and T. Sultana, "Performance and economic assessment of solar photovoltaic systems with consideration of degradation," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, Mar. 2021. [Online]. Available: https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/11714. Accessed: Apr. 26, 2025.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประหยัดพลังงานไฟฟ้าเครื่องปรับอากาศแยกส่วนด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้น้ำทิ้งจากชุดคอยล์เย็น

Energy Saving of a Split-Type Air Conditioner Using a Heat Exchange Pipe with Wastewater from the Cooling Coil

เมธาสิทธิ์ โชคฤทัย[1*] จุมพลภัทร์ สีทากุลเศรษฐ์[1] และชญานนท์ แสงมณี[2]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
2 ถนนราชธานี ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
64 ถ.ทหาร ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000
E-mail: metasit.c@ubru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศแยกส่วนแบบติดผนังขนาด 9,000 BTU ที่ใช้สารทำความเย็น R-22 โดยติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณท่อดิสชาร์จจากคอมเพรสเซอร์ ซึ่งใช้น้ำทิ้งจากคอยล์เย็นเพื่อลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น โดยเปรียบเทียบวัสดุท่อแลกเปลี่ยน 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง อลูมิเนียม และสแตนเลส ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิตั้งค่าคงที่ 25°C วันละ 8 ชั่วโมง เป็นเวลา 20 วัน และเลือกข้อมูล 10 วันที่มีอุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยต่างกันไม่เกิน 3°C มาวิเคราะห์ ผลการทดลองพบว่าท่อทองแดงให้การระบายความร้อนดีที่สุด ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 13.17% พร้อมเพิ่มค่า EER และ COP ได้ 24.42% และ 24.64% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำทิ้งจากคอยล์เย็นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพระบบเครื่องปรับอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, ประสิทธิภาพการให้ความเย็น, สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

Abstract

This research aims to study the energy savings of a 9,000 BTU wall-mounted split-type air conditioner using R-22 refrigerant. A heat exchange pipe was installed at the compressor discharge line, utilizing wastewater from the evaporator coil to reduce the refrigerant temperature before it enters the condenser. Three pipe materials—copper, aluminum, and stainless steel—were compared. The experiment was conducted at a fixed indoor temperature of 25°C for 8 hours per day over 20 days, with data from 10 days (with outdoor temperature differences within 3°C) selected for analysis. Results showed that copper pipes provided the best heat dissipation, reducing electricity consumption by 13.17% and increasing the EER and COP by 24.42% and 24.64%, respectively. The findings indicate that using wastewater from the evaporator coil can significantly enhance the performance of split-type air conditioning systems.

Keywords: heat exchanger pipe, Energy Efficiency Ratio, Coefficient of Performance

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เครื่องปรับอากาศได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ เนื่องจากช่วยสร้างความเย็นสบายภายในอาคารและเพิ่มความสะดวกในการทำกิจกรรมต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การใช้งานเครื่องปรับอากาศก่อให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อทรัพยากรพลังงานและสิ่งแวดล้อม เครื่องปรับอากาศแยกส่วนที่ใช้สารทำความเย็น R-22 มีหลักการทำงานโดยดูดซับความร้อนจากภายในห้อง และปล่อยความร้อนออกภายนอกผ่านคอมเพรสเซอร์ คอนเดนเซอร์ และอีวาพอเรเตอร์ แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่การลดการใช้พลังงานยังเป็นประเด็นสำคัญต่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน ที่ผ่านมา มีการศึกษาหลายแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ เช่น การใช้ความเย็นจากน้ำทิ้งของพัดลมคอยล์เย็น (ชลสิทธิ์ เหล่าสนธิ์ และคณะ, 2564) และการลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ด้วยถังแลกเปลี่ยนความร้อน (สิริสวัสดิ์ จึงเจริญนิรชร และทวีวัฒน์ สุภารส, 2563) จากแนวคิดข้างต้น ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการประหยัดพลังงานของเครื่องปรับอากาศแยกส่วน โดยการติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณท่อดิสชาร์จจากคอมเพรสเซอร์ ซึ่งใช้น้ำทิ้งจากคอยล์เย็นในการ

ลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ ระบบดังกล่าวไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่ม มีต้นทุนต่ำ และติดตั้งง่าย โดยคาดหวังว่าจะช่วยลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ

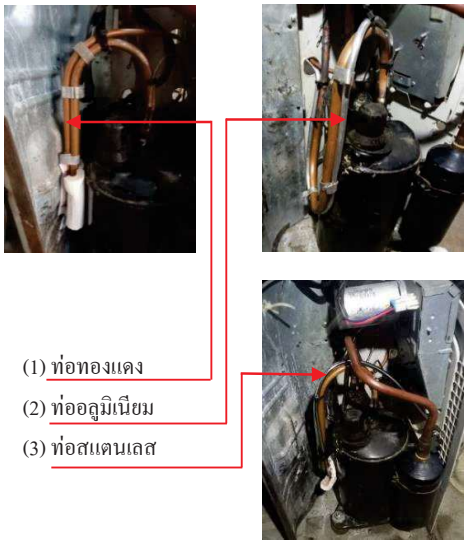
2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 อุปกรณ์และการออกแบบ

ในการศึกษานี้ได้ใช้เครื่องปรับอากาศแยกส่วนแบบติดผนัง ขนาด 9,000 BTU ยี่ห้อ SAMSUNG ที่ใช้สารทำความเย็น R-22 และมีคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งผ่านการใช้งานต่อเนื่องมากกว่า 15 ปี (แสดงในรูปที่ 1) เพื่อศึกษาการลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ โดยติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณท่อดิสชาร์จระหว่างคอมเพรสเซอร์กับคอนเดนเซอร์ ซึ่งใช้วัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ (1) ท่อทองแดง (2) ท่ออลูมิเนียม และ (3) ท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 หุน ความหนา 1 มิลลิเมตร และความยาว 600 มิลลิเมตร โดยทำการดัดท่อทั้ง 3 ชนิดให้เข้ากับรูปทรงของท่อดิสชาร์จเพื่อการติดตั้งที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องปรับอากาศที่ใช้ในการทดสอบ

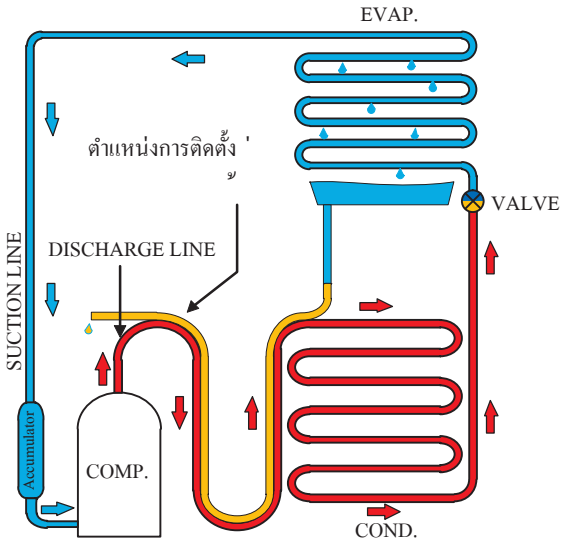


รูปที่ 2 การติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 ชนิด

จากรูปที่ 2 ตำแหน่งการติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 ชนิด บริเวณท่อดิสชาร์จ ใช้ลวดอลูมิเนียมแบนในการยึดผิวสัมผัสของท่อให้แนบสนิทกันเพื่อนำความร้อนจากสารทำความเย็นในระบบออกโดยน้ำทิ้งจากชุดคอยล์เย็นที่ไหลในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2.2 หลักการทำงานของเครื่องปรับอากาศที่ติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เริ่มที่คอมเพรสเซอร์จะดูดสารทำความเย็นในสถานะแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำ แรงดันต่ำ จากอีวาพอเรเตอร์แล้วอัดสารทำความเย็นให้มีอุณหภูมิสูง แรงดันสูงไปที่ท่อดิสชาร์จซึ่งได้ติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อน สารทำความเย็นจะถูกถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนผ่านท่อแลกเปลี่ยนความร้อนออกส่วนหนึ่งก่อนที่สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่คอนเดนเซอร์ เพื่อควบแน่นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลว แล้วลดแรงดันในระบบที่ท่อแคปปิลารี (VALVE) สารทำความเย็นสถานะของเหลวภายในอีวาพอเรเตอร์ระเหยตัวเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส จะดูดรับปริมาณความร้อนจากอากาศโดยรอบ ทำให้อากาศโดยรอบอีวาพอเรเตอร์มีอุณหภูมิลดต่ำลง และจะเกิดน้ำควบแน่นจากความชื้นในอากาศที่อีวาพอเรเตอร์ น้ำเย็นที่เกิดจากการควบแน่นในอีวาพอเรเตอร์จะถูกต่อออกมาเข้าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนออกจากท่อดิสชาร์จและถูกเดรนทิ้งเป็นวัฏจักรต่อไป ทำให้แรงดันของสารทำความเย็นในระบบเครื่องปรับอากาศลดลงจึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอมเพรสเซอร์ลดลงตาม แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทำงานของเครื่องปรับอากาศที่ติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

2.3 วิธีการทดลอง

การทดลองในการวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศแยกส่วน สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ และค่าพลังงานไฟฟ้า ของเครื่องปรับอากาศระหว่างก่อนและหลังติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 แบบ โดยอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 36 Cº-38 Cº ความชื้น 50-55% ทำการปรับตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศคงที่ 25 องศาเซลเซียส เวลาทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน เก็บผลการทดลอง 20 วันต่อ 1 การทดลอง เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายนอกได้จึงเลือกผลจากการทดลองทั้ง 4 การทดลองมา 10 วันในวันที่มีอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยต่างกันไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพระหว่างก่อน และหลังติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อน วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคับเปิ้ล Type K โดยต่อเข้ากับ DATA LOOGGER รุ่น Lutron BTM-4208SD มีค่าความถูกต้อง ±(0.4 % + 0.5 °C) ใช้ KILOWATT HOUR ขนาด 5/15A รุ่น Global House V.E.G. DD28 และ WIFI SMART CIRCUIT BREAKER รุ่น TXCB1-TWM metering มีค่าความถูกต้อง 0.1 โดยบันทึกค่าทุก 60 นาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมาวิเคราะห์ผลโดยการหาประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นส่วนใหญ่นิยมหาในรูปแบบของค่าประสิทธิภาพการให้ความเย็น EER และสัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ COP ได้จาก

การคิดค่าไฟฟ้าและการหาค่าใช้จ่ายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการลดพลังงานไฟฟ้าหาได้จาก

$$W = P \times t \quad (1)$$

$$Cost = Rate \times W \quad (2)$$

W คือ พลังงานไฟฟ้า (kW/h)
P คือ กำลังไฟฟ้า (kW)
t คือ เวลาที่ใช้ (h)
Cost คือ ค่าไฟฟ้า Baht (บาท)
Rate คือ อัตราค่าไฟฟ้า (Unit)

$$EER = \frac{\text{Cooling Capacity}}{\text{Power Input}} \quad (3)$$

EER คือ ประสิทธิภาพการให้ความเย็น
Cooling Capacity คือ ค่าความเย็นที่ผลิตได้ (BTU/h)
Power Input คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (W)

$$\frac{\text{Cooling Capacity}}{\text{Power Input}} \quad (4)$$

เมื่อ 1 W = 3.412 BTU/h
COP คือ สัมประสิทธิ์เชิงสมรรถนะ

3. ผลการทดลอง

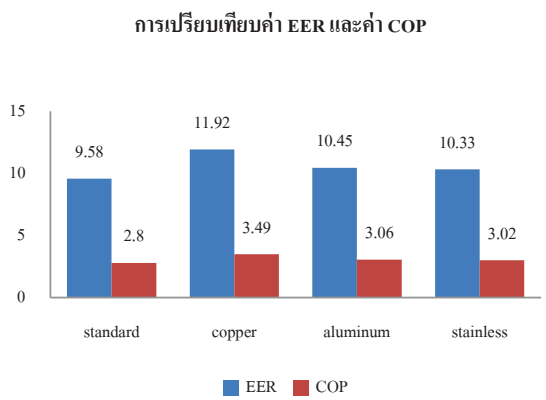
ตารางที่ 1 ผลด้านพลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน

ครั้งที่	กระแสไฟฟ้า(A)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (unit)
1	3.87	7.2
2	4.01	7.8
3	3.88	7.2
4	3.98	7.1
5	3.93	7.3
6	4.27	7.6
7	4.28	7.5
8	4.15	7.6
9	4.37	7.8
10	4.08	7.3
ค่าSD	0.1784	0.2547

ตารางที่ 2 ผลด้านพลังงานไฟฟ้าหลังติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 ชนิด

ครั้งที่	กระแสไฟฟ้า(A)			ค่าพลังงานไฟฟ้า (unit)		
	ทองแดง	อลูมิเนียม	สแตนเลส	ทองแดง	อลูมิเนียม	สแตนเลส
1	3.44	3.72	3.75	6.6	6.8	6.9
2	3.14	3.86	3.82	6.3	6.7	6.7
3	3.43	3.82	3.85	6.4	6.5	6.6
4	3.12	3.66	3.72	6.7	6.7	6.9
5	3.25	3.71	3.84	6.2	6.5	6.6
6	3.39	3.89	3.80	6.4	6.5	6.5
7	3.17	3.62	3.66	6.6	6.6	6.8
8	3.24	3.69	3.73	6.3	6.9	6.8
9	3.23	3.60	3.75	6.4	6.7	6.7
10	3.41	3.84	3.93	6.7	6.9	7.0
ค่าSD	0.1244	0.1040	0.0782	0.1776	0.1549	0.1581

จากตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ค่าพลังงานไฟฟ้าเครื่องปรับอากาศก่อนติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อน 10 วัน เป็น 74.4 หน่วย ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดทองแดง อลูมิเนียม และ สแตนเลส เป็น 64.4 , 66.8 และ 67.5 หน่วย ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าระหว่างก่อน-หลังติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 3 ชนิดจะสามารถประหยัดได้ 13.17 , 10.21 และ 9.27 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่า EER และ COP เฉลี่ยทั้ง 4 การทดลอง

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่า EER และ COP ของเครื่องปรับอากาศก่อน-หลังติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อนทั้ง 3 ชนิด พบว่าท่อแลกเปลี่ยนความร้อนช่วยลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่นส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดทองแดงสามารถเพิ่มค่า EER และ COP เมื่อเทียบกับแบบก่อนติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 24.42 และ24.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. สรุป

จากผลการทดลองพบว่า การติดตั้งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถช่วยลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์ ส่งผลให้เครื่องปรับอากาศทำงานได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ท่อทองแดงเป็นวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่ามีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับท่ออลูมิเนียมและท่อสแตนเลส ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 13.17% และเพิ่มค่า EER และ COP ได้ถึง 24.42% และ 24.64% ตามลำดับ สาเหตุที่ท่อทองแดงมีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากค่าการนำความร้อนของทองแดงอยู่ที่ประมาณ 398 W/m·K ซึ่งสูงกว่าอลูมิเนียม (237 W/m·K) และสแตนเลส (16 W/m·K) อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นหลังผ่านท่อแลกเปลี่ยนลดลงอย่างชัดเจน ช่วยลดภาระของคอนเดนเซอร์และคอมเพรสเซอร์ ส่งผลให้การทำงานของระบบปรับอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ในขณะเดียวกัน ท่ออลูมิเนียมและท่อสแตนเลสจะมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า แต่มีแนวโน้มช่วยลดอุณหภูมิของสารทำความเย็นและประหยัดพลังงานได้บ้าง แม้ไม่มากเท่าท่อทองแดง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำทิ้งจากชุดคอยล์เย็นในเชิงของการอนุรักษ์พลังงานซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริงกับระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาดเล็ก การวิจัยต่อไปในอนาคต ควรศึกษาการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนให้กับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและศึกษาการนำท่อแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดทองแดงไปใช้ร่วมกับการระบายความร้อนรูปแบบอื่น เช่น สเปรย์น้ำ แผงม่านน้ำ เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ชลสิทธิ์ เหล่าสนธิ์ และคณะ, “การประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศด้วยอุปกรณ์ระบายความร้อนจากน้ำทิ้งของพัดลมคอยล์เย็น,” *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา*, ปีที่15, ฉบับที่ 2, หน้า 10-23, กรกฎาคม – ธันวาคม, 2564.

[2] สิริสวัสดิ์ จึงเจริญนิรชร และทวีวัฒน์ สุภารส, “การเพิ่มประสิทธิภาพระบบปรับอากาศด้วยการลดอุณหภูมิสารทำความเย็นก่อนเข้าคอนเดนเซอร์โดยใช้ถังแลกเปลี่ยนความร้อน,” *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, ปีที่12, ฉบับที่ 2, หน้าที่ 312-322, พฤษภาคม-สิงหาคม, 2563.

[3] ธนวรา ทองล้วน, “การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในระบบเครื่องปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยอากาศโดยการพ่นน้ำ,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (เครื่องกล), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2547.

[4] เจษฎา วิเศษมณี, “รูปแบบการระบายความร้อนด้วยน้ำที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน,” *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้าที่ 125-134, กรกฎาคม-ธันวาคม, 2559.

[5] E. Hajidavalloo and H. Eghtedari, "Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporatively cooled air condenser," *International Journal of Refrigeration*, vol. 33, pp. 982–988, 2010.

[6] S. Juengjaroennirachon, N. Pratinthong, P. Namprakai, and T. Suparos, "Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system’s energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 1, pp. 393–400, 2017.

[7] S. Atthajariyakul and C. Lertsatittanakorn, "Small fan assisted air conditioner for thermal comfort and energy saving in Thailand," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 10, pp. 2499–2504, 2008.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบเฝ้าระวังปั๊มน้ำแบบเรียลไทม์

Development of a Real-Time Water Pump Monitoring System

ณัฐพงศ์ สอนอาจ และ คมกฤษณ์ ชูเรือง
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม
E-mail: nutthapong_s@npu.ac.th

บทคัดย่อ

ปั๊มน้ำที่ทำงานต่อเนื่องในระยะเวลานานภายใต้สภาวะไร้โหลดจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในขดลวด ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวนและการลัดวงจรภายในมอเตอร์ ส่งผลให้เกิดความเสียหายรุนแรงและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสหรือปั๊มน้ำในสภาพการทำงานจริง โดยใช้เซ็นเซอร์กระแสและแรงดันเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ในสภาวะมีโหลดและไร้โหลด นอกจากนี้ยังมีการตั้งค่าหน่วงเวลาในการปิดการทำงานของมอเตอร์เมื่ออยู่ในสภาวะมีโหลด เพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานในขณะที่ไม่มีโหลด

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถตรวจสอบและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการป้องกันมอเตอร์และการหลีกเลี่ยงการสิ้นเปลืองไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีน้ำ

คำสำคัญ: ปั๊มน้ำ, เซ็นเซอร์กระแส, ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

Water pumps operating continuously for extended periods under no-load conditions can lead to heat buildup in the windings, resulting in insulation degradation and internal short circuits within the motor. This causes severe damage and increases maintenance costs. Therefore, this research presents a method for monitoring the operation of three-phase induction motors or water pumps under real operating conditions, utilizing current and voltage sensors to assess and analyze the motor's behavior in both loaded and unloaded states. Additionally, a delay setting is implemented to shut down the motor when in a loaded state, preventing operation during no-load conditions.

Testing results demonstrate that the proposed system effectively monitors and controls the motor's operation, allowing for accurate shutdown and activation under both loaded and unloaded scenarios, thus protecting the motor and reducing electricity waste when no water is present.

Keywords: water pump, current sensor, microcontroller

1. บทนำ

ปั๊มน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบการจัดการน้ำ ซึ่งมีบทบาทในการขนส่งน้ำจากแหล่งต้นน้ำไปยังจุดใช้งานต่างๆ เช่น ในการเกษตร, อุตสาหกรรม, และการประปา การทำงานที่มีประสิทธิภาพของปั๊มน้ำช่วยให้กระบวนการผลิตและการใช้ทรัพยากรน้ำเป็นไปอย่างราบรื่น นอกจากนี้ ปั๊มน้ำยังมีผลต่อความสามารถในการจัดการน้ำในพื้นที่ที่ประสบปัญหาภัยแล้งหรืออุทกภัย การดูแลรักษาและตรวจสอบการทำงานของปั๊มน้ำจึงมีความสำคัญเพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาในระยะยาว

งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นที่การวัดปริมาณกระแสไฟฟ้า [1] การเพิ่มเซ็นเซอร์ในการวัดระดับน้ำ [2] เป็นการออกแบบและทดสอบในห้องปฏิบัติการ[3]

วิจัยนี้มุ่งเน้นการทำงานของปั๊มน้ำสภาวะไร้โหลดหรือไม่มีน้ำในท่อส่งน้ำเนื่องจากในสภาวะนี้เซ็นเซอร์ลูกลอยจะยังไม่ทำงานทำให้ปั๊มน้ำทำงานตลอดเวลาเกิดความสะสมในขดลวด ในสภาวะมีโหลดเมื่อปั๊มน้ำทำงานและมีน้ำในท่อเซ็นเซอร์ลูกลอยจะทำงานเมื่อระดับเพิ่มขึ้นถึงจุดที่ตั้งค่าไว้และปั๊มน้ำจะหยุดทำงาน ดังนั้นการตรวจสอบความผิดปกติและควบคุมได้แบบตลอดเวลา สามารถติดตามสภาวะการทำงานและความผิดปกติ เพื่อป้องกันและลดความเสี่ยงความเสียหายของมอเตอร์แบบ 3 เฟสในสภาพแวดล้อมจริง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดสอบอุปกรณ์ที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์ โดยใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดกระแส และแรงดัน และใช้วัตต์มิเตอร์ในการวัดเทียบกับ PZEM 004T และ ESP8266 เพื่อดูค่าพารามิเตอร์ที่ได้ว่ามีความ

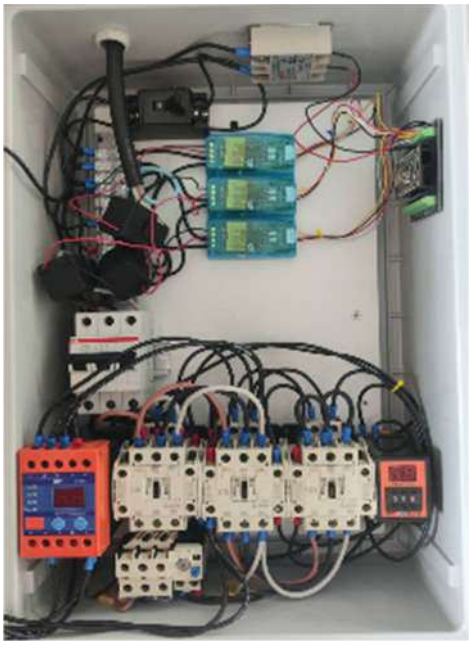
แตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนมากน้อยแค่ไหนเพื่อที่จะนำอุปกรณ์ไปใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์และควบคุมอุปกรณ์เพื่อความถูกต้องและได้มาตรฐาน การเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่าพารามิเตอร์และนำค่าพารามิเตอร์ส่งไปยัง google sheets เพื่อเก็บผลการทดลอง เงื่อนไขในการตัดวงจรมอเตอร์จะใช้พารามิเตอร์ขณะทดสอบในสภาวะไร้โหลด ส่วนเงื่อนไขการเปิดการทำงาน จะใช้พารามิเตอร์ขณะทดสอบในสภาวะมีโหลด

2.1 การออกแบบการทดลอง

โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบมาออกแบบชิ้นงานในการตรวจสอบการทำงานของมอเตอร์ โดยจะทำการ ต่อ PZEM004 และ CT เหมือนกับการทดสอบ แต่ จะทำการต่อ SSR หรือโซลิดสเตตรีเลย์เข้าไปในวงจรควบคุมมอเตอร์เพื่อตัดการทำงานอัตโนมัติ และแจ้งเตือนผ่าน แอปพลิเคชัน

2.2 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

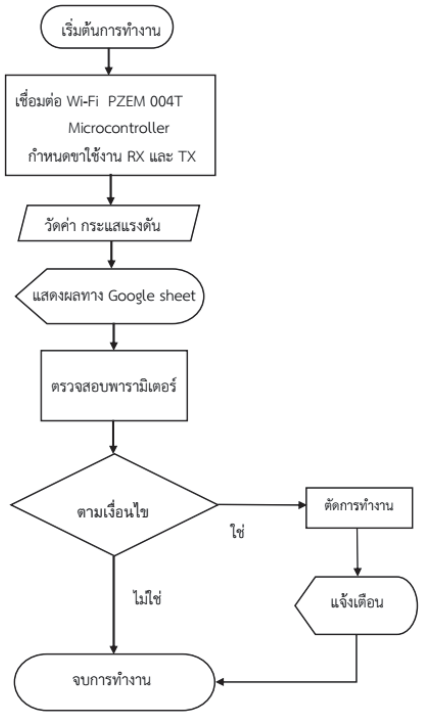
มอเตอร์และวงจรควบคุมมอเตอร์แบบสตาร์-เดลต้า ในการทดลอง และต่ออุปกรณ์ในการวัดค่าพารามิเตอร์



รูปที่ 1 วงจรในการทดสอบ

2.3 การออกแบบด้านซอฟแวร์

หาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ภายใต้สภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด ข้อมูลที่ได้จะถูกจัดเก็บไว้ที่ Google Sheet

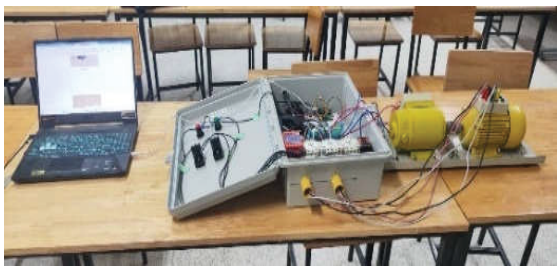


รูปที่ 2 ขั้นตอนการทดสอบ

ในขั้นการเก็บข้อมูลจะนำมอเตอร์แบบเหนี่ยวแบบ 3 เฟส ขนาด 120 วัตต์ เพื่อตรวจสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับสภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด เพื่อเป็นการกำหนดค่าในการเริ่มทำงานและหยุดทำงานของมอเตอร์ โดยใช้ SSR หรือโซลิดสเตตรีเลย์ สำหรับในขั้นตอนการทดสอบจริงจะใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้า

3. วิธีการทดลอง

การหาพารามิเตอร์ในสภาวะไร้โหลดและในสภาวะมีโหลด ผู้วิจัยจะทำการทดสอบความถูกต้องของค่าที่วัดได้กับเครื่องมือวัดมาตรฐานผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 3 การทดสอบเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์

ตารางที่ 1 ผลการวัดเทียบค่าวัตต์มิเตอร์เทียบกับอุปกรณ์ที่สร้าง

ตารางการทดสอบอุปกรณ์				
อุปกรณ์	V	I	P	PF
วัตต์มิเตอร์	220.1	0.74	159	0.97
PZEM-004T/ESP8266	221.3	0.74	163.98	0.98
ค่าที่ส่งไปใน google sheets	221.3	0.74	162.49	0.98

จากการทดสอบอุปกรณ์ที่ทำการวัดระหว่าง PZTM-004T และ ESP-2866 กับวัตต์มิเตอร์โดยอุปกรณ์ที่ทำการเทียบคือวัตต์มิเตอร์ รุ่น Lutron dw-6163 ดิจิตอลมิเตอร์ค่าความคลาดเคลื่อน 0.01 %แต่ PZEM-004T มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.05 % และผลการทดสอบที่ได้ดังที่จะแสดงให้เห็นในตารางที่ 1

การทดสอบการเก็บข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 120 W แสดงในตารางที่ 2 โดยผู้วิจัยได้เพิ่มโหลดทางกลให้กับมอเตอร์โดยพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความถี่ และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2 การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ขนาด 120 W								
ค่าพารามิเตอร์	โหลด							
	1mA	10.3 mA	20.6 mA	30.3 mA	40.5 mA	50.1 mA	60.3 mA	หน่วย
voltage 1	233.4	233.8	233.9	233.2	233.1	233.3	233.4	V
voltage 2	233.3	233.7	233.6	233.2	233.2	233.2	233.4	V
voltage 3	235.2	235.5	235.6	235	235	235.1	235.2	V
current 1	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.35	A
current 2	0.35	0.35	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	A
current 3	0.33	0.33	0.34	0.34	0.35	0.35	0.37	A
power 1	20.7	23.9	28.6	33.8	39.5	44.7	50.8	W
power 2	29	32.2	37	42.2	47.9	53.1	59	W
power 3	27.3	30.3	34.7	39.4	44.9	49.9	55.5	W
energy 1	0.042	0.043	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	kWh
energy 2	0.083	0.084	0.085	0.086	0.087	0.088	0.09	kWh
energy 3	0.093	0.094	0.095	0.096	0.097	0.098	0.099	kWh
frequency 1	50	50	50	50	49.9	50	49.9	Hz
frequency 2	50	50	50	50	49.9	50	50	Hz
frequency 3	50	50	50	50	49.9	49.9	50	Hz
pf 1	0.29	0.33	0.39	0.46	0.52	0.58	0.63	
pf 2	0.35	0.39	0.45	0.51	0.56	0.61	0.66	
pf 3	0.35	0.39	0.44	0.49	0.55	0.6	0.65	

ผลการเก็บข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 120 W 400V พบว่าตัวประกอบกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ สภาวะไร้โหลดตัวประกอบกำลังจะต่ำกว่าปกติ เนื่องจากมอเตอร์จะทำงานที่ความเร็วสูงโดยไม่ต้องใช้พลังงานมาก มอเตอร์จะใช้พลังงานที่ต้องการเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าและสร้างสนามแม่เหล็ก แต่ไม่สร้างแรงบิด สภาวะมีโหลดตัวประกอบกำลังจะสูงขึ้น เนื่องจากมอเตอร์ต้องทำงานเพื่อสร้างแรงบิดที่จำเป็นในการขับเคลื่อนโหลดในสภาวะนี้ มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีขึ้น

การทดสอบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 15 แรงม้า เป็นมอเตอร์สำหรับสูบน้ำจากบ่อพักน้ำชั้นล่างขึ้นไปชั้นบนสุดของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม โดยนำ CT PZTM-004T และไมโครคอนโทรลเลอร์ ต่อที่ตู้ควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบกับตู้ควบคุมปั๊มน้ำ

ทำการทดสอบเก็บค่าพารามิเตอร์ขณะที่มอเตอร์ทำงานในสภาวะไร้โหลดและสภาวะมีโหลด

ระบบควบคุมปั๊มน้ำประกอบไปด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 15 แรงม้า แรงดันไฟฟ้า 380D/660Y จำนวน 2 ตัว การควบคุมเป็นแบบสตาร์-เดลต้า โดยมีสวิตช์ลูกลอยในการเปิด-ปิดระบบ การทดสอบจะใช้เซ็นเซอร์กระแสและแรงดันต่อเข้าด้านล่างของเมนเซอร์กิตเบรกเกอร์ทั้ง 3 เฟส จากนั้นทดสอบการทำงานของระบบควบคุม ทดสอบปิดวาล์วน้ำเพื่อเก็บผลการทดลอง

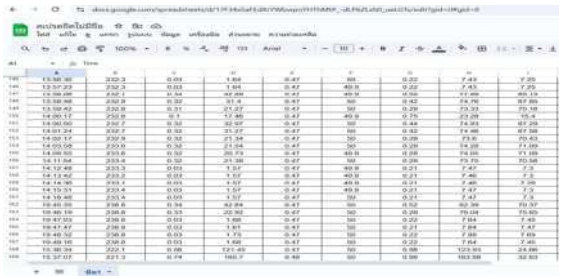
4. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ 3 เฟส ขนาด 15 แรงม้าในสภาพแวดล้อมจริงแสดงในตารางที่ 3 ข้อมูลที่ได้จะถูกจัดเก็บใน Google Sheet ตัวแปรที่นำมาใช้ในการสั่งการหยุดทำงานของระบบควบคุมคือตัวประกอบกำลัง

ตารางที่ 3 การทดสอบหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ตารางทดลองปั๊มน้ำ 15 HP			
ค่าพารามิเตอร์	มีโหลด	ไม่มีโหลด	หน่วยวัด
voltage 1	234.9	234.4	V
voltage 2	235.5	236.1	V
voltage 3	235.9	234.4	V
current 1	18.73	13.52	A
current 2	19.02	13.6	A
current 3	19.69	14.38	A
power 1	3660.4	801.6	W
power 2	3790	642.5	W
power 3	3870.9	748.4	W
energy 1	0.43	0.25	kWh
energy 2	0.35	0.19	kWh
energy 3	0.45	0.27	kWh
frequency 1	50	50	Hz
frequency 2	49.9	50	Hz
frequency 3	49.9	50	Hz
pf 1	0.83	0.25	
pf 2	0.85	0.2	
pf 3	0.83	0.22	
Apparent Power 1	4398.97	3169.32	VA
Apparent Power 2	4478.5	3211.43	VA
Apparent Power 3	4644.4	3369.97	VA
Reactive Power 1	2453.59	3068.68	VAR
Reactive Power 2	2359.2	3146.55	VAR
Reactive Power 3	2590.48	3287.4	VAR

จากผลการทดลองสรุปได้ว่าจากการทดสอบอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นระหว่างเครื่องวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นและเครื่องวัดที่เป็นมาตรฐาน จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันไม่มากจึงมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จาก PZEM-004 และ ESP-8266 และนำค่าที่วัดได้มาออกแบบวงจรควบคุมและนำไปตัดการทำงานของมอเตอร์ โดยตั้งค่าไว้ ที่ PF 0.3 เพื่อตัดการทำงานของมอเตอร์และจะกลับมาทำงานตามเงื่อนไขที่ออกแบบไว้ การเก็บข้อมูลใน google sheets เพื่อเก็บข้อมูล เมื่อมอเตอร์มีการทำงานที่ผิดปกติจะทำการแจ้งเตือนก่อนการตัดการทำงาน



รูปที่ 6 ข้อมูลที่ส่งไปยัง Google Sheet

5. อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบเฝ้าระวังปั๊มน้ำแบบเรียลไทม์ โดยทดสอบมอเตอร์ขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และสังเกตุพฤติกรรม พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะทำงาน ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้ทางไฟฟ้าโดยตัวแปรที่ใช้ในการเฝ้าระวังคือตัวประกอบกำลังโดยมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์และแจ้งเตือนออนไลน์เพื่อป้องกันมอเตอร์เสียหายของปั๊มน้ำจากการแทนที่ระบบเก่าที่ไม่มีการป้องกันที่ไม่สมบูรณ์และไม่สามารถติดตามสถานะการทำงานได้ตลอดเวลา นอกจากนั้นระบบนี้ยังช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในกรณีที่ปั๊มน้ำทำงานในสภาวะไร้โหลด อย่างไรก็ตามยังพบว่าการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ยังมีข้อผิดพลาดในการส่งข้อมูลและการเชื่อมต่อสัญญาณ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม ที่สนับสนุนทุนและสถานที่ในการทำงานวิจัยทำให้การศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Dr.D., P., Muthunayagam, & Sudharsun. (2021). Development of pumping motor protection system. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, *8*(6), 141–144. https://doi.org/10.17148/iarjset.2021.8625

[2] Gupta, N., Sasi, A., & Deep, A. (2020). IoT based water level management system. *Journal of Xidian University (Natural Science)/Xian Dianzi Keji Daxue Xuebao, 14*(5). https://doi.org/10.37896/jxu14.5/065

[3] Mubarik, M., Raza, A., Rashid, H., Zainuddin, A., & Abd Latiff, Z. I. (2022). Automatic monitoring and control system for different water levels in interconnected multiple twin tanks with Dry Run protection using microprocessor orange pi. *2022 IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*.



ประวัติผู้เขียนบทความ
ฉัฐพงศ์ สอนอาจ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม งานวิจัยที่สนใจ Electrical Power System , Protection and Relay, Energy Monitoring System Design and Application.

ศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแรงลมปะทะของรถใต้แนวสะพานลอย

Wind Power Generation Potential of Frucks Under Overpasses

ทัศพงศ์ นันทมัจฉา[1*], ณัฐพงษ์ เกตวงษา[1] , ผศ.ประสิทธิ์ มงคลเกษตร[2]
[1*]สาขาวิชาเทคนิคพื้นฐาน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม
[1]สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม มหาวิทยาลัยนครพนม
[2]คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
E-mail: thassaphong@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยแรงลมปะทะของรถใต้แนวสะพานลอยโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นกังหันลม แบบ Lenz จำนวน 5 ใบพัด เป็นตัวรับลมปะทะจากรถยนต์และรถบรรทุก ส่วนที่สองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองต่อโหลดที่แรงดันไฟฟ้า 33 โวลต์ กระแส 2.06 แอมป์แปร์กำลังไฟฟ้า 67.98 วัตต์ และเมื่อทำการทดสอบบนถนนจริงพบว่า ช่วงเวลา 16.00 – 19.00 น. เป็นช่วงที่แรงดันไฟฟ้ามากสุดเมื่อเทียบกับช่วงอื่น ดังนั้น กังหันแบบ Lenz จำนวน 5 ใบพัด สามารถผลิตไฟฟ้าได้แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรเมื่อมีรถยนต์ขับผ่านอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ 2 โรเตอร์ / กังหันลมแนวแกนตั้ง/ แรงลมปะทะของรถบรรทุกสิบล้อ

Abstract

This project proposed to study potential impact of electricity generation by wind wheel truck under the overpass. The project can divide two parts; the first part is Lenz wind turbine for achieved to wheel truck and the second is generator. The Experimental result is generator voltage 33V, current 2.06A. and electrical power 67.98W. And, the test to the road in between 4.00 – 7.00 p.m. was maximum power point voltage. So; Lenz wind turbine could produce Electricity achieved voltage stability. When, car and truck are running continuous time.

Keywords: Two rotor generator / vertical axis wind turbine/ The wind force of a ten-wheel truck

1. บทนำ

พลังงานทดแทนเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางที่ในปัจจุบัน ได้นำมาใช้แทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป แต่พลังงานทดแทนที่ได้กล่าวมานี้เป็นพลังงานที่ไม่มีจำกัด และเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่มีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม พลังงานลมจึงเป็นพลังงานที่ทางผู้จัดทำสนใจ ที่พัฒนาเพื่อมาทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป[1,2] แต่สำหรับพลังงานลมในประเทศไทยนั้นมีความเร็วลมที่ไม่มากนัก แต่สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ ทางผู้จัดทำจึงมีแนวความคิด นำเอาลมจากแรงปะทะของรถบรรทุกที่ได้จากการขับเคลื่อนของรถยนต์ มาใช้เป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าและนำไปใช้ประโยชน์

จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ทางผู้จัดทำได้มองเห็นความสำคัญของปัญหานี้และได้มองเห็นความสำคัญของพลังงานทดแทนจากลมจากรถยนต์ จึงได้นำโครงการศักยภาพการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยแรงลมปะทะของรถยนต์มาพัฒนา ต่อยอดความคิดเพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ปลอดภัยมากขึ้น นำมาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อลดการซื้อไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน ลดการผลิตไฟฟ้าที่ใช้พลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เพื่อที่จะมาเป็นทางเลือกของการผลิตพลังงานไฟฟ้าอีกทางและนำไฟฟ้าที่ได้ไปใช้งานต่อไป

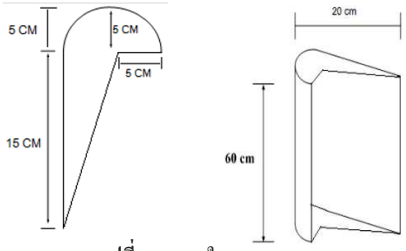
2. การออกแบบการทดลอง

2.1. การออกแบบโครงสร้างกังหันลมแกนแนวตั้งแบบเลนส์ 5 ใบพัด

การออกแบบโครงสร้างกังหันลมแบบแกนแนวตั้งแบบ *Lenz* ซึ่งโครงงานนี้ใช้ใบพัดทั้งหมด 5 ใบพัด ซึ่งทำมุม 72 องศา [3,4]ในการออกแบบกังหันลมแบบนี้คำนึงถึง ความเร็วในการหมุนของกังหันลมเป็นหลัก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่าง คือ ขนาดของใบพัด ,จำนวนใบพัด , ความเร็วลม

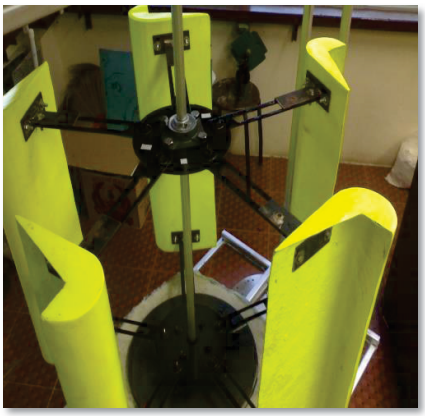
การออกแบบใบพัดนี้ ได้ศึกษาหลักการทำงานของใบพัดโดยการทำแบบหล่อตัวใบพัดแบบ Lenz ขึ้นมา ให้มีขนาดความหนา 3 เซนติเมตร และมีขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร โดยใช้ไฟเบอร์กลาสเรซินหล่อเป็นรูปใบพัดแบบ Lenz เนื่องจากมีน้ำหนักเบา แข็งแรงและทนแรงกระแทกได้ ซึ่งมีวิธีการทำดังนี้

2.1.1. ทำแบบหล่อตัวใบพัดพัดแบบ Lenz โดยนำแผ่นสังกะสีบางขนาดความหนา 0.1 เซนติเมตร และแผ่นเหล็กแบนขนาดความหนา 2 เซนติเมตร นำเหล็กแบนมาดัดโค้งตามขนาดที่คำนวณไว้ จากนั้นนำแผ่นสังกะสีมาดัดโค้งตามขนาดรูปทรง ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงใบพดแบบ Lenz

2.1.2. เมื่อใบพัดได้ 5 ใบแล้วต่อแขนใบพัดโดยใช้เหล็กแบนขนาดความกว้าง 2.5 เซนติเมตร ความยาว 25 เซนติเมตร ยึดน็อตเข้ากับแผ่นแม่เหล็กแผ่นบนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ติดกับแกนเพลา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงใบกังหัน 5 ใบ ประกอบติดกับแกนเพลา

2.2 ขั้นตอนหลักการออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

การออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร ได้ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร โดยใช้ทฤษฎีของ Hugh Piggott [2] และคำนึงถึงเหตุผลในเชิงทฤษฎีของเครื่องกำเนิดที่สามารถพิสูจน์ได้หรือแสดงให้เห็นถึงการเกิดขึ้นของกระแสไฟฟ้าได้จริงและสะดวกในการติดตั้งเคลื่อนย้าย

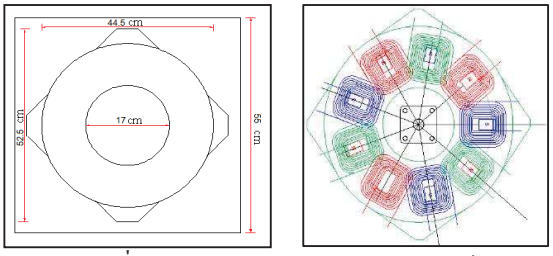
2.2.1 การคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

ในการพันขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรนั้น สูตรในการพันขดลวดหาได้จากการพันขดลวด โดยแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยเมื่อไม่มีโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ

$$E_{ave} = 2nAB\left(\frac{rpm}{60}\right) \qquad \ldots\ldots (1)$$

ดังนั้น E ø L tH xw #k:ŁH stw⁶;H sr²⁸oH rtH₄A
'ø N st u {

ในการพัดขดลวด โครงงานนี้จะพันขดลวด จำนวนโพล 9 ขั้ว และว่างในตำแหน่งมุมที่เท่าๆกัน โดยทำแบบสำหรับหล่อแบบโดยใช้ไฟเบอร์กลาสเรซินและว่างตำแหน่งของขดลวดดังรูปที่ 3

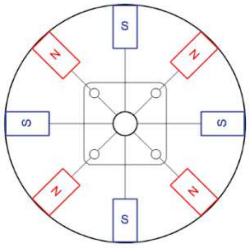


รูปที่ 3 แสดงแบบสำหรับหล่อเรซินชุดสเตเตอร์

2.2.2 การออกแบบโรเตอร์

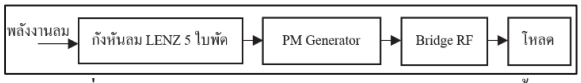
ในการออกแบบโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบนี้ ทำขึ้นมา 2 ชุด เพื่อเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้นในขดลวดแต่ละชุด เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็น 3 เฟส 9 ขด นั้น มุมองศาทางไฟฟ้าต้องห่างกัน 120 องศา จึงต้องใช้แม่เหล็ก 12 ก้อน จะทำให้ขดลวดและแม่เหล็กทับกันพอดี ที่มุม 120 องศา ทั้ง 3 เฟส ซึ่งแม่เหล็กจะวางห่างกัน 30 องศา อย่างละเท่าๆกัน

2.2.2.1 ออกแบบการว่างตำแหน่งแม่เหล็กที่ห่างเท่าๆกันโดยวาดเส้นแบ่งขึ้นวงกลม 12 เส้น ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงการออกแบบตำแหน่งของแม่เหล็ก

ผลการทดลองกังหันลมแนวนอนแกนหมุนแบบ Lenz 5 ใบพัด โดยใช้ชุดบริดจ์เรียงกระแส เป็นตัวแปลงไฟจากชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ให้ออกปื่น 12 โวลต์ และจ่ายไปยังโหลด แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมการทำงานของกังหันลมแนวแกนตั้งแบบ Lenz 5 ใบพัด

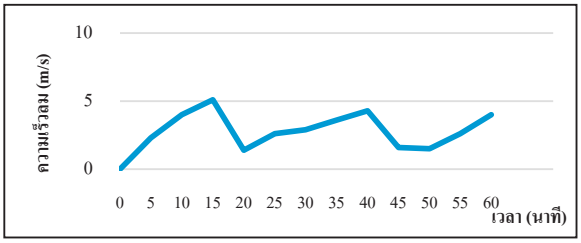
3. วิธีการทดลองและบันทึกผล

3.1 ผลการทดลองและทดสอบวัดแรงลม ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่

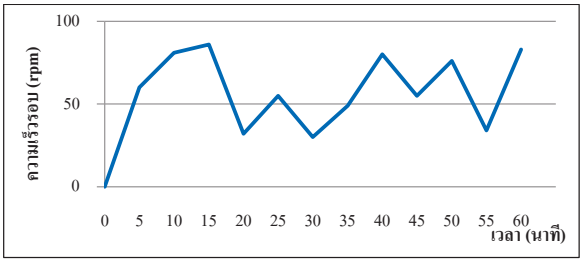
3.1.1 ผลการทดลองและทดสอบวัดแรงลม ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

บริเวณใต้แนวสะพานลอย ผลการทดลองเมื่อวางกรอบการทดลองกังหันลมที่ระยะเวลาการทดลองเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 10.00 น. - 11.00 น. ของวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2568 ซึ่งเป็นการทดลองแรงลม เนื่องจากเวลาดังกล่าว เป็นเวลาที่มีจำนวนรถบรรทุกและรถยนต์

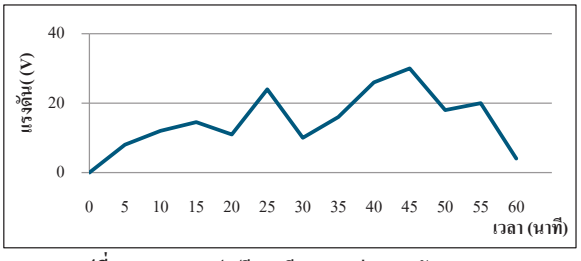
วิ่งผ่านเป็นจำนวนมากทำให้เกิดแรงลมปะทะ จากรถบรรทุกและรถยนต์ค่อนข้างสูง ทำให้กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาได้ดีและผลการทดลองที่ได้มีผลดังรูปที่ 6-11 ดังนี้



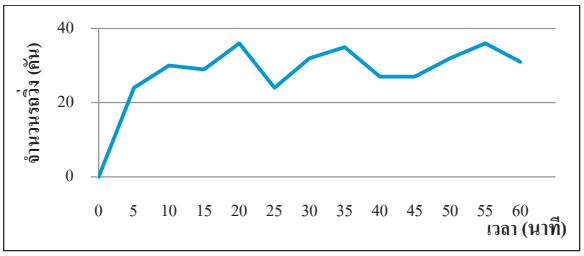
รูปที่ 6 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วลมและเวลา



รูปที่ 7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร็วรอบและเวลา



รูปที่ 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างแรงดันและเวลา

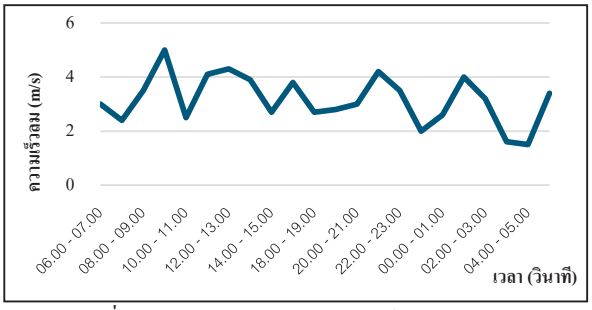


รูปที่ 9 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างจำนวนรอบและเวลา

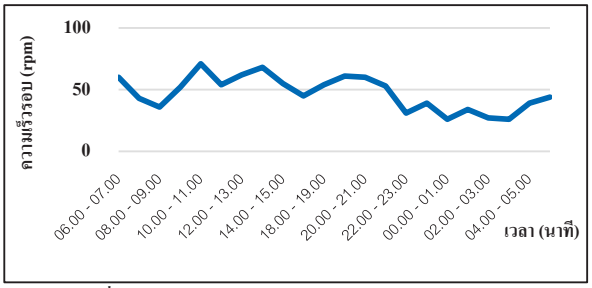
จากผลการทดลอง ณ ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ บริเวณริมถนน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากกราฟความแรงของลมปะทะที่ได้จากรถบรรทุกและรถยนต์นั้นค่อนข้างดีในตลอดทั้งวัน ทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวผลิตไฟฟ้าออกมาได้ดี ดังกราฟที่ใช้เปรียบเทียบ

3.1.2 ผลการทดลองและทดสอบวัดแรงลม ณ ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บริเวณริมถนน ผลการทดลองความเร็วลมของกังหันลมภายใน 24 ชั่วโมง ช่วงเวลาตั้งแต่ 06.00 น. ของวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ถึง 06.00 น. ของวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 ณ ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ บริเวณ ริมถนน



รูปที่ 10 แสดงกราฟเปรียบเทียบความเร็วลมและเวลา



รูปที่ 11 แสดงกราฟเปรียบเทียบความเร็วรอบและเวลา

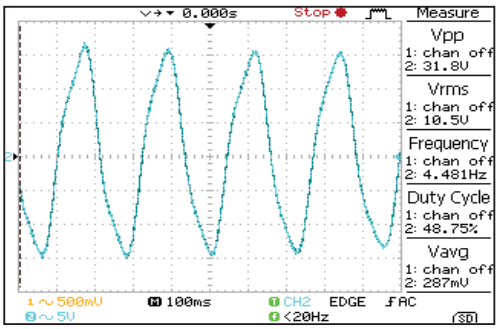
จากผลการทดลอง ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ บริเวณริมถนนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากกราฟความแรงของลมปะทะที่ได้จากรถบรรทุกและรถยนต์นั้นค่อนข้างดีในช่วงเวลา 06.00-01.00น. และในช่วงเวลา 01.00-05.00น.เป็นช่วงเวลาที่รถบรรทุกและรถยนต์มีจำนวนลดน้อยลง จึงทำให้กราฟในช่วงเวลาดังกล่าวนั้น กราฟแรงลมปะทะที่ได้จากรถบรรทุกและรถยนต์ค่อนข้างลดลง ทำให้ผลการทดลองภายใน 24 ชั่วโมง ดีและไม่ดีเป็นบ้างช่วงเวลา

3.2 ผลการทดลองรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Lenz แบบ 5 ใบพัด

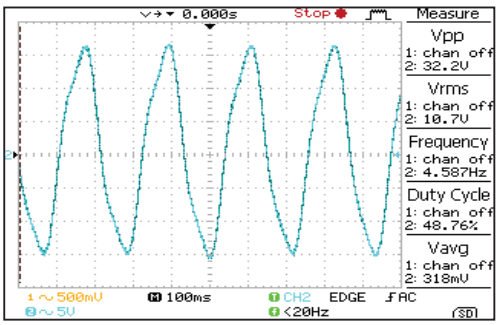
เมื่อกังหันลมหมุนผลิตไฟฟ้าด้วยรอบความเร็วที่สูงทำให้ผลิตแรงดันได้สูงแต่เมื่อถึงจุดจุดหนึ่งที่แรงดันที่ผลิตได้นั้นถึงจุดอิ่มตัว คือ แม่เหล็กตัดผ่านขดลวดจนสนามแม่เหล็กเกิดการอิ่มตัวทำให้แรงดันที่ได้นั้นคงที่ เรียกว่าจุด Cut Off จากรูปคลื่นสัญญาณที่ได้ในพบว่าเป็นช่วงแรงดันยอดคลื่นที่ตัดออกจากการเพิ่มกำลังความเร็วรอบของกังหันลมที่ความเร็วสูงสุดที่ 350 รอบต่อนาที ทำแรงดันที่เกิดขึ้นเกิดสนามแม่เหล็กอิ่มตัวทำให้กราฟ B-H ถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้นทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ออกมามีค่าเฉลี่ยคงที่ 11.75 โวลต์

ผลการทดลองรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ Lenz 5 ใบพัด เป็นการทดลองวัดรูปคลื่นสัญญาณ

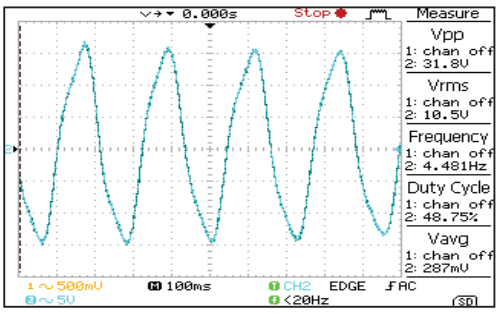
แรงดันไฟฟ้า เพื่อรูปคลื่นสัญญาณฟ้าที่ได้ เป็นสัญญาณซายน์ ซึ่งแยกออกเป็นแต่ละเฟสได้ดังนี้



รูปที่ 12 แสดงแรงดันของกังหันลมที่วัดด้วยออสซิโลสโคป (เฟสที่ 1)



รูปที่ 13 แสดงแรงดันของกังหันลมที่วัดด้วยออสซิโลสโคป (เฟสที่ 2)



รูปที่ 14 แสดงแรงดันของกังหันลมที่วัดด้วยออสซิโลสโคป (เฟสที่ 3)

4. สรุปผล

4.1 สรุปผลการทดสอบกังหันลมผลิตไฟฟ้า Lenz 5 ใบพัด

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองกังหันลมนั้นมีการทดลองใน 2 สถานที่ คือ ที่ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ และวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม การทดลองที่ถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ ได้ทำการทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าถนนศรีสงคราม-ท่าแร่ มีรถวิ่งเป็นจำนวนมากทำให้เกิดลมปะทะจากรถบรรทุกและรถยนต์เป็นจำนวนมากและต่อเนื่อง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้สูงและค่อนข้างต่อเนื่อง การทดลองที่ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมศรีสงคราม เป็นการทดลองโดยการ Test Load และ Short Load โดยใช้แรงลมจากลมพัดลมจากผลการทดลองเมื่อกังหันลมอยู่ในสภาวะ No Load แรงดันที่ได้นั้นค่อนข้างสูงและเมื่อทำการ On Load แล้วจะเห็นได้ว่าแรงดันขณะ No Load นั้นลดลงมาก

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์แผนกเทคพื้นฐาน ทัศพงศ์ นันทมัจฉา, ผศ.ประสิทธิ์ มงคลเกษตร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กรุณาความรู้ทางวิชาการของทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Rejhana Blazevic, Halima Hadziahmetovic. (2025). “Wind Energy Potential for the Electricity Generation in the Livno Area” . DOI: 10.17559/TV-20230925000961, ISBN: 1848-6339

[2] Yannic Janal, Peter Regner, Johannes Schmidt.,(2025) . “More Wind, Falling Efficiency: The Driving Factors of German Onshore Wind Power Generation” . DOI: 10.1002/we.70013, ISBN: 1099-1824

[3] Yusak Tanoto, Brandon Sebastian Jasman, Stephanus Antonius Ananda.,(2025) . “Assessing the potential of small wind turbine electricity generation for small-sized hotels towards sustainable tourism in developing countries”. DOI: 10.61435/ijred.20261019, ISBN: 2252-4940

[4] Zhengye Xie.,(2025) . “Use Low Wind Speed to Meet Electricity Demand in Remote Areas”. DOI: 10.54097/34d90m04, ISBN: 2791-0210

[5] Liang-Chun Chen, Ying-Yi Lai, Chien-Pang Lee.,(2025) . “Investigating the Spatio-temporal Variability of Climate and Its Impact on Wind Power Generation and Management”. DOI: 10.59879/I86dA, ISBN: 0039-7660

[6] Norio Harada, Chikako Takei, Ichiro Kimurai.,(2025). “Use of the metaverse to advance wind power generation projects”. DOI: 10.1051/e3sconf/202560304013, ISBN: 2267-1242


นายทัศพงศ์ นันทมัจฉา
แผนกเทคนิคพื้นฐาน
Robot/Innovation
and Invention (IN)


นายณัฐพงษ์ เกตวงษา
แผนกไฟฟ้ากำลัง
Electrical Power(PW)


ผศ.ประสิทธิ์ มงคลเกษตร
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Electrical Power (PW)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาถังขยะอัจฉริยะโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

Development of smart bins powered by solar energy

ทัชชกร ธรรมปัญญา[1], เพลิน จันทร์สุยะ[1], วิวัฒน์ ทิพจร[1], วุฒิไกร ธรรมวรรณ[1], เอกชัย ชัยดี[1] และทักษ์ หงษ์ทอง[2*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
E-mail: Nikom_tamma@hotmail.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการพัฒนาถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์ขับเคลื่อนผ่านมือถือ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ที่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายตัวเองได้ และช่วยให้ลดการสัมผัสเชื้อโรคด้วยระบบเปิด-ปิดอัตโนมัติผ่านเซ็นเซอร์ โดยการออกแบบบอร์ดควบคุมที่ใช้ในการพัฒนาระบบ ได้แก่ Arduino Nano และ ESP8266 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์และเซ็นเซอร์ต่างๆ ได้ โดย ESP8266 ยังสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของถังขยะผ่านระบบเครือข่ายได้ เช่น การสั่งให้ถังขยะเคลื่อนที่เข้าหาผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชันหรืออุปกรณ์ควบคุมระยะไกล โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานที่รับมาจากระบบโซล่าเซลล์ และสามารถรับพลังงานจากระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้ ซึ่งถังขยะอัจฉริยะนี้สามารถรับน้ำหนักได้ไม่เกิน 3 กิโลกรัม และสามารถใช้งานได้ประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน ซึ่งการทดสอบแบตเตอรี่พบว่าลดลงไปโดยเฉลี่ย 7.38 % ต่อชั่วโมง

คำสำคัญ: ถังขยะ, อัจฉริยะ, พลังงานแสงอาทิตย์

Abstract

This paper studies the development of smart waste bins from solar energy powered by mobile energy. The control boards used in the development of the system include the Arduino Nano and ESP8266, which are microcontroller boards that can be programmed to control the operation of motors and sensors ESP8266. The battery is the source of energy received from the solar cell system and can receive energy from the electricity system of electricity. This smart bin can hold a weight of up to 3 kilograms and can be used for about 8 hours a day, which battery tests have shown to reduce by an average of 7.38% per hour.

Keywords: Trash Bin, Smart, Solar energy

1. บทนำ

บทความนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญในการนำเทคโนโลยีมาช่วยจัดการขยะ โดยถังขยะอัจฉริยะพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นนวัตกรรมที่ช่วยลดการใช้ไฟบ้าน สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟ การพัฒนาถังขยะอัจฉริยะนี้ไม่เพียงช่วยให้การจัดการขยะมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่ยังส่งเสริมคุณภาพชีวิตและสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน จากความสำคัญของปัญหาขยะที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวัน ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนาถังขยะอัจฉริยะที่สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าว ถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน โดยมุ่งหวังให้เกิดการจัดการขยะอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการแพร่กระจายของเชื้อโรค ซึ่งจะส่งผลให้สังคมมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

การวิจัยในครั้งนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์ขับเคลื่อนผ่านมือถือและใช้เซ็นเซอร์เปิด – ปิดด้วยServoเป็นการพัฒนานวัตกรรมที่ผสมผสานเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการขยะในพื้นที่สาธารณะ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานในการทำงานของระบบต่างๆ ภายในถังขยะ ตัวถังขยะถูกออกแบบให้มีระบบการขับเคลื่อนด้วยมือถือ ที่ช่วยให้ถังขยะสามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อการจัดการขยะอย่างอัตโนมัติ โดยไม่ต้องพึ่งพากำลังคนในการเคลื่อนย้าย ส่วนของการเปิด – ปิด ฝาถังขยะนั้น ได้ใช้เซ็นเซอร์เพื่อการตรวจจับการเข้าใกล้หรือการเคลื่อนไหว ซึ่งเมื่อมีการเข้ามาของผู้ใช้งานหรือสิ่งของใกล้เคียง เซ็นเซอร์จะทำการส่งสัญญาณไปยังServoเปิดและปิดฝาถังขยะอย่างอัตโนมัติ ระบบนี้ช่วยเพิ่มความสะดวกสบายและความสะอาดในการใช้งาน เนื่องจากไม่ต้องสัมผัสถังขยะโดยตรง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาแบบจำลองถังขยะเปิด-ปิดอัตโนมัติด้วยระบบเซ็นเซอร์ในขณะเวลาที่ขยะเต็มจะมีเสียงแจ้งเตือน ซึ่งต้องรู้จักหลักการทำงานของอุปกรณ์ การประกอบส่วนต่าง ๆ ของ อุปกรณ์และการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานตามวัตถุประสงค์ มีการวิเคราะห์ และหา

ข้อมูลในส่วนนั้น โดยควบคุมการทำงานจาก Arduino 2560 สั่งให้ Sensor รับสัญญาณ และส่งกลับไปยัง Arduino 2560 ให้สั่งให้ servo ทำงาน ถังขยะจะเปิดปิดอัตโนมัติ เพื่อพัฒนาและขยายความสามารถให้มากขึ้น จาก แบบจำลองถังขยะเปิด – ปิด อัตโนมัติด้วยระบบSensoต่อไป ผลการทดลองพบว่า ถังขยะเปิด – ปิด อัตโนมัติด้วยระบบเซ็นเซอร์ การควบคุมด้วย Arduino 2560 สามารถควบคุมการเปิด - ปิด ถังขยะแบบอัตโนมัติด้วยการติด ตัวSensor สามารถรับสัญญาณได้ในทิศฉากกับ พื้น ส่งไปยัง Arduino 2560 สั่งให้ Servo ทำงาน จึงได้เพิ่มฐานรองพื้นถังขยะเพื่อทำให้ทราบว่า Sensor ตรวจจับในระยะนั้น จึงทำให้ถังขยะเปิด – ปิด อัตโนมัติด้วยและมี Sensor ตรวจจับขยะอยู่บนฝาถัง ควบคุมด้วย Arduino 2560 จะสั่งเสียงเตือนจะส่งผลให้ทราบว่าขยะเต็ม [1]

แนวคิดในการสร้างชิ้นงานนี้ขึ้นมาเพราะในปัจจุบันนี้มีถังขยะอยู่จำนวนมาก แต่ถังขยะที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่นั้นอยู่ในสภาพที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน เช่น ไม่มีฝาปิด ฝาถังชำรุด ถังขยะมีรอยแตกร้าว มีการสะสมของขยะ และยังขาดการดูแลรักษาที่ดีซึ่งเป็นสถานที่สะสมของเชื้อโรคและแบคทีเรีย อาจจะทำให้เกิดการติดเชื้อแก่ผู้ที่ทิ้งขยะโดยการสัมผัสกับถังขยะ โครงงานสิ่งประดิษฐ์นี้เป็นการศึกษาแบบจำลองถังขยะอัจฉริยะ เปิด-ปิดอัตโนมัติด้วยระบบเซ็นเซอร์ ในขณะเวลาที่ขยะเต็ม จะมีการแจ้งเตือนผ่านไลน์ ผู้ประดิษฐ์จึงได้มีแนวความคิดในการจัดทำถังขยะอัจฉริยะเป็นโครงงานที่เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาเทคโนโลยีประกอบเข้ากับปัญหาขยะในปัจจุบันเพื่อให้มนุษย์เห็นความสำคัญของการทิ้งขยะมากขึ้น [2]

ในการประดิษฐ์ถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมทในครั้งนี้ เพื่อสร้างถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท ที่สามารถใช้งานได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน และเพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้เกี่ยวข้องต่อถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท ที่สร้างโดยถังขยะติดตั้งระบบควบคุมที่ผู้ใช้สามารถสั่งการด้วยรีโมทคอนโทรลและเปิดฝาถังขยะได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับตัวถังขยะ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ แบบบันทึกการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท และแบบสอบถามความพึงพอใจต่อการใช้งานถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท ผลการวิจัยมีดังนี้ ถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท ที่ประดิษฐ์ขึ้น สามารถเปิดฝาถังขยะอัตโนมัติ สะดวกสบายในการใช้งาน ซึ่งคณะผู้ประดิษฐ์ได้นำไปทดลองใช้งานจริงแล้ว จนได้ถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท ที่มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ ด้านความพึงพอใจต่อถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท พบว่า มีความพึงพอใจ อยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.47 ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่ผู้ประดิษฐ์ต้องการ [3]

หลักการทำงานของถังขยะแยกขยะอัจฉริยะซึ่งควบคุมการทำงานโดยกล้อง husky Lens เมื่อรับข้อมูลแล้วระบบจะส่งคำสั่งข้อมูลให้กับ Kid bright เพื่อส่งคำสั่งไปยังตัว Servo เพื่อเปิด - ปิด ฝาถังขยะ เมื่อมีการนำขยะมาสแกนผ่านกล้อง husky Lens ถ้าเป็นขยะประเภทขวดพลาสติกถังที่ 1 จะเปิดฝาขึ้น ขยะประเภท กระดาษถังที่ 2 จะเปิดฝาขึ้น ขยะประเภทกล่องนมถังที่ 3 จะเปิดฝาขึ้น และขยะทั่วไป เช่น ถุงพลาสติก ถังที่ 4 จะเปิดฝาขึ้น และเมื่อขยะเต็มถัง อินฟาเรดตัวจับจะส่งคำสั่งไปยังบอร์ดไบร์ทเพื่อเปิดไฟ และส่งสัญญาณเสียงไปที่แม่บ้านให้มาเก็บขยะออกจากถังที่เต็ม ถังขยะแยกขยะอัจฉริยะ สามารถใช้งานได้อย่างสมบูรณ์ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษากล้อง husky Lens ตรวจจับใน ระยะไกลมากถึง 3 - 5 เมตร เพื่อควบคุมการทำงานของServoมอเตอร์ในการ เปิด - ปิด ฝาถังขยะได้อย่างถูกประเภทของขยะ การทำงานของระบบถังขยะอัจฉริยะนั้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 เป็นระบบ เปิด – ปิดฝาถังอัตโนมัติ หลักการทำงาน คือ เมื่อมีคนที่ต้องการทิ้งขยะเดินเข้ามานำขยะแสกนกับกล้อง husky Lens เมื่อกล้องตรวจจับวัตถุ Servo มอเตอร์จะทำงานดังนี้ ถ้าขยะนั้นเป็นขวดพลาสติกมอเตอร์หมุนเปิดฝาถังขยะที่ 1 เพื่อทิ้งขยะประเภทขวดพลาสติก ถ้าขยะนั้นเป็นกระดาษมอเตอร์หมุนเปิดฝาถังขยะที่ 2 เพื่อทิ้งขยะประเภทกระดาษ ถ้าขยะนั้นเป็นกล่องนมมอเตอร์หมุนเปิดฝาถังขยะที่ 3 เพื่อทิ้งขยะประเภทกล่องนม ถ้าขยะนั้นเป็นขยะทั่วไปมอเตอร์หมุนเปิดฝาถังขยะที่ 4 เพื่อทิ้งขยะประเภททั่วไป เมื่อทิ้งขยะลงถังแล้วฝาถังขยะจะปิดลง ส่วนที่ 2 เป็นระบบตรวจดูว่าถังขยะเต็มหรือไม่ หลักการทำงาน คือในถังขยะจะมีเซ็นเซอร์อินฟาเรดภายในถังขยะ คอยตรวจวัดปริมาณขยะที่อยู่ในถัง เมื่อขยะขึ้นมาถึงระดับที่กำหนดเซ็นเซอร์ตรวจพบว่า ถังขยะเต็มแล้ว ไฟที่ถังขยะจะสว่างขึ้นพร้อมกับเสียงแจ้งเตือนเพื่อให้แม่บ้านนำขยะที่เต็มออก [4]

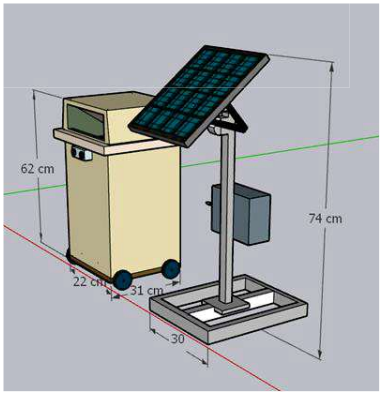
จากการศึกษาทดลองและบันทึกผลการทำงานของถังขยะอัจฉริยะสรุปผลได้ 1. การทดสอบเซ็นเซอร์ในการเปิด - ปิด ฝาถังขยะโดยทำการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง ฝาถังขยะสามารถเปิด - ปิด ทั้งหมด 10 ครั้ง ไม่มีปัญหาอะไรเกิดขึ้น เมื่อถังขยะมีปริมาณขยะเต็มจะมีไฟ LED แจ้งด้านหน้าถังว่าขยะเต็มและถังฝาถังก็จะไม่เปิดขึ้น 2. การทดสอบระบบSensoที่ใช้วัดปริมาณขยะ ทำการทดสอบโดยการใส่ขยะลงไปในถังตามที่กำหนดไว้ 5 ระดับ พบว่าสามารถ แสดงผลผ่านเว็บไซต์ได้ถูกต้องร้อยละ 100 3. การทดสอบความคลาดเคลื่อนของ GPS แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ภายในอาคารมีความสามารถในการรับสัญญาณ GPS ได้ น้อย ซึ่งแตกต่างกับภายนอกอาคารจะสามารถรับสัญญาณ GPS ได้ดีกว่าโดยมีระยะห่างจากอาคารประมาณ 6 เมตรเป็นต้นไป [5]

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

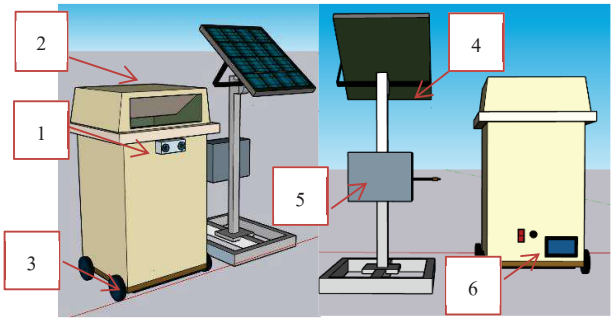
ขั้นตอนการดำเนินงานได้ทำการศึกษาข้อมูลการจัดทำถังขยะอัจฉริยะ, การออกแบบถังขยะอัจฉริยะ, การจัดสร้างถังขยะอัจฉริยะ และการทดสอบเก็บข้อมูล

การออกแบบถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบถังขยะ ให้มีขนาดความกว้าง 22 เซนติเมตร

ยาว 31 เซนติเมตร สูง 62 เซนติเมตร เพื่อรองรับขยะ 2 - 3 กิโลกรัม โดยใช้พลาสติก เป็นวัสดุในการทำถังขยะ



รูปที่ 1 โครงสร้างการแบบของถังขยะ



รูปที่ 2 ตำแหน่งอุปกรณ์ของถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2 หมายเลขที่ 1 คือSensoอัลตร้าโซนิค หมายเลขที่ 2 คือServoมอเตอร์ หมายเลขที่ 3 คือมอเตอร์ และล้อ หมายเลขที่ 4 โซล่าเซลล์ หมายเลขที่ 5 กล่องควบคุมชาร์จเจอร์, หมายเลขที่ 6 วงจรควบคุมมอเตอร์ด้วย Node MCU, บอร์ด Arduino Nano, แบตเตอรี่12 V, DC Step Down, Relay 4 channel, สวิตช์, จอแสดงผลแบตเตอรี่

การออกแบบของระบบการทำงานทั้งหมดของระบบ จะใช้ไฟเลี้ยงจากแผงโซล่าเซลล์ 10 W จากนั้นชาร์จเจอร์ชนิด PWM จะเป็นตัวควบคุมการประจุแบตเตอรี่แล้วแบตเตอรี่จะเป็นแหล่งพลังงานจ่ายไฟให้กับวงจรต่างๆในวงจร เมื่อเซ็นเซอร์ต่างๆ ได้ไฟเลี้ยงจากแบตเตอรี่ ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆและปุ่มควบคุมการสั่งการในแอปพิเคชั่น Blynk ที่ตั้งไว้ จะส่งไปยัง Node MCU และ Auduino Nano จากนั้น Node MCU และ Auduino Nano จะทำการประมวลตามเงื่อนไขการตัดสินใจและทำการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและแสดงผลอยู่ 2 แบบ คือ 1.สามารถควบคุมสั่งการเคลื่อนที่ของถังขยะผ่านSmart Phone 2.1 Servoจะทำงานเมื่อถึงระยะที่ตั้งไว้

การออกแบบระบบควบคุมและกล่องเก็บอุปกรณ์ต่างๆ จะอยู่ด้านล่างของถังขยะปิดมิดชิด ด้านในประกอบด้วย วงจรควบคุมมอเตอร์ด้วย ESP8266 , บอร์ด Arduino Nano , แบตเตอรี่ลิเธียมBMS 12 V 10.4 Ah , DC Step Down 48 W , Relay 4 channel ,สวิตช์ , จอแสดงผลแบตเตอรี่



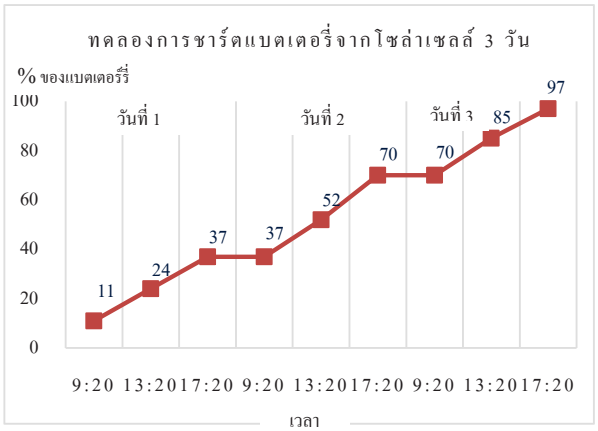
รูปที่ 3 โครงสร้างทั้งหมดของถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3 เป็นโครงสร้างของถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยตัวถังขยะอัจฉริยะจะแยกจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยตัวถังจะเป็นพลาสติก ทำให้มีน้ำหนักเบา และด้านล่างจะเป็นล้อสำหรับการเคลื่อนที่โดยมี Servo มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน

ในการทดสอบเก็บข้อมูลได้ทำการทดสอบเก็บข้อมูลด้านการชาร์จแบตเตอร์รี่จากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ ด้านการทดสอบการใช้งานของถังขยะอัจฉริยะ

4. ผลการดำเนินการ

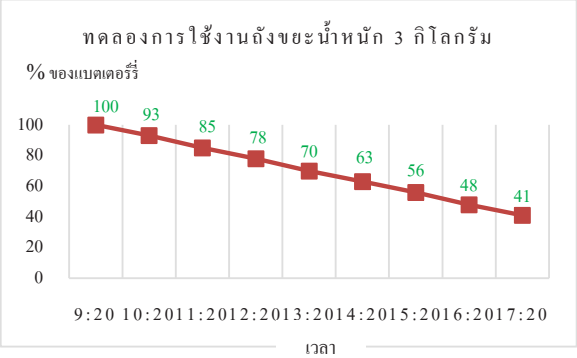
ผลการทดสอบการชาร์จแบตเตอร์รี่จากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าการทดสอบการชาร์จแบตเตอร์รี่สามารถชาร์จได้ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน



รูปที่ 4 การชาร์จแบตเตอรี่จากระบบโซล่าเซลล์

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นการชาร์จแบตเตอร์รี่จากระบบโซล่าเซลล์จำนวน 3 วัน ในการชาร์จแบตเตอร์รี่จะสามารถชาร์จได้ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ทำให้ใช้เวลาในการชาร์จจำนวน 3 วัน

การทดสอบการใช้งานของถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 5 การทดลองใช้งานถังขยะน้ำหนัก 3 กิโลกรัม

จากรูปที่ 5 แสดงให้การใช้งานของถังขยะอัจฉริยะพบว่าโหลดที่มีน้ำหนัก 3 กิโลกรัม มีการใช้กระแสโดยเฉลี่ย 1.02 A ทำให้การใช้งาน 8 ชั่วโมง ค่าแรงดันจะลดลงประมาณ 59 เปอร์เซ็นต์ เฉลี่ยชั่วโมงละ 7.38 เปอร์เซ็นต์

5. สรุป

จากการออกแบบถังขยะอัจฉริยะจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทำการสร้างถังขยะมีขนานความกว้าง 22 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร สูง 62 เซนติเมตร และได้นำเทคโนโลยีการควบคุมผ่านแอพBlinkโดยใช้ESP8266 สั่งการไปยังรีเลย์ 4 ช่อง ควบคุมมอเตอร์ 4 ตัว สามารถควบคุมบังคับผ่านมือถือได้ และวงจรควบคุมการเปิดปิดฝาถังขยะอัตโนมัติ รับข้อมูลจากSensoอัลตร้าโซนิค เมื่อมีวัตถุเข้ามาใกล้ในระยะตามที่กำหนดสั่งการให้Servoมอเตอร์เปิดค้างไว้เพื่อการทิ้งขยะ 5วินาทีถึงจะค่อยๆ ปิด และมีอีกวงจรสำคัญคือวงจรการชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่จากพลังงานแสงอาทิตย์ มีโซล่าเซลล์เป็นแหล่งผลิตไฟชาร์จเข้าแบตเตอรี่โดยผ่านจากชาร์จเจอร์โดยกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 10.6 V จะทำการตัดการชาร์จและเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงกว่า 13.7 V กำหนดให้ตัดการชาร์จเพื่อป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่ มีตัวลดแรงดัน 12 V เป็น 5 V เพื่อจ่ายไฟให้บอร์ดต่างๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย สำหรับเครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] นรจ.พงศธร ต่ายธานี และคณะ. (2560). [ระบบออนไลน์], “ถังขยะเปิด - ปิด อัตโนมัติด้วยระบบเซ็นเซอร์”. โรงเรียนอิเล็กทรอนิกส์ กองวิทยาการกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ; วันที่สืบค้น 6 เมษายน 68

[2] พรพิมล กล่อมปัญญา และคณะ. (2564). [ระบบออนไลน์], “ถังขยะอัจฉริยะ”. สำนักวิจัยและพัฒนาการอาชีวศึกษา; วันที่สืบค้น 6 เมษายน 68

[3] สมเกียรติ บัวทอง และคณะ. (2564). [ระบบออนไลน์], “ถังขยะเคลื่อนที่ด้วยระบบรีโมท”. สำนักวิจัยและพัฒนาการอาชีวศึกษา; วันที่สืบค้น 6 เมษายน 68

[4] ฐานิดา ศิลประเสริฐ และคณะ. (2566). [ระบบออนไลน์], “ถังขยะแยกขยะอัจฉริยะSmart trash”. โรงเรียนชัยพิทยพัฒน์ มูลนิธิชัยพัฒนา (จารุวัฒนานุกูล ท่าพระ); วันที่สืบค้น 6 เมษายน 68

[5] อานนท์ เนตรยอง, และคณะ.(2562), “ถังขยะอัจฉริยะ”. การประชุมวิชาการสำหรับนักศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 2 (น.128 - 133). มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาผลของความผันผวนของอัตราการผลิตไอน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

A Study on Effect of Load Fluctuation on the Efficiency of Boiler

นภรรท แสนสร้อย[1]* สมบูรณ์ เวชกามา[1] และ จุลละพงษ์ จุลละโพธิ[2]

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

*Corresponding E-mail : napat.sans@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความผันผวนของอัตราการผลิตไอน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำชีวมวลในโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่ง โดยเก็บข้อมูลจากหม้อไอน้ำของโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งขนาด 40, 60 และ 120 ton/h ช่วงฤดูหีบอ้อยปี พ.ศ. 2567 วิเคราะห์ประสิทธิภาพแบบทางตรงและทางอ้อม พบว่า ช่วงที่อัตราการผลิตไอน้ำคงที่ หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 0.5–2% ขณะที่ช่วงอัตราการผลิตไอน้ำต่ำและไม่คงที่ส่งผลให้ค่าความร้อนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย และความชื้นในเชื้อเพลิงสูงขึ้น ปริมาณไอน้ำต่อหน่วยเชื้อเพลิงลดลง ดังนั้นการควบคุมเสถียรภาพของอัตราการผลิตไอน้ำจึงเป็นอีกปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

คำสำคัญ: ชานอ้อย, ความผันผวนของอัตราการผลิตไอน้ำ, ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

Abstract

This study investigates the effects of load fluctuation on the efficiency of biomass boilers in a sugar mill. Data were collected from three boilers of a sugar mill with capacities of 40, 60, and 120 ton/h during the 2024 crushing season. The boiler performance was analyzed using both direct and indirect methods. The results revealed that during periods of stable load, boiler efficiency was approximately 0.5–2% higher compared to periods of low or fluctuating load. Unstable operation led to increased heat losses through flue gas and moisture in the fuel, resulting in a reduced amount of steam generated per unit of fuel. Therefore, maintaining the stability of boiler load is a key factor in enhancing the energy efficiency of biomass boiler systems in sugar mills.

Keywords: Bagasse, Boiler Load Fluctuation, Boiler Efficiency

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตของโรงงานน้ำตาล พลังงานความร้อนจากหม้อไอน้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการผลิตทั้งในส่วนของการแปรรูปอ้อยและการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานน้ำตาลที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล เช่น ชานอ้อย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต หม้อไอน้ำชีวมวลจึงต้องมีสมรรถนะสูง มีเสถียรภาพและสามารถรองรับภาระที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามลักษณะเฉพาะของกระบวนการหีบอ้อยในโรงงานน้ำตาล ซึ่งมีปริมาณอ้อยสดเข้าสู่กระบวนการไม่คงที่ในแต่ละช่วงเวลา ทำให้อัตราการผลิตไอน้ำมีความผันผวน ส่งผลต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ความผันผวนนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาในการควบคุมการเผาไหม้ การใช้เชื้อเพลิงเกินความจำเป็น และการสูญเสียพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ หากไม่สามารถควบคุมหรือบริหารจัดการได้อย่างเหมาะสม ด้วยเหตุนี้การศึกษาเกี่ยวกับผลของความผันผวนในการผลิตไอน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพหม้อไอน้ำด้วยการวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทางตรงและทางอ้อมด้วยวิธีวิเคราะห์ความร้อนสูญเสีย จะช่วยให้สามารถทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพและอัตราการใช้เชื้อเพลิงของระบบผลิตไอน้ำภายใต้สภาพการใช้งานจริง และหาแนวทางลดความผันผวนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการในระยะยาว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการประเมินสมรรถนะของหม้อไอน้ำชีวมวลภายในโรงงานน้ำตาล การวิเคราะห์ประสิทธิภาพถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้ประเมินความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานจากเชื้อเพลิงไปเป็นไอน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้ 2 วิธี ได้แก่ การคำนวณประสิทธิภาพทางตรง (direct method) และการคำนวณทางอ้อม (indirect method) ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานของ ASME PTC 4 และแนวทางจาก Sorensen [1]

2.1 การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทางตรง

การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทางตรง (η_{direct}) ใช้ข้อมูลอัตราการผลิตไอน้ำ และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยคำนวณหาจากอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ไอน้ำได้รับต่อความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง ดังสมการ

$$\eta_{direct}(\%) = \frac{\dot{m}_s(h_s - h_f)}{\dot{m}_f \cdot HHV} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{m}_s$ และ $\dot{m}_f$ คืออัตราการผลิตไอน้ำและการใช้เชื้อเพลิงเชิงมวลตามลำดับ (kg/s), h_s-h_f คือผลต่างของเอนธัลปีไอน้ำกับเชื้อเพลิง (kJ/kg) และ HHV คือค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

2.2 การคำนวณประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทางอ้อม

การคำนวณนี้ได้พิจารณาถึงการสูญเสียความร้อนแต่ละอย่างในระบบหม้อไอน้ำ (L_i) หาผลรวมของการสูญเสียความร้อน ($\sum L_i$) แล้วนำมาประกอบการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพทางอ้อมได้จากสมการ

$$\eta_{indirect}(\%) = \left(1 - \frac{\sum L_i}{\dot{m}_f \cdot HHV} \times 100\right) \quad (2)$$

การสูญเสียความร้อนในระบบหม้อไอน้ำ (kW) สามารถจำแนกได้ 8 ทาง และมีสมการคำนวณหาค่ามีดังต่อไปนี้

L_1: ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียแห้ง

$$L_1 = \dot{m}_{fg} C_{p,fg}(T_g - T_s) \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{m}_{fg}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซไอเสียแห้ง (kg/s), $C_{p,fg}$ คือ ความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสียแห้ง (kJ/kg° C) และ T_g-T_s คือผลต่างของอุณหภูมิไอเสียและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (° C)

L_2: ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในเชื้อเพลิง

$$L_2 = \dot{m}_w(h_v - h_f) \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{m}_w$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของความชื้นในเชื้อเพลิง (kg/s) และ h_v-h_f คือผลต่างของเอนธัลปีที่ทำให้น้ำระเหยเป็นไอ (kJ/kg)

L_3: ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน (H_2)

$$L_3 = 9\dot{m}_H(h_v - h_f) \quad (5)$$

โดยที่ $\dot{m}_H$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไฮโดรเจน (kg/s) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงแบบ Ultimate Analysis as received

L_4: ความร้อนสูญเสียจากความชื้นในอากาศ

$$L_4 = \dot{m}_a w C_{p,w}(T_g - T_s) \quad (6)$$

โดยที่ $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (kg/s, w คือสัดส่วนไอน้ำในอากาศ (kg_w/kg_a) และ $C_{p,w}$ คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ (kJ/kg° C)

L_5: ความร้อนสูญเสียจากคาร์บอนเผาไหม้ไม่หมด

$$L_5 = 32{,}750(\dot{m}_{ub}) \quad (7)$$

โดยที่ $\dot{m}_{ub}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด (kg/kg_f) ซึ่งมากับขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าจม

L_6: ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

$$L_6 = \frac{CO}{CO+CO_2} \times \dot{m}_{cb} \times 23{,}560 \quad (8)$$

โดยที่ CO และ CO_2 คือร้อยละโดยมวลของคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในไอเสียแห้ง ตามลำดับ และ $\dot{m}_{cb}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนที่ถูกเผาไหม้ (kg/s)

L_7: ความร้อนสูญเสียจากการโบลว์ดาวน์

$$L7 = \dot{m}_{bd}(h_{bd} - h_{fw}) \quad (9)$$

โดยที่ $\dot{m}_{bd}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำโบลว์ดาวน์ (kg/s) และ h_{bd} - h_{fw} คือ ผลต่างของเอนธัลปีระหว่างน้ำโบลว์ดาวน์ (bd) และน้ำป้อน (fw)

L_8: ความร้อนสูญเสียจากผิวผนังหม้อไอน้ำ

$$L8 = \dot{m}_f f_L \sqrt{\frac{100}{\text{max steam load}\left(\frac{\text{ton}}{\text{hr}}\right)}} \quad (10)$$

โดยที่ f_L คือตัวเลขปรับค่า (load factor) ที่ภาระต่างๆ ของหม้อไอน้ำ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าตัวเลขปรับแก้ (f_L) ตามภาระต่าง ๆ ของหม้อไอน้ำ [2]

%load	100	80	75	50	25
f_L	1	1.22	1.28	1.82	3.22

2.3 การวิเคราะห์ความผันผวนของภาระหม้อไอน้ำ

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อไอน้ำทั้งสามเครื่อง (40, 60 และ 120 ton/h) ที่ถูกบันทึกต่อเนื่องทุก 1 ชั่วโมง เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะของภาระการทำงาน และประเมินความผันผวนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยเทียบกับภาระเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง ดังสมการที่ 11

$$\%LF = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{b}\left|\frac{L_i - L_{avg}}{L_{avg}}\right| \quad (11)$$

โดยที่ %LF คือ เปอร์เซ็นต์ความผันผวนของภาระ (load fluctuation), L_i คือ เปอร์เซ็นต์ภาระที่เวลาทำงานนั้น ๆ, L_{avg} คือ เปอร์เซ็นต์ภาระเฉลี่ยตลอด 24 ชั่วโมง

3.ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์กรณีศึกษา

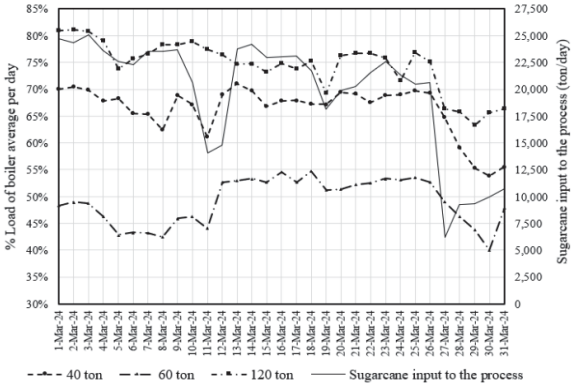
3.1 ข้อมูลโรงไฟฟ้าชีวมวลในโรงงานน้ำตาล

โรงงานแห่งนี้ตั้งอยู่ตำบลหินเหล็กไฟ อำเภอคูเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ซึ่งนำชานอ้อยที่เหลือจากกระบวนการผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานน้ำตาล ปัจจุบันมีกำลังการผลิต 23,000 ton_{cane}/day สำหรับหน่วยผลิตไอน้ำและไฟฟ้าประกอบไปด้วย หม้อไอน้ำขนาด 40 ton/h เป็นหม้อไอน้ำสโตกเกอร์ตะกรับนิ่ง (Fixed grate stoker) ความดัน 17 bar ขนาด 60 ton/h และขนาด 120 ton/h โดยหม้อไอน้ำทั้งสองเป็นหม้อไอน้ำสโตกเกอร์ตะกรับพลิก (Flip grate stoker) ความดัน 24 bar และมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกังหันไอน้ำ 3 ชุด ขนาด 2.5, 4 และ 10 MW มีกำลังการผลิตไฟฟ้าติดตั้งรวม 16.5 MW และกำลังการผลิตสูงสุดที่สามารถผลิตได้เท่ากับ 14.5 MW นอกจากการใช้ไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าแล้วยังมีการใช้ไอน้ำแรงดันสูงเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการด้วย โดยเมื่อไอน้ำผลิตจากหม้อไอน้ำแล้วจะมารวมกันที่ท่อรวมไอ (steam header) ก่อนถูกกระจายออกไปในแต่ละส่วนของกระบวนการ

3.2 ปริมาณการรับอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาล

จากเก็บข้อมูลปริมาณการรับอ้อยเข้าสู่กระบวนการตลอดปี 2567 พบว่าเดือนมีนาคมมีปริมาณการรับอ้อยเข้าสู่กระบวนการมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกข้อมูลที่ได้จากเดือนนี้นำมาวิเคราะห์ความผันผวนของอัตราการผลิตไอน้ำ โดยจากรูปที่ 1 เห็นได้ว่า ภาระของหม้อไอน้ำรวมมีลักษณะที่ไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณการรับอ้อยเข้าสู่กระบวนการ โดยในวันที่ 11 และ 27 มีนาคม เครื่องจักรเกิดความเสียหายทำให้กำลังการผลิตลดลง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพิจารณาเฉพาะข้อมูลของวันที่เครื่องจักรทำงานได้อย่างปกติ โดยวันที่ 3 มีนาคม เป็นวันที่มีปริมาณอ้อยเข้าหีบมากที่สุด และ วันที่ 30 มีนาคม เป็นวันที่มีปริมาณอ้อยเข้าหีบน้อยที่สุด และนอกจากนี้ผู้วิจัยเลือกวันที่มีปริมาณอ้อยเข้าหีบในระหว่างนี้

รวมทั้งหมด 5 วัน เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มความผันผวนของภาระหม้อไอน้ำ

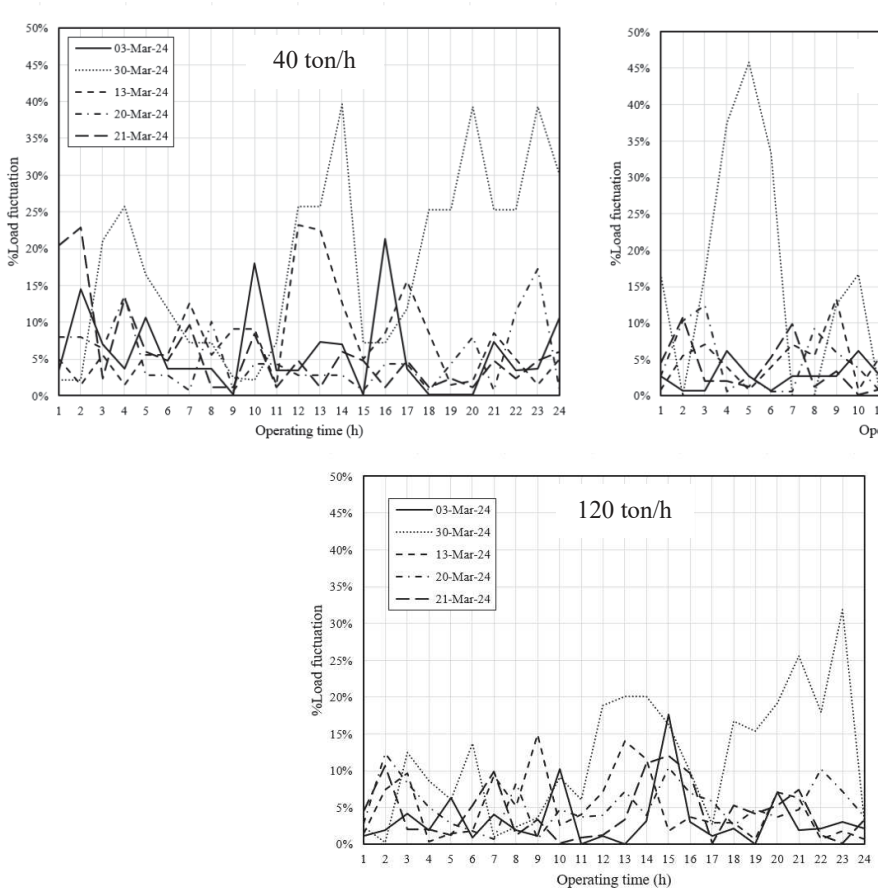


รูปที่ 1 เปอร์เซนต์ภาระหม้อไอน้ำและปริมาณการรับอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำตาลของเดือนมีนาคม 2567

4. ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์ความผันผวนของหม้อไอน้ำ

ผลการสำรวจข้อมูลภาระหม้อไอน้ำตลอด 24 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่า ในวันที่ 30 มีนาคม ซึ่งเป็นวันที่มีปริมาณอ้อยเข้าหีบน้อยที่สุด มีความผันผวนของภาระงานหม้อไอน้ำทั้ง 3 มากที่สุด โดยค่าความผันผวนที่ถูกคำนวณของหม้อไอน้ำขนาด 40, 60 และ 120 ton/h มีค่าประมาณ 18.02, 14.68 และ 11.80 % ของค่าเฉลี่ยภาระตลอด 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และในวันที่ 3 มีนาคม 2567 ซึ่งเป็นวันที่มีปริมาณอ้อยเข้าหีบมากที่สุดมีความผันผวนภาระหม้อไอน้ำน้อยที่สุด ประมาณ 5.85 , 4.02 และ 3.28 % ของค่าเฉลี่ยภาระตลอด 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อเคราะห์แนวโน้มของค่าภาระหม้อไอน้ำในวันอื่น ๆ พบว่าเมื่อหากปริมาณของอ้อยที่เข้าหีบมีปริมาณน้อยทำให้ภาระหม้อไอน้ำทั้ง 3 มีแนวโน้มที่สูงตามไปด้วย แสดงดังตารางที่ 2 และจากที่ทางผู้วิจัยได้ทำการเฝ้าสังเกตพฤติกรรมการเดินเครื่องจักรพบว่าในช่วงเวลาอ้อยมีปริมาณเข้าหีบน้อย เชื้อเพลิงที่เข้าสู่หม้อไอน้ำไม่เพียงพอจึงต้องมีการป้อนเชื้อเพลิงที่สำรองไว้ที่ลานเก็บเชื้อเพลิงเข้าสู่หม้อไอน้ำด้วยแรงงานคน ซึ่งทำให้การควบคุมเปลวไฟในห้องเผาไหม้ทำให้ไม่สม่ำเสมอด้วย



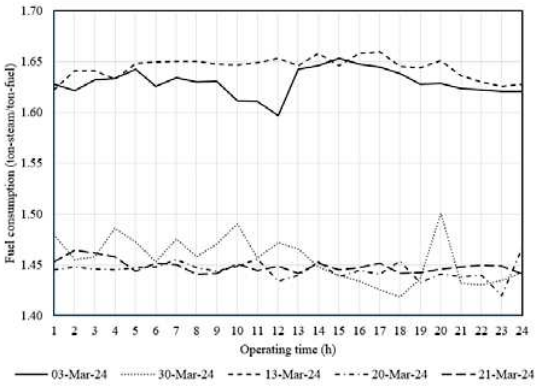
รูปที่ 2 ความผันผวนเฉลี่ยของภาระหม้อไอน้ำขนาด 40, 60 และ 120 ton/h เมื่อเทียบกับเวลาทำงาน (operating time)

ตารางที่ 2 ภาระหม้อไอน้ำและความผันผวนเฉลี่ยแต่ละวัน

วันที่	ปริมาณอ้อย	ภาระเฉลี่ย			ความผันผวนเฉลี่ย		
		40 ton	60 ton	120 ton	40 ton	60 ton	120 ton
3/3/24	25,072.12	69.90	48.68	80.76	5.85	4.02	3.28
13/3/24	23,752.42	71.04	52.92	74.69	7.58	5.77	5.00
20/3/24	19,877.39	69.48	51.39	76.35	5.13	5.45	5.29
21/3/24	20,256.14	69.17	52.22	76.77	5.72	5.59	4.41
30/3/24	9,980.36	53.85	40.00	65.69	18.02	14.68	11.80

4.2 อัตราการป้อนเชื้อเพลิง

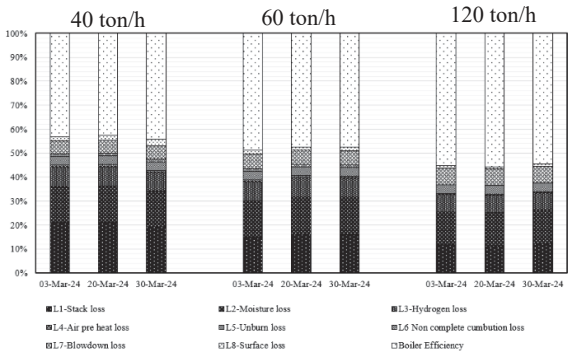
ในการศึกษานี้ใช้การประเมินประสิทธิภาพหม้อไอน้ำทั้งแบบทางตรงและทางอ้อมตามสมการที่ (1)–(9) โดยใช้ข้อมูลที่สามารถวัดได้จริงร่วมกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์ชานอ้อย (9,045 kJ/kg) ซึ่งมีคาร์บอนเฉลี่ย 24.22% และออกซิเจน 19.39% เพื่อคำนวณอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้เห็นว่าเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำ [3 และ4] ในขณะที่อัตราการใช้เชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามภาระของหม้อไอน้ำ แต่เมื่อพิจารณาค่าปริมาณไอน้ำต่อหน่วยเชื้อเพลิงจากรูปที่ 3 พบว่า ในวันที่อ้อยหีบเข้าน้อย หม้อไอน้ำทั้ง 3 มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าวันที่อ้อยเข้าหีบมาก ทำให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ลดลงในช่วงภาระงานต่ำ ซึ่งอาจเกิดจากการทำงานนอกจุดออกแบบ (off-design condition) โดยเฉพาะหม้อไอน้ำขนาด 60 ton/h ที่มีภาระในช่วงเพียง 40 – 53 % เท่านั้น และการควบคุมการเผาไหม้ที่ไม่คงที่จากการป้อนเชื้อเพลิงด้วยแรงงานคน ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียมากขึ้น



รูปที่ 3 ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ทั้งหมดต่อเชื้อเพลิง 1 ton เมื่อเทียบกับเวลาทำงาน (operating time)

4.3 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ

ผลการวิเคราะห์พบว่า หม้อไอน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้นในช่วงที่ภาระคงที่ แม้ความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างช่วงภาระสูง (44.16–55.66%) และภาระต่ำ (42.72–54.37%) จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.5–2% เท่านั้น แต่ทำให้เห็นถึงผลกระทบของความไม่คงที่ของภาระที่มีต่อประสิทธิภาพโดยรวม จากรูปที่ 4 พบว่าค่าความร้อนสูญเสีย L_1 และ L_2 เพิ่มขึ้นในช่วงภาระงานต่ำ พลังงานบางส่วนสูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย นอกจากนี้ ความชื้นในชานอ้อยที่มีค่าที่สูงถึงประมาณ 47.48 – 49.27 % ยังทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการระเหยไอน้ำในเชื้อเพลิง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fuengcharoen [5] ที่ระบุว่า ความร้อนสูญเสียจากไอเสียและความชื้นในเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญ และเสนอให้มีการบริหารจัดการภาระงานของหม้อไอน้ำและคุณภาพเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม



รูปที่ 4 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบความร้อนสูญเสียและประสิทธิภาพหม้อไอน้ำในวันที่มีภาระงานสูง และ และภาระงานต่ำ

5. สรุป

ความผันผวนของภาระการทำงานส่งผลต่อประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ในขณะที่ประสิทธิภาพเฉลี่ยระหว่างช่วงวันที่ภาระสูงและภาระต่ำจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.5–2%) แต่ในช่วงภาระงานต่ำพบว่าค่าความร้อนสูญเสีย โดยเฉพาะจากก๊าซไอเสียและความชื้นในเชื้อเพลิง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณไอน้ำต่อหน่วยเชื้อเพลิงลดลง สะท้อนถึงการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ การควบคุมเสถียรภาพของภาระการทำงานและการจัดการความชื้นเชื้อเพลิงจึงเป็นอีกปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบหม้อไอน้ำในโรงงานน้ำตาล

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษาแรกเข้า สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการศึกษา ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] H. A. Sorensen, *Energy Conversion Systems*, Oxford, UK: Pergamon Press Ltd., 1983.

[2] จุลละพงษ์ จุลละโพธิ์, *เอกสารการสอนวิชา Energy Conservation for Industries: เรื่องสมดุลพลังงานในหม้อไอน้ำ*, มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2562, หน้า 195–217.

[3] A. Munir, J. Z. Alvi, S. Ashfaq, and A. Ghafoor, "Performance evaluation of a biomass boiler on the basis of heat loss method and total heat values of steam," *Pakistan Journal of Agricultural Research*, Apr. 2014. [Online].

[4] E. Birru, C. Erlich, and A. Martin, "Energy performance comparisons and enhancements in the sugar cane industry," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 9, pp. 267–282, 2019. doi: 10.1007/s13399-018-0349-z.

[5] K. Fuengcharoen, "The assessment of steam generation efficiency from bagasse moisture reduction: A case study of a biomass power plant," M.Sc. thesis, Inter-dept. Energy Tech. and Management, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2020

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การจำลองการใช้พลังงานสำหรับลดความชื้นในข้าวเปลือกหอมมะลิด้วยเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

Simulation of Energy Consumption for an Integrated Jasmine Paddy Dehumidifier Machine

พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์[1] สมพจน์ คำแก้ว[2] ประชา บุณยวานิชกุล[3] และ เสฏฐา ศาสนนันทน์[4*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

[2]ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมวิศวกรรมอบแห้งทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

[3]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

[4]ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

E-mail: setta@swu.ac.th*

บทคัดย่อ

ข้าวหอมมะลิเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทย เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะในด้านของความหอม แต่กระบวนการลดความชื้นที่เกษตรกรใช้ในปัจจุบันทำให้สารหอม 2AP สูญเสียไป งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเครื่องลดความชื้นในข้าวเปลือกแบบผสมผสานเพื่อลดการสูญเสียสารหอม 2AP ในกระบวนการลดความชื้น โดยทำการจำลองการใช้พลังงานเพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือก 1.5 ตัน ที่มีความชื้นตั้งต้น 28% (w.b.) ลดให้เหลือ 14% (w.b.) ที่มีอุณหภูมิทำงานในไซโลเท่ากับ 60 และ 43 °C (อุณหภูมิอ้างอิง และอุณหภูมิที่ทำให้สูญเสียสารหอม 2AP น้อยที่สุดจากการทดลอง) ผลการจำลองพบว่าที่ 60 และ 43 °C จะมีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ 41.56 และ 20.27 MJ/hr. และใช้เวลาในการลดความชื้น 17.5 และ 16.4 ชม. ตามลำดับ

คำสำคัญ: ข้าวเปลือกหอมมะลิ, การลดความชื้น, พลังงาน, สารหอม 2AP

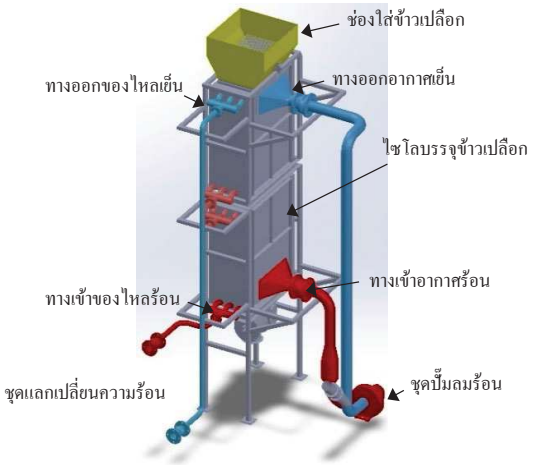
Abstract

Jasmine rice is a major economic crop of Thailand due to its unique aromatic properties. However, the dehumidification process currently used by farmers causes the loss of the aromatic compound 2AP. This research is part of the development of an Integrated Jasmine Paddy Dehumidifier Machine to reduce the loss of 2AP compounds. Simulating the energy consumption to reduce the moisture content of 1.5 tons of paddy with an initial moisture content of 28% (w.b.) to 14% (w.b.). Working temperature of purposed machine are 60 and 43 °C (an experiment temperature reference and the best dehumidify temperature for 2AP compound conserving, respectively). The simulation results showed that the power consumption rate was 41.56 and 20.27 MJ/hr. and the operating time was 17.5 and 16.4 hrs., respectively.

Keywords: jasmine paddy, dehumidification process, energy, 2AP

1. บทนำ

ข้าวหอมมะลินับเป็นพืชเศรษฐกิจหลักชนิดหนึ่งของประเทศไทย ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของข้าวหอมมะลิที่มีความนุ่มและกลิ่นหอมที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้ข้าวหอมมะลิเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งภายในและภายนอกประเทศ สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.) กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้กำหนดค่ามาตรฐานที่เป็นลักษณะบ่งชี้สำคัญสำหรับข้าวเปลือกหอมมะลิ คือต้องมีค่าความชื้นไม่เกิน 15% (w.b.) และมีกลิ่นหอม [1] จากงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นหอมของข้าวเปลือกหอมมะลิ พบว่าความหอมของข้าวเปลือกหอมมะลิถูกวัดด้วยปริมาณสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ในข้าวเปลือก 1 กรัม อย่างไรก็ตามสารหอม 2AP นี้มักจะสูญเสียในกระบวนการลดความชื้นซึ่งเกษตรกรโดยทั่วไปนิยมใช้วิธีตากแดด (การใช้ธรรมชาติ) และกระบวนการการเก็บรักษา (ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ)



รูปที่ 1 แบบเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะพัฒนาเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือก (การใช้เครื่องจักร) เพื่อลดการสูญเสียสารหอม 2AP โดย

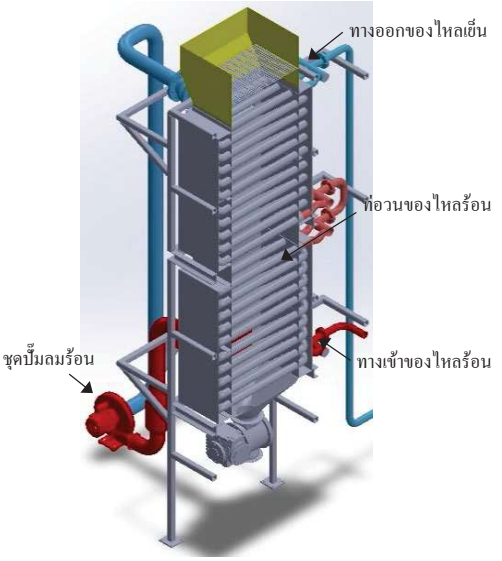
การศึกษาเครื่องลดความชื้นแบบต่าง ๆ ในภาคอุตสาหกรรม [2-3] และนำหลักการทำงาน ข้อดี ข้อเสียมาใช้ในการออกแบบเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน ที่มุ่งเน้นการควบคุมอุณหภูมิการทำงานให้เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียสารหอม 2AP ลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้ลดความชื้นของข้าวเปลือก โดยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยการจำลองการใช้พลังงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสานที่ได้ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1 ก่อนทำการพัฒนาสร้างเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

2. ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเครื่องลดความชื้น

การจำลองการใช้พลังงานจำเป็นต้องเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสามผสาน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวขึ้นส่วนประกอบที่สำคัญ และหลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นที่แบ่งเป็น ขั้นตอนการเตรียมอุณหภูมิของเครื่องลดความชื้นก่อนการทำงาน และขั้นตอนการลดความชื้นของข้าวเปลือก

2.1 ส่วนประกอบหลักของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

ส่วนประกอบหลักของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน คือ 1) ไซโลบรรจุข้าวเปลือกที่มีขนาดประมาณ 230 ซม. x 85 ซม. x 40 ซม. สามารถบรรจุข้าวเปลือกได้ประมาณ 420 กก. (ความหนาแน่นเฉลี่ยของข้าวเปลือกประมาณ 540 กก./ลบ.ม.) [4] 2) ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบบปิด แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ หม้อต้มไฟฟ้าขนาด 18 kW ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ พร้อมปั๊มของเหลวอัตราการไหลสูงสุด 12 ลบ.ม./ชม. และชุดท่อวนของไหล สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนภายในไซโลบรรจุข้าวเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 2



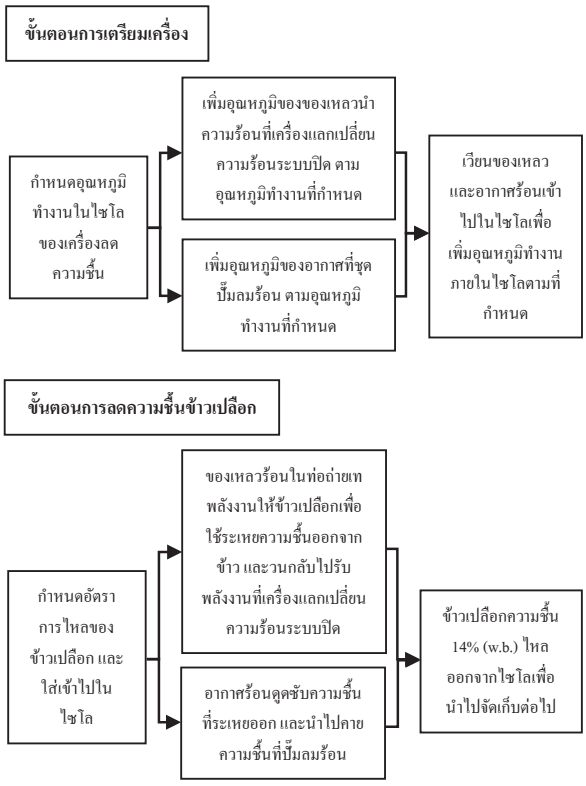
รูปที่ 2 ชุดท่อวนของไหลภายในไซโลบรรจุข้าวเปลือก และปั๊มลม

3) ชุดปั๊มลมร้อนขนาด 3.7 kW ทำอุณหภูมิได้ 0-150 °C ทำหน้าที่สร้างอากาศแห้งที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดก่อนปล่อยเข้าสู่ไซโลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหล เพื่อดูดซับความชื้นออกจากข้าวเปลือก

2.2 หลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

หลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน เป็นการแบ่งส่วนการลดความชื้นของข้าวเปลือกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในไซโลโดยการพาความร้อนผ่านของไหลในท่อวนของไหล สร้างจากชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบบปิด ทำหน้าที่ถ่ายทอดพลังงานความร้อนให้กับข้าวเปลือกเพื่อระเหยความชื้นที่อยู่ในเมล็ดข้าว และอากาศแห้งที่มีอุณหภูมิตามที่กำหนดสำหรับดูดซับความชื้น ที่สร้างจากปั๊มลมและปล่อยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้ามาสัมผัสข้าวเปลือกโดยตรง เพื่อดูดซับน้ำที่ระเหยออกจากข้าวเปลือก

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน

3. การจำลองการใช้พลังงานของเครื่องลดความชื้นต้นแบบ

เป้าหมายของโครงการวิจัยคือ การสร้างเครื่องลดความชื้นในข้าวเปลือกหอมมะลิ จากค่าความชื้นเริ่มต้นที่ 28% (w.b.) (หลังเก็บเกี่ยว)

ให้เหลือไม่เกิน 14% (w.b.) ตามมาตรฐานข้าวเปลือกหอมมะลิของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และลดการสูญเสียสารหอม 2AP เนื่องจากกระบวนการลดความชื้นไม่เหมาะสม จากหลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นที่กล่าวไปข้างต้น แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ

1) ช่วงเตรียมเครื่องลดความชื้น เป็นการเตรียมอุณหภูมิทำงานในไซโล ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบระบบปิด (สารนำความร้อน: น้ำ) ให้พลังงานความร้อนกับน้ำ แล้วปล่อยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลเข้าสู่ท่อวน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศในไซโลให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิทำงานในไซโลที่กำหนด ส่วนปั๊มอากาศร้อนจะให้พลังงานกับอากาศที่จะใช้ดูดซับความชื้นที่ระเหยออกมาจากข้าวเปลือก ดังนั้นอากาศที่ออกจากปั๊มลมร้อนจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิทำงานในไซโล

2) ช่วงเครื่องลดความชื้นทำงาน ข้าวเปลือกที่เข้ามาในเครื่องลดความชื้นรับพลังงานมาเพื่อระเหยน้ำในข้าวเปลือก การถ่ายเทพลังงานจะทำให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนเท่ากับอุณหภูมิทำงานในไซโล และความชื้นในข้าวเปลือกลดลงจนมีค่าความชื้นตามที่กำหนด โดยอากาศแห้งร้อนทำหน้าที่ดูดซับความชื้นที่ระเหยออกมาจากข้าวเปลือก และนำอากาศชื้นวนกลับไปบำบัดที่ปั๊มลมร้อน ก่อนปล่อยกลับเข้าสู่ไซโล ในส่วนของการคำนวณการใช้พลังงานเบื้องต้น จะแบ่งสัดส่วนให้ใช้พลังงานจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคิดเป็น 100% สำหรับพลังงานที่ใช้ระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือก

การคำนวณการใช้พลังงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสานนี้เป็นการคำนวณการใช้พลังงานเบื้องต้นโดยอาศัยหลักของกฎสมดุลมวล และพลังงาน เพื่อคำนวณพลังงานที่ใช้ในการลดความชื้นเบื้องต้น [5-7] การลดความชื้นของข้าวเปลือก เมื่อมวลน้ำที่ต้องการระเหย (m_w) และ พลังงานที่ใช้ กระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือก (Q_{eva}) สามารถคำนวณดังแสดงในสมการที่ 1-4 ตามลำดับ

$$m_w = \frac{m_i(M_i - M_f)}{100 - M_f} \quad (1)$$

$$Q_w = m_w\left(C_w \Delta T + h_{fg}\right) \quad (2)$$

$$Q_d = (m_i - m_w) C_d \Delta T \quad (3)$$

$$Q_{eva} = Q_w + Q_d \quad (4)$$

เมื่อ m_i คือ มวลข้าวเปลือกตั้งต้น (kg)

M_i และ M_f คือ ความชื้นของข้าวเปลือกก่อนเข้าเครื่อง และหลังออกจากเครื่อง (% w.b.)

Q_w และ Q_d คือ พลังงานที่ใช้ระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือก และ พลังงานที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิข้าวเปลือกแห้ง ตามลำดับ (kJ)

C_w และ C_d คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำและข้าวเปลือกแห้ง (kJ/kg·°C)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนเข้าและหลังออกจากเครื่องลดความชื้น (°C)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงที่ใช้ระเหยน้ำ (kJ/kg)

พลังงานจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และปั๊มลมร้อนในช่วงเตรียมเครื่องลดความชื้น และช่วงเครื่องลดความชื้นทำงานสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 5 - 10

$$ {}^{p}_{HE}Q_w = \rho_w V_w C_w\left(T_s - T_{w,i}\right) \quad (5)$$

$$ {}^{p}_{HE}Q_a = \rho_a V_s C_a\left(T_s - T_{a,i}\right) \quad (6)$$

$$ {}^{p}_{HE}Q = {}^{p}_{HE}Q_w + {}^{p}_{HE}Q_a \quad (7)$$

$$ {}^{o}_{HE}Q = \eta_{HE} Q_{eva} \quad (8)$$

$$ {}^{p}_{HP}Q = \rho_a V_s C_a\left(T_s - T_{a,i}\right) \quad (9)$$

$$ Total Q = {}^{p}_{HE}Q + {}^{o}_{HE}Q + {}^{p}_{HP}Q + {}^{o}_{HP}Q \quad (10)$$

เมื่อ ${}^{P}_{HE}Q_w$, ${}^{P}_{HE}Q_a$ และ ${}^{P}_{HE}Q$ คือ พลังงานที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้เพิ่มอุณหภูมิน้ำในเครื่อง เพิ่มอุณหภูมิอากาศในไซโล และพลังงานรวมที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ช่วงเตรียมเครื่องลดความชื้น ตามลำดับ (kJ)

${}^{o}_{HE}Q$ คือ พลังงานที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใช้ช่วงทำงาน

η_{HE} คือ ประสิทธิภาพของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

${}^{p}_{HP}Q$ คือ พลังงานที่ปั๊มลมใช้ช่วงเตรียมเครื่องลดความชื้น

${}^{o}_{HP}Q$ คือ พลังงานที่ปั๊มลมร้อนใช้ช่วงทำงาน (มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากการกำหนดสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนเป็น 0%)

ρ_w และ ρ_a คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำและอากาศ (kg/m^3)

V_w และ V_a คือ ปริมาตรของน้ำในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และปริมาตรของอากาศในไซโล (m^3)

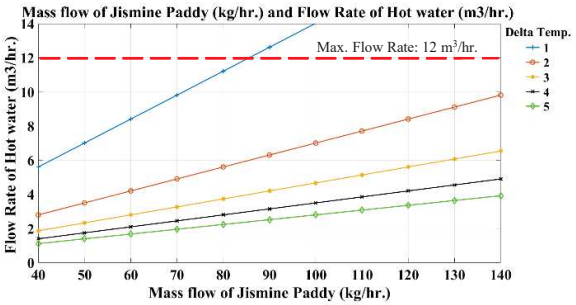
C_a คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg·°C)

T_s , $T_{w,i}$ และ $T_{a,i}$ คือ อุณหภูมิทำงานในไซโล อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น และ อุณหภูมิอากาศเริ่มต้น ตามลำดับ (°C)

4. ผลการทดลอง

การจำลองการใช้พลังงานของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน ถูกจำลองผ่านโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ที่มีความสัมพันธ์กับการลดความชื้น และการลดการสูญเสียสาร 2AP ของข้าวเปลือกหอมมะลิ ให้มีค่าที่สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [6-7] โดยกำหนดให้ข้าวเปลือก 1.5 ตัน มีอุณหภูมิ 30 °C และค่าความชื้น 28% (w.b.) ก่อนเข้าเครื่องลดความชื้น อุณหภูมิทำงานในไซโลมีค่าเท่ากับ 60 °C (อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบ

หมุนเวียนสำหรับการเปรียบเทียบการใช้พลังงาน) และอุณหภูมิทำงานในไซโลมีค่าเท่ากับ 43 °C (อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนที่สามารถรักษาปริมาณสารหอม 2AP ได้มากที่สุด จากช่วงอุณหภูมิทำงาน 35-66 °C) กำหนดให้ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระบบปิดเท่ากับ 80% เมื่อจำลองการใช้พลังงานจะสามารถคำนวณอัตราการไหลของน้ำร้อนในท่อวน ที่สัมพันธ์กับปริมาณข้าวเปลือก (กก.) ที่ต้องการลดความชื้นในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณข้าวเปลือกที่ลดความชื้น (kg/hr.) และอัตราการไหลน้ำร้อนในท่อน้ำวน (m^3/hr.) เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 1-5 °C

จากผลการจำลองภายใต้ข้อกำหนดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าเมื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนให้เปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 °C ระยะเวลาและพลังงานที่ใช้สำหรับการลดความชื้นข้าวเปลือก 1.5 ตัน ด้วยเครื่องลดความชื้นแบบหมุนเวียน และเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน ถูกแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลองการลดความชื้นข้าวเปลือก 1.5 ตัน ด้วยเครื่องลดความชื้นแบบหมุนเวียน และเครื่องลดความชื้นผสมผสาน

อุณหภูมิทำงาน (°C)	เครื่องลดความชื้นแบบหมุนเวียน*		เครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน	
	อัตราการไหลของข้าวเปลือก (kg/hr.)	ระยะเวลาลดความชื้น (hr.) / อัตราการใช้พลังงาน (MJ/hr.)	อัตราการไหลของข้าวเปลือก (kg/hr.)	ระยะเวลาลดความชื้น (hr.) / อัตราการใช้พลังงาน (MJ/hr.)
43	-	-	91.46	16.4/20.27
60	71.43	21/71.5	85.6	17.5/41.56

*ผลการทดลองจากเครื่องลดความชื้นแบบหมุนเวียนเป็นผลการทดสอบจริง

5. สรุป

จากผลการจำลองการใช้พลังงานลดความชื้นข้าวเปลือกหอมมะลิของเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสาน พบว่าที่อุณหภูมิทำงานในไซโลเท่ากับ 43 °C และ 60 °C ใช้เวลาในการลดความชื้นใกล้เคียงกันคือ 16.4 และ 17.5 ชม. แต่มีอัตราการใช้พลังงานประมาณ 20.27 และ 41.56 MJ/hr. ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากผลต่างของอุณหภูมิข้าวเปลือกก่อนและหลังลดความชื้นที่แตกต่างกัน โดยจะเห็นได้ว่าเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสานใช้เวลาและพลังงานในการลดความชื้นข้าวเปลือกน้อยกว่าเครื่องลดความชื้นแบบหมุนเวียน

ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการพัฒนาสร้างเครื่องลดความชื้นแบบผสมผสานและทดสอบใช้งานจริง โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองการใช้พลังงานนี้ในการวางแผนการทดสอบต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] “การกำหนดมาตรฐานสินค้าเกษตร: ข้าวหอมมะลิไทย มาตรฐานเลขที่ มกษ. 4000-2560” ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ฉบับที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ.2560

[2] พิรสิทธิ์ ทวยนาค, มณฑล ชูโชนาค, มุสตาฟา ยะกา, และ ประชา บุณยวานิชกุล, “การทบทวนพัฒนาการของการลดความชื้นข้าวเปลือกในทางอุตสาหกรรม,” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 9 ฉบับที่ 1, 2557, หน้า 68-74

[3] สุรชัย เหมหิรัญ และ ประชา บุณยวานิชกุล, “การทบทวนวิธีการควบคุมการลดความชื้นข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบต่างๆ” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีที่ 24 ฉบับที่ 1, 2560 หน้า 60-68

[4] B.S. Reddy and A. Chakraverty, “Physical Properties of Raw and Parboiled Paddy,” Biosystems Engineering Volume 88, Issue 4, 2004, pp. 461-466

[5] D. Kumar, P. Mahanta, and P. Kalita, “Performance analysis of a novel biomass-fired grain dryer integrated with thermal storage medium,” Biosystems Engineering Volume 216, 2004, pp. 65-78

[6] สมพจน์ คำแก้ว, “อุณหภูมิการอบแห้งแบบหมุนเวียนของข้าวเปลือกมีผลต่อสารหอม (2AP)” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 16 ฉบับที่ 3, 2564, หน้า 1-9

[7] สมพจน์ คำแก้ว, “อิทธิพลของความแตกต่างของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสารหอม (2AP) ข้าวหอมปทุม” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 16 ฉบับที่ 2, 2564, หน้า 49-55

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลการศึกษาการทำไพโรไลซิสโดยการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตเชื้อเพลิงทดแทน

Result on Pyrolysis of Natural Rubber for Alternative Fuel Production

มักตาร์ แวหะยี[1] จารุวัฒน์ เจริญจิต[2] สิทธิพร บุญญานุวัตร์[2] สุเทพ ชูกลิ่น[2] และ วสุ สุขสุวรรณ[2*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
[2*]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: wasu.s@rmutsv.ac.th [*]

บทคัดย่อ

การศึกษางานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเตาไพโรไลซิสโดยใช้เชื้อเพลิงจากเศษยางธรรมชาติ และศึกษาปริมาณผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C และเมื่อได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจะนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมัน โดยวิเคราะห์จุดวาบไฟ ค่าความหนืดของน้ำมัน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนาแน่นของน้ำมัน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง โดยการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสจะใช้ยางธรรมชาติ 3 kg ผลการทดลองพบว่าปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ 2.41 kg คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) เท่ากับ 80.33 % โดยผลิตได้สูงสุดในนาทีที่ 30 และใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG ไป 2.18 kg คุณสมบัติที่ทดสอบน้ำมัน มีจุดวาบไฟที่ 8 °C มีค่าความหนืด 4.30 cSt ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.95 ค่าความหนาแน่น 950 kg/m^3 และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 10,262.37 kcal/kg เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของน้ำมันดิบ ปรากฏว่าน้ำมันชีวภาพมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะค่าความร้อนของเชื้อเพลิง
คำสำคัญ: ไพโรไลซิส, ยางธรรมชาติ, น้ำมันชีวภาพ, คุณสมบัติของเชื้อเพลิง

Abstract

The objective of this study is to design and construct a pyrolysis reactor using natural rubber waste as fuel, and to investigate the yield of products obtained from the pyrolysis process at a temperature of 400 °C. The resulting bio-oil was subsequently analyzed for its properties, including flash point, viscosity, specific gravity, density, and calorific value. In the experiment, 3 kg of natural rubber were used as feedstock for the pyrolysis process. The results showed that 2.41 kg of bio-oil were produced, corresponding to a yield of 80.33%, with the maximum production observed at the 30th minute. A total of 2.18 kg of LPG was consumed as auxiliary fuel. The properties of the bio-oil were found to be: flash point at 8°C, viscosity of 4.30 **cSt**, specific gravity of 0.95, density of 950 kg/m^3, and a calorific value of 10,262.37 kcal/kg. When compared to the properties of crude oil, the bio-oil exhibited similar characteristics, particularly in terms of its calorific value.
Keywords: Pyrolysis, Natural rubber, Bio-oil, Fuel properties

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ประเทศไทยพึ่งพาเชื้อเพลิงจากหลากหลายแหล่งพลังงาน โดยหลักมาจากการเผาไหม้น้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ หรือถ่านหิน ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปและมีแนวโน้มลดลง สวนทางกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการนำเข้าและเผชิญกับราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ ทั่วโลกจึงให้ความสำคัญกับการแสวงหาแหล่งพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทน เพื่อทดแทนพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป

การพิจารณาเลือกใช้พลังงานทางเลือกนั้น ส่วนใหญ่คำนึงถึงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ หรือพลังงานแสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตาม ยังมีแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพอีกประเภทหนึ่ง คือ เชื้อเพลิงชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งมีปริมาณมากและหลากหลายตามแต่ละภูมิภาค โดยอยู่ในรูปของเชื้อเพลิงแข็ง และส่วนใหญ่นำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม จากข้อมูลของสำนักงานสิ่งแวดล้อม [1] การใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ [2] คือ (1) การใช้โดยตรง ผ่านการเผาเพื่อให้ความร้อนและแสงสว่าง ซึ่งปริมาณพลังงานที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล ตัวอย่างการใช้งาน ได้แก่ โรงไฟฟ้าชีวมวล หรือโรงงานที่ใช้ไอน้ำจากหม้อต้มไอน้ำ และ (2) การใช้โดยผ่านกระบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานได้หลากหลายรูปแบบและสะดวกต่อการใช้งาน [3-5] เช่น เอทานอล น้ำมันชีวภาพ หรือก๊าซชีวภาพ

จากการทบทวนกระบวนการทางเคมีที่สามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงชีวมวลแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงก๊าซ เชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลวได้พร้อมกัน คือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) [6-8] ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่า

ความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) โดยให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 500 - 800 °C [9-11] ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ทุกชนิด และยังเป็นการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการนำวัสดุเหลือทิ้งมาเพิ่มมูลค่า

การแปรรูปยางธรรมชาติให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการลดต้นทุนด้านพลังงาน กระบวนการนี้เป็นการสลายตัวทางความร้อนของยางธรรมชาติในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือ เชื้อเพลิงเหลว ก๊าซเชื้อเพลิง และถ่านคาร์บอน เชื้อเพลิงเหลวที่ได้สามารถนำไปใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตร ซึ่งจะช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายของเกษตรกร รวมถึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เพื่อเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานในระดับชุมชน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาศักยภาพของยางธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณมากในประเทศไทย ในการผลิตน้ำมัน ทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำยางธรรมชาติแต่ละชนิดมาใช้เป็นแหล่งผลิตน้ำมัน ผลการศึกษาจะช่วยประเมินศักยภาพของการผลิตน้ำมันจากยางธรรมชาติ และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำยางธรรมชาติมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำมันต่อไป

2. การออกแบบวิธีการทดอง

2.1 ชุดทดลอง

สำหรับชุดทดลองไพโรไลซิสประกอบด้วย ด้วยเตาปฏิกรณ์ โดยจะเป็นแบบถังซ้อน ถังชั้นนอกสำหรับให้ความร้อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 cm หนา 3 mm และถังชั้นในสำหรับใส่ยางธรรมชาติ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm ถังปฏิกรณ์ มีฝาปิด และมีซีลกันอากาศ และแรงดันที่เกิดในถังขณะทำปฏิกิริยา มีช่องวัดอุณหภูมิแบบ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แบบ RTD (PT100) ที่ถังให้ความร้อนและถังในเตาปฏิกรณ์ สำหรับถังใส่ยางธรรมชาติสามารถบรรจุได้ครั้งละ 3 kg และให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้มก๊าซปิโตรเลียมเหลว หรือก๊าซ LPG จากนั้น เมื่อความร้อนถึงจุดที่เผายางจนละลายเป็นไอแล้ว ไอที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่สามารถกลั่นตัวเป็นเชื้อเพลิง จะวิ่งไหลผ่านเข้าสู่ถังควบแน่น

โดยถังควบแน่นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 cm โดยการกระจายเข้าตามท่อที่มีลักษณะเป็นขดเกลียวมีขนาด ¾ นิ้ว เพื่อให้ขดเกลียวมีพื้นที่สัมผัสกับน้ำในถังควบแน่น โดยไอเหล่านี้เรียกว่าก๊าซสังเคราะห์ (Syngas) ซึ่งถังควบแน่นจะมีการเวียนน้ำรอบท่อขดเกลียว โดยจะมีวาล์วขนาด 2 นิ้ว 2 จุด อยู่ในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของถังควบแน่น สำหรับสวมสายยางเพื่อหมุนเวียนน้ำหล่อเย็น เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ท่อขดเกลียวในถังควบแน่นเย็นขึ้น ช่วยให้การลอยตัวของก๊าซไพโรไลซิสดีขึ้น

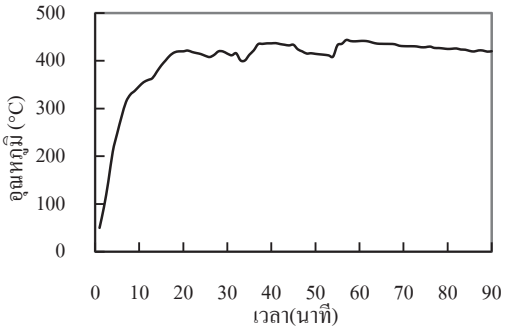
2.2 วิธีการทดลอง

สำหรับวิธีการทำการทดลองเริ่มจากการป้อนเชื้อเพลิงยางธรรมชาติ ปริมาณ 3 kg เข้าไปในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส จากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส โดยเพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่จะทำการศึกษา ซึ่งกำหนดอุณหภูมิในการไพโรไลซิสไว้ที่ 400 °C เมื่ออุณหภูมิที่กำหนดไว้คงที่จะทำการรักษาระดับของอุณหภูมิไพโรไลซิสให้คงที่เป็นเวลา 90 นาที

ในส่วนของการบันทึกข้อมูลจะบันทึกอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสตลอดการทดลองโดยบันทึกผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล และในส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะถูกส่งไปยังเครื่องควบแน่นเพื่อกลั่นเป็นน้ำมันชีวภาพ (Liquid product) จากนั้นจะนำก๊าซเชื้อเพลิงไปวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย น้ำมัน จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ความหนืดของน้ำมัน ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนาแน่น และ ค่าความร้อน

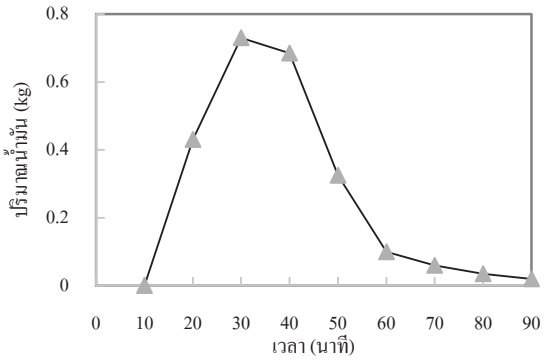
3. ผลการทดสอบ

สำหรับรูปที่ 1 แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 400 °C ตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในช่วงแรกจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วง 20 นาทีแรกซึ่งเป็นช่วงเพิ่มความร้อนให้กับเตาปฏิกรณ์ (Heating period) และหลังจากนาทีที่ 20 อุณหภูมิจะมีการรักษาระดับอุณหภูมิได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในช่วงนี้จะเป็นช่วงรักษาระดับอุณหภูมิสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis period) สำหรับผลของโปรไฟล์อุณหภูมิในลักษณะดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าเชื้อเพลิงจากยางธรรมชาติที่อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ได้รับเฉพาะความร้อนที่ออกมาจากการให้ความร้อนจากก๊าซปิโตรเลียม และจะไม่มีการสร้างความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ เพราะภายในเตาไพโรไลซิสเป็นพื้นที่อับอากาศ



รูปที่ 1 โปรไฟล์อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

จากรูปที่ 2 กราฟแสดงถึงปริมาณน้ำมันที่ได้จากการทดลองอุณหภูมิ 400°C โดยผลจากการที่ทดลองได้พบว่าผลผลิตน้ำมันมีความแตกต่างกันตามระยะเวลาที่ใช้ใน โดยที่อุณหภูมิ 400°C ผลการทดลองพบว่าผลผลิตน้ำมันได้ 2.41 kg โดยเริ่มผลิตได้ในช่วงนาทีที่ 10 – 60 หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) 80.33% และสำหรับช่วงที่มีการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสมากที่สุดเกิดในช่วงนาทีที่ 30 – 40 ซึ่งจะเป็นช่วงอุณหภูมิที่สามารถเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis period) ได้



รูปที่ 2 ปริมาณน้ำมันสะสมจากการทดลอง ณ เวลาต่างๆ

ตารางที่ 1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 400 °C

รายละเอียด	ค่า
อุณหภูมิที่ทดลอง (°C)	400
น้ำหนักยางที่ทดลอง (kg)	3
ถ่านที่มาจากยางธรรมชาติ (kg)	0.135
น้ำหนักก๊าซ LPG ที่ใช้ (kg)	2.18
ผลรวมของผลิตภัณฑ์	
น้ำมันที่ได้ (kg)	2.41
เปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) (%)	80.33

และเมื่อพิจารณาปริมาณของเถ้าที่อยู่ภายในเตาไพโรไลซิสหลังจากระยะเวลา 90 นาที โดยมีน้ำหนัก 0.135 kg และใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียม (LPG) นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณของก๊าซเชื้อเพลิงปิโตรเลียม (LPG) ที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อนตลอดกระบวนการไพโรไลซิส จะใช้ก๊าซเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2.4 kg หรือคิดเป็นมูลค่า 60 bath ต่อการทำกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C ดังแสดงในตารางที่ 1

นอกจากนั้นได้มีการนำน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมาทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยความหนืดของน้ำมัน จุดวาบไฟ จุดติดไฟ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นของน้ำมัน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพจากยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับคุณสมบัติของน้ำมันดิบ จากการทดลองจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C มีคุณสมบัติจุดวาบไฟที่ 8 °C และจุดติดไฟที่ 13 °C ซึ่งคาดเคลื่อนไม่เกิน 2 °C และเมื่อพิจารณาความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าอยู่ที่ 4.30 cSt ความถ่วงจำเพาะ 0.95 ความนาแน่น 950 kg/m^3 และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (H.H.V.) มีค่าเท่ากับ 10,262.97 kcal/kg ซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนคล้ายกับน้ำมันดิบที่อยู่ที่ 10,038-11,233 kcal/kg

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาความหนืดของน้ำมัน ความถ่วงจำเพาะความหนาแน่นของน้ำมัน และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

รายละเอียด	น้ำมันไพโรไลซิสที่ 400 °C	น้ำมันดิบ
จุดวาบไฟ (°C)	8	< 37.8 [12]
ความหนืดของน้ำมัน (cSt)	4.30 ที่ 40 °C	9.03 [13] ที่ 45 °C
ความถ่วงจำเพาะ @ 15.6 °C	0.95	0.79-086 [14]
ความหนาแน่น (kg/m^3)	950	850-925 [15]
ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (H.H.V) kcal/kg	10,262.97	10,038-11,233 [15]

4. สรุป

การศึกษาการทำไพโรไลซิสโดยการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตเชื้อเพลิงทดแทน ทดลองเผายางธรรมชาติหนัก 3 kg การทดลองที่ช่วงอุณหภูมิที่ 400 °C ได้ปริมาณน้ำมันที่ 2.41 kg คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) เท่ากับ 80.33 %

ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมัน จากการทดลองจุดวาบไฟและจุดติดไฟของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 °C มีคุณสมบัติมีคุณสมบัติจุดวาบไฟที่ 8 °C และจุดติดไฟที่ 13 °C ซึ่งคาดเคลื่อนไม่เกิน 2 °C และเมื่อพิจารณาความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสมีค่าอยู่ที่ 4.30 cSt ความถ่วงจำเพาะ 0.95 ความนาแน่น 950 kg/m^3 และค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (H.H.V.) มีค่าเท่ากับ 10,262.97 kcal/kg ซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนคล้ายกับน้ำมันดิบที่อยู่ที่ 10,038-11,233 kcal/kg

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG6701394S

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 13. (2561). สิ่งแวดล้อมน่ารู้ : พลังงานชีวมวล. แหล่งที่มา http://www.mnre.go.th/ (เข้าถึงเมื่อ 18 มกราคม 2565)

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). ชุดที่ 4 คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (พลังงานชีวมวล). กระทรวงพลังงาน.

[3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). ชุดที่ 7 คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน (เชื้อเพลิงเอทานอล). กระทรวงพลังงาน.

[4] ศุณัฐชา สลัดทุกข์, สกฤทธรา รัตนวิไล, กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์, และผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์. (2564). การผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเปลือกเมล็ดกาแฟโดย Co/HZSM-5 และ Ni/HZSM-5 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบด-นิ่งและไมโครเวฟ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 10(2), 19-39.

[5] Ahmed, I., & Gupta, A. K. (2009). Syngas yield during pyrolysis and steam gasification of paper. Applied Energy, 86, 1813-1821.

[6] Wang, G., Li, W., Li, B., & Chen, H. (2008). TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas. Fuel, 87, 552-558.

[7] อรทัย วงษาเวียง, มาลีวรรณ อุนพิพัฒน์, ชลธิชา เจริญเนตร, และเอกราชันย์ ไชยชนะ. (2559). ไพโรไลซิสของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นจังหวัดนครปฐม. วารสารวิจัยสหวิทยาการไทย, 11(2), 46–53.

[8] ฉิศาธร นำเจริญพินิจ, และ วิชชากร จารุศิริ. (2560). การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพบนเครื่องไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี), 9(17), 41–51.

[9] Hua, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. Journal of Energy Chemistry, 39, 1-161.

[10] วสุ สุขสุวรรณ, และ มักตาร์ แวหะยี. (2562). การทบทวนเอกสาร: เทคโนโลยีเตาฟลูอิไดซ์เบดแก๊สซิไฟเออร์ขนาดเล็ก (<100 กิโลวัตต์). การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ (ครั้งที่ 18), 20-21 มีนาคม 2562, จังหวัดกระบี่ ประเทศไทย.

[11] Suksuwan, W., Mohideen Batcha, M. F., Palamanit, A., & Wae-hayee, M. (2021). The Effect of Biomass Shapes on Combustion Characteristic in Updraft Chamber. International Journal of Integrated Engineering, 13(4), 163–171.

[12] JK-Create. (n.d.). Siam quality work ถ่านหิน ขายถ่านหิน น้ำมันเตา ขายน้ำมันเตา กะลาปาล์ม ขายกะลาปาล์ม. บริษัท สยาม ควอลิตี้ เวิร์ค จำกัด. สืบค้นจาก https://www.siamqualitywork.com/get_article.php?&get=168 (เข้าถึงเมื่อ 27 ธันวาคม 2567)

[13] Popoola, C. A., Ogundola, J., & Kolaru, S. A. (2017). EFFECT OF FLOW IMPROVER BLENDS ON CRUDE OIL RHEOLOGY. FUW Trends in Science & Technology Journal, 2(1), 114-117.

[14] SMD Fluid Controls. (2019, March 6). Specific gravity resource. http://www.fluidswitch.com/resources/specific-gravity/

[15] Alberta Energy Regulator. (n.d.). Crude oil methodology. สืบค้นจาก https://www.aer.ca/data-and-performance-reports/ (เข้าถึงเมื่อ 27 ธันวาคม 2567)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

มาตรการอนุรักษ์พลังงานของโรงพยาบาลในช่วง 1 ทศวรรษ: แนวทางการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน

Energy Conservation Measures in Hospitals Over the Past Decade: Effective Energy Management Strategies Toward Carbon Neutrality

จารุวรรณ พันลำภักดิ์[1] วรรัตน์ ปัตรประกร[1] และ พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร[2]
[1]สาขาวิชาสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการใช้พลังงานในโรงพยาบาลกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงานด้านไฟฟ้าที่ดำเนินการในโรงพยาบาลประเภทอาคารควบคุมตามกฎหมาย ในช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 เพื่อประเมินแนวโน้มการใช้พลังงานและประสิทธิผลของมาตรการในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีเป้าหมายสนับสนุนการเข้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ผลการศึกษาพบว่า ปี พ.ศ. 2559 เป็นปีที่มีการประหยัดพลังงานสูงสุด คิดเป็น 47,196,301 kWh โดยมาตรการที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด ได้แก่ ระบบปรับอากาศหรือทำความเย็นและระบายอากาศ (ร้อยละ 53), ระบบแสงสว่าง (ร้อยละ 38.2) และระบบส่วนกลาง (ร้อยละ 5.1) ซึ่งมาตรการที่ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดคือ ระบบปรับอากาศหรือทำความเย็นและระบายอากาศ (256,814,664 kWh) รองลงมาคือ ระบบแสงสว่าง (96,572,076 kWh) และการจัดการระบบส่วนกลาง (10,192,445 kWh) ในด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากมาตรการพบว่า ระบบปรับอากาศมีศักยภาพในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สูงสุดที่ 152,780,468 tCO_2 รองลงมาคือ ระบบแสงสว่าง 56,221,590 tCO_2 และระบบส่วนกลาง 5,938,280 tCO_2 ผลการวิจัยสามารถใช้สนับสนุนการวางแผนนโยบายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของรัฐ รวมถึงยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันของโรงพยาบาลในอุตสาหกรรมบริการสุขภาพอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การอนุรักษ์พลังงาน, การจัดการพลังงาน, การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ, การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

Abstract

This study investigates the relationship between energy consumption in hospitals and carbon dioxide (CO_2) emissions by analyzing electricity-based energy conservation measures implemented in legally designated. The controlled buildings (hospitals) between 2010 and 2020. The aim is to assess energy consumption trends and the effectiveness of such measures in reducing greenhouse gas emissions, thereby supporting the goal of achieving carbon neutrality. The findings reveal that 2016 recorded the highest energy savings, amounting to 47,196,301 kWh. The most frequently implemented energy conservation measures included air conditioning, cooling, and ventilation systems (53%), lighting systems (38.2%), and central systems (5.1%). Among these, the air conditioning and ventilation systems achieved the highest energy savings at 262,464,297.39 kWh, followed by lighting systems at 96,584,074.33 kWh, and central systems at 10,201,477.93 kWh. In terms of CO_2 emission reduction, air conditioning systems demonstrated the highest potential at 152,780,468 tCO_2, followed by lighting systems at 56,221,590 tCO_2 and central systems at 5,938,280 tCO_2. The results of this study can support national energy and environmental policy planning and enhance the long-term competitiveness and sustainability of hospitals within the healthcare industry.

Keywords: Energy Conservation, Energy Management, Energy Efficiency, Greenhouse Gas Emission Reduction

1. บทนำ

วิกฤตพลังงานส่งผลกระทบต่อต้นทุนพลังงานในทุกภาคส่วน รวมถึงภาคสาธารณสุข ทำให้ประเทศไทยต้องใช้งบประมาณจำนวนมากในการจัดหาและบริหารพลังงานเพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้น ราคาพลังงานที่สูงขึ้น ยังเป็นภาระทางเศรษฐกิจและลดขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ เพื่อแก้ปัญหานี้ภาครัฐ ได้ออกพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550 กำหนดให้โรงงานและอาคารควบคุม รวมถึงโรงพยาบาลดำเนินมาตรการจัด

การพลังงานอย่างเป็นระบบ เพื่อลดการใช้พลังงาน ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน

ภาคพลังงานเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทยปล่อยก๊าซเรือนกระจก 305.52 ล้านตัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จาก ภาคพลังงาน (72.97%) ภาคเกษตรกรรม (17.32%) ภาคอุตสาหกรรม (5.97%) และภาคของเสีย (3.74%) [1] เพื่อลดผลกระทบ ประเทศไทยตั้งเป้าลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 20-25% ภายในปี 2030 ผ่านมาตรการ เช่น ลดการใช้พลังงานฟอสซิล ส่งเสริมพลังงานทดแทน พัฒนาการขนส่งระบบราง และปรับปรุงการจัดการพลังงาน โรงพยาบาลเป็นองค์กรที่ใช้พลังงานสูงและมีบทบาทสำคัญต่อการลดก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากต้องใช้พลังงานต่อเนื่องสำหรับ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบไฟฟ้า และการจัดการสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จำนวนมาก โดยเฉพาะจากไฟฟ้าและเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้น การลดการใช้พลังงานในโรงพยาบาลจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนเป้าหมาย Carbon Neutrality งานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ มาตรการอนุรักษ์พลังงานที่ดำเนินการในช่วง 1 ทศวรรษที่ผ่านมา (พ.ศ. 2553-2563) เพื่อประเมินแนวโน้มการใช้พลังงานในโรงพยาบาล และหาแนวทาง การจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

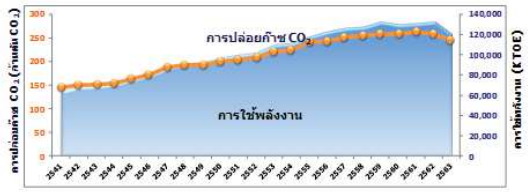
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎี

โรงพยาบาลเป็นหนึ่งในอาคารควบคุมที่ใช้พลังงานสูง เนื่องจากต้องเปิดให้บริการ ตลอด 24 ชั่วโมง และมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของระบบสาธารณสุข ปัจจุบันประเทศไทยมีอาคารควบคุม 2,984 แห่ง โดย 257 แห่งเป็นโรงพยาบาล [2] การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการใช้พลังงานของประเทศในช่วงที่ผ่านมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นนับตั้งแต่หลังภาวะเศรษฐกิจตกต่ำ จาก 145.5 ล้านตัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปี 2541 เป็น 263.4 ล้านตัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปี 2561 หรือเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.0 ต่อปี สอดคล้องกับการใช้พลังงานของประเทศที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.7 ต่อปี อย่างไรก็ตามในปี 2562 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการใช้พลังงานอยู่ที่ 257.7 ล้านตัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งลดลงร้อยละ 2.2 เมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า เนื่องจากการใช้พลังงานทดแทนที่เพิ่มมากขึ้นตามนโยบายส่งเสริมพลังงานทดแทนของรัฐบาล จึงทำให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการใช้พลังงานลดลงแม้ว่าจะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น สำหรับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานในปี 2563 อยู่ที่ 244.8 ล้านตัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งลดลงร้อยละ 5.0 เมื่อเทียบกับปีก่อน โดยเป็นการลดลงในทุกภาคเศรษฐกิจ ทั้งภาคการผลิตไฟฟ้า ภาคขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม และภาคเศรษฐกิจอื่นๆ [3]

การปล่อยก๊าซ CO_2 และการใช้พลังงานของไทย

	2560 (2017)	2561 (2018)	2562 (2019)	2563 (2020)	การเปลี่ยนแปลง (%) 2561	2562	2563
การใช้พลังงานของไทย (KTOE)	130,453	131,531	133,056	120,727	0.8	1.2	-9.3
การปล่อยก๊าซ CO_2 (ล้านตัน CO_2)	258.5	263.4	257.7	244.8	1.9	-2.2	-5.0



รูปที่ 1 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการใช้พลังงานของไทย

กิจกรรมที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกหมายถึงกิจกรรมที่ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งโดยตรงและโดยอ้อมจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เพื่อให้การจัดการเป็นระบบ จึงมีการแบ่งกิจกรรมออกเป็น 3 ขอบเขตตามมาตรฐาน ISO 14064-1 และ GHG Protocol ได้แก่: ขอบเขตที่ 1: การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรงจากกิจกรรมขององค์กร เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องจักร หรือการรั่วไหลของสารทำความเย็น ขอบเขตที่ 2: การปล่อยทางอ้อมจากการใช้พลังงาน เช่น ไฟฟ้า ไอน้ำ หรือความร้อนที่ซื้อมาจากภายนอก ขอบเขตที่ 3: การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ เช่น การใช้น้ำ กระดาษ หรือการเดินทางของพนักงาน ซึ่งไม่เป็นข้อบังคับแต่สามารถตรวจวัดได้ [4]

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก = ข้อมูลกิจกรรม X ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (1)



รูปที่ 2 ขอบเขตการประเมินรายงานข้อมูลก๊าซเรือนกระจกขององค์กร

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นมาตรการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะ โดยประเมินผลกระทบจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้ไฟฟ้า ด้วยค่า Emission Factor 0.5821 kgCO_2 eq/kWh (ข้อมูลจาก Thailand Grid Mix Electricity ณ 1 มกราคม 2560) และพิจารณาการลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขตที่ 2 เท่านั้น

2.2 ขั้นตอนการศึกษา

การเก็บรวบรวมและตรวจสอบคุณภาพข้อมูลจากรายงานการจัดการพลังงานจากอาคารควบคุมประเภทที่ 9 (โรงพยาบาล) ในช่วงปี พ.ศ. 2553–2563 เพื่อวิเคราะห์ผลการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงาน โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1: วิเคราะห์ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ (kWh) จากการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงาน และพิจารณาว่ามาตรการใดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานมากที่สุด ขั้นตอนที่ 2: วิเคราะห์ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานในช่วงเวลาดังกล่าว

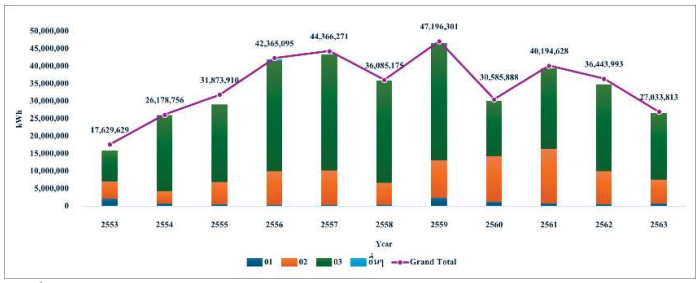
การประเมินแนวโน้มการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซได้อย่างชัดเจนและเป็นระบบ

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \ldots + b_nX_n \qquad (2)$$

โดยที่ Y คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable)
b_0 คือ ค่าคงที่ (Intercept)
$b_1, b_2, \ldots, b_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)
$X_1, X_2, \ldots, X_n$ คือ ตัวแปรอิสระ (Independent Variables)

2.3 ผลการศึกษา

จากการศึกษาข้อมูลรายปีของอาคารควบคุมประเภทที่ 9 (โรงพยาบาล) ซึ่งอยู่ภายใต้พระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2553–2563 ผลการศึกษาจากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปี พ.ศ. 2559 เป็นปีที่มีการประหยัดพลังงานสูงสุด คิดเป็น 47,196,301 kWh ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีการสนับสนุนงบประมาณในระดับสูง ส่งผลให้สามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์และระบบต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในด้านจำนวนมาตรการที่ถูกนำไปใช้จากรูปที่ 4 พบว่ามาตรการที่มีการดำเนินการมากที่สุด ได้แก่ ระบบปรับอากาศ/ทำความเย็น โดยการใช้เครื่องปรับอากาศชุดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงทดแทนชุดเดิมรวมถึงการบำรุงรักษา คิดเป็นร้อยละ 53 ระบบแสงสว่าง โดยการเปลี่ยนจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (FL) เป็นหลอด LED คิดเป็นร้อยละ 38.2 และระบบส่วนกลาง ด้วยการกำหนดเวลาปิด–เปิดอุปกรณ์อย่างเหมาะสม คิดเป็นร้อยละ 5.1 เมื่อวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานจำแนกตามมาตรการจากรูปที่ 5 พบว่า มาตรการด้านระบบปรับอากาศและระบายอากาศสามารถลดการใช้พลังงานได้มากที่สุด คิดเป็น 256,814,664 kWh รองลงมาคือมาตรการด้านระบบแสงสว่าง คิดเป็น 96,572,076 kWh และมาตรการด้านระบบส่วนกลาง คิดเป็น 10,192,445 kWh



รูปที่ 3 ผลประหยัดของทุกมาตรการจากรายงานการอนุรักษ์พลังงานของโรงพยาบาล ปี 2553 – 2563

ตารางที่ 1 รหัสและมาตรการที่อนุรักษ์พลังงาน

รหัสมาตรการ	มาตรการที่อนุรักษ์พลังงาน
01	ระบบส่วนกลาง
02	ระบบแสงสว่าง
03	ระบบปรับอากาศหรือทำความเย็นและระบายอากาศ
อื่นๆ	เช่น ระบบอากาศอัด, ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า, การเปลี่ยนไปใช้พลังงานอีกประเภทหนึ่ง, ระบบมอเตอร์ไฟฟ้า, ระบบปั๊มและพัดลม เป็นต้น

จากการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากสมการที่ 1 โดยพิจารณาเฉพาะใน ขอบเขตที่ 2 พบว่า การลดการใช้พลังงานตามมาตรการอนุรักษ์พลังงานสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในระดับหนึ่ง โดยได้ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย สมการถดถอย (Regression Analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ (หน่วย: kWh) จากสมการที่ 2

โดยที่
Y คือ ผลประหยัดของทุกมาตรการจากรายงานการอนุรักษ์พลังงานของโรงพยาบาล ปี 2553 – 2563
b_0 คือ ค่าคงที่ (Intercept)
$b_1, b_2, \ldots, b_n$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients)

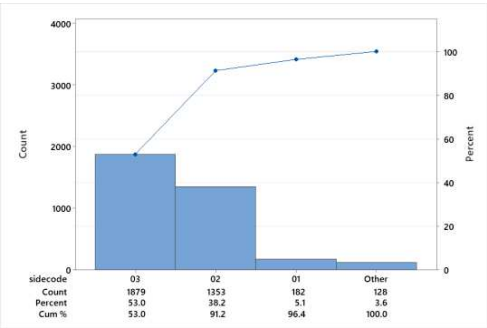
$X_1, X_2, ..., X_n$ คือ ปีที่ดำเนินการ, มาตรการอนุรักษ์พลังงาน, กระบวนการ, หน่วยงาน, และขนาดของโรงพยาบาล

สมการถดถอย (*Regression Analysis)*

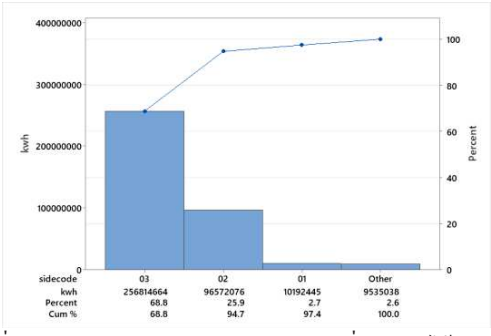
kWh= 38462 + 0.0 ปี 2553 + 7093 ปี 2554 + 44894 ปี 2555 + 26656 ปี 2556+ 4494 ปี 2557 + 6549 ปี 2558 + 50114 ปี 2559 + 29197 ปี 2560 + 55957 ปี 2561+ 37273 ปี 2562 + 6344 ปี 2563 + 0.0 กระบวนการ 1 + 41413 กระบวนการ 2 + 8744 กระบวนการ 3+ 0.0 มาตรการ 01 - 11668 มาตรการ 02 + 60963 มาตรการ 03 + 20908 มาตรการ 05+ 8656 มาตรการ 07 + 8203 มาตรการ 09 + 37180 มาตรการ 10 + 12872 มาตรการ 12+ 0.0 หน่วยงาน 1 ภาครัฐ - 13027 หน่วยงาน 1 ภาคเอกชน + 0.0 ขนาด โรงพยาบาลขนาดกลาง - 38221 ขนาด โรงพยาบาลขนาดเล็ก + 34897 ขนาด โรงพยาบาลขนาดใหญ่

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ได้แก่ ปี 2555, 2559, 2561, 2562, P-value = 0.006, 0.002, 0.002 และ 0.025 กระบวนการประเภท Machine Change, มาตรการด้านระบบปรับอากาศหรือทำความเย็นและระบายอากาศ และขนาดโรงพยาบาลขนาดใหญ่ P-value = 0.000, 0.000, 0.000 ค่า $R^2 \approx 6.45\%$ ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้บางส่วน อย่างไรก็ตาม ยังมีตัวแปรแฝงอื่น ๆ ที่ควรนำมาพิจารณาเพิ่มเติม เช่น จำนวนผู้ป่วย และพื้นที่ใช้สอย

การลดการใช้พลังงานจากการดำเนินมาตรการอนุรักษ์พลังงานส่งผลให้การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตามประเภทของมาตรการ ดังนี้ ในส่วนของผลการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการดำเนินการตามมาตรการอนุรักษ์พลังงาน พบว่า มาตรการที่เกี่ยวข้องกับระบบปรับอากาศ/ทำความเย็นและระบายอากาศ สามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้มากที่สุด: 152,780,468 tCO2 ระบบแสงสว่าง 56,221,590 tCO2 และ ระบบส่วนกลาง 5,938,280 tCO2



รูปที่ 4 ผลการศึกษาจำนวนรายการที่ดำเนินการมากที่สุดของโรงพยาบาล ปี 2553 – 2563



รูปที่ 5 ผลประหยัดพลังงาน (kWh) จากรายการที่ประหยัดได้มากที่สุด

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษา พบว่ามาตรการอนุรักษ์พลังงานในโรงพยาบาลมีส่วนสำคัญในการลดการใช้ไฟฟ้าและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะในช่วงที่ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากภาครัฐ โรงพยาบาลขนาดใหญ่และภาครัฐสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่า เนื่องจากมีการดำเนินงานเชิงระบบและมีทรัพยากรพร้อม ทั้งนี้ มาตรการด้านระบบปรับอากาศมีศักยภาพสูงสุดในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบบจำลองเชิงสถิติบ่งชี้แนวโน้มได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังต้องพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยนี้ คือ ควรสนับสนุนงบประมาณเชิงนโยบายอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในโรงพยาบาลรัฐและขนาดใหญ่ พร้อมขยายผลไปยังโรงพยาบาลเอกชนและภูมิภาคอื่น รวมถึงพัฒนาระบบติดตามผลรายปี และนำข้อมูลจากการศึกษานี้ไปใช้กำหนดนโยบายด้านพลังงานและเป้าหมาย Carbon Neutrality ให้สอดคล้องกับบริบทจริงของภาคสาธารณสุข

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2565
[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560
[3] การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จากการใช้พลังงานปี 2563
[4] แนวทางการประเมินประสิทธิภาพองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น เรื่องรายงานข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การตรวจจับการบุกรุกในอุปกรณ์ IoT โดยอาศัยความผิดปกติของการใช้พลังงาน

Intrusion detection for IoT Devices using Energy Anomaly

กิติธัช คงงาม[1] และ พฤศยน นินทนาวงศา[1]
[1]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: {kititach.k, prusayon.n}@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สำรวจการนำนวัตกรรมการตรวจจับการบุกรุกโดยอาศัยความผิดปกติของการใช้พลังงานไปประยุกต์ใช้ โดยมุ่งเน้นที่การเก็บรวบรวมข้อมูล, การสร้างโปรไฟล์รูปแบบการใช้พลังงานพื้นฐาน , การตรวจจับความผิดปกติแบบเรียลไทม์ และการจำแนกประเภทของภัยคุกคาม มีการประยุกต์ใช้เทคนิคที่หลากหลาย เช่น วิธีการทางสถิติ, อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง, และการวิเคราะห์อนุกรมเวลา เพื่อที่จะตรวจจับและบรรเทาภัยคุกคามด้านความปลอดภัยได้อย่างแม่นยำ ในขณะเดียวกันก็ลดการแจ้งเตือนที่ผิดพลาดให้น้อยที่สุด แนวทางนี้สามารถตอบโจทย์ความท้าทายต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นความหลากหลายของอุปกรณ์, ข้อจำกัดด้านทรัพยากร และความกังวลด้านความเป็นส่วนตัว พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเสริมความปลอดภัยของระบบ IoT ด้วยวิธีที่ใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาเน้นย้ำถึงความเป็นไปได้และประสิทธิผลของวิธีการนี้ในการปกป้องระบบนิเวศของ IoT โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้งานที่มีความสำคัญ เช่น ระบบอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรมและสภาพแวดล้อมอัจฉริยะ

คำสำคัญ: IoT, การตรวจจับการบุกรุก, ความผิดปกติด้านพลังงาน

Abstract

This paper explores the implementation of energy anomaly-based intrusion detection, focusing on data collection, baseline energy profiling, real-time anomaly detection, and classification of threats. Various techniques, including statistical methods, machine learning algorithms, and time-series analysis, are employed to accurately detect and mitigate security threats while minimizing false positives. The approach addresses the challenges of device diversity, resource constraints, and privacy concerns while demonstrating its potential to enhance IoT security in resource-efficient ways. The findings highlight the feasibility and effectiveness of this method in safeguarding IoT ecosystems, particularly in critical applications like industrial automation and smart environments

Keywords: IOT, Intrusion detection outbreak, Energy Anomaly

1. บทนำ

การใช้งาน IoT ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงครั้งใหญ่ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวัน โดยเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกผ่านการเชื่อมต่อของอุปกรณ์อัจฉริยะ เช่น บ้านอัจฉริยะ อุปกรณ์สวมใส่ และระบบอัตโนมัติในโรงงานหรือการแพทย์ แม้ว่าเทคโนโลยี IoT จะมีข้อดีหลายประการ แต่อุปกรณ์จำนวนมากยังคงมีข้อจำกัด ด้านทรัพยากรและความปลอดภัย ทำให้กลายเป็นเป้าหมายของการโจมตีไซเบอร์ เช่น การเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต การรั่วไหลของข้อมูล และการโจมตีแบบ DDoS ระบบตรวจจับการบุกรุกแบบเดิม (IDS) ไม่เหมาะกับ IoT เพราะใช้ทรัพยากรสูงและขาดความยืดหยุ่น แนวทางใหม่ที่มีความน่าสนใจ คือ การตรวจจับการบุกรุกโดยอิงจากความผิดปกติในการใช้พลังงาน ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมผิดปกติที่อาจเกิดจากการโจมตี งานวิจัยนำเสนอระบบที่เน้นวิเคราะห์การใช้พลังงานของอุปกรณ์เพื่อสร้างโปรไฟล์ ตรวจจับความผิดปกติแบบเรียลไทม์ และจำแนกภัยคุกคาม โดยใช้สถิติและ machine learning เพื่อลดการแจ้งเตือนผิดพลาด และรองรับข้อจำกัดของอุปกรณ์ IoT ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) คือการผสานอุปกรณ์อัจฉริยะเข้ากับอินเทอร์เน็ต เพื่อเชื่อมโยงโลกจริงกับโลกดิจิทัล การใช้งานมีความหลากหลาย ตั้งแต่บ้านอัจฉริยะจนถึงระบบอุตสาหกรรม โดยแม้จะแตกต่างกันในวัตถุประสงค์ แต่ก็มีลักษณะการทำงานที่คล้ายกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระยะหลัก การเก็บข้อมูล, การส่งข้อมูลและการประมวลผลใช้งาน ในระยะการเก็บรวบรวมข้อมูลอุปกรณ์เซนเซอร์จะทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากสภาพแวดล้อมโดยตรง โดยใช้เทคโนโลยีการสื่อสารระยะใกล้ที่ประหยัดพลังงาน อุปกรณ์มักมีข้อจำกัดด้านขนาด ความจำและพลังงาน จึงต้องใช้เครือข่ายที่เหมาะสมกับเงื่อนไขนี้ เช่น LLNs (Low-power and Lossy Networks) ระยะการส่งผ่านข้อมูลมุ่งเน้นข้อมูลจากเซนเซอร์จะถูกส่งต่อไปยังแอปพลิเคชันผ่านเทคโนโลยี เช่น Ethernet หรือ Wi-Fi โดยใช้โปรโตคอล TCP/IP เกตเวย์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลาง

ในการเชื่อมโยงเครือข่าย LLN กับเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทั่วไป เพื่อส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานหรือระบบปลายทาง

ในระยะการประมวลผลข้อมูลที่รวบรวมจะถูกประมวลผลเพื่อสกัดข้อมูลเชิงลึก และใช้ควบคุมวัตถุต่าง ๆ ให้โต้ตอบกับสภาพแวดล้อมได้อัตโนมัติ โดยมีมิดเดิลแวร์ (middleware) ช่วยในการผสานการทำงานระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ กับแอปพลิเคชันข้ามแพลตฟอร์ม

2.2 ระบบตรวจจับการบุกรุก

การตรวจจับการบุกรุกคือการระบุพฤติกรรมที่พยายามล่วงละเมิดระบบสารสนเทศ โดยผู้บุกรุกแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ผู้บุกรุกภายใน ที่มีสิทธิ์อยู่แล้วแต่การใช้งานระบบเกินสิทธิ์ที่ได้รับอนุญาต และผู้บุกรุกภายนอก ที่ไม่มีสิทธิ์และพยายามเข้าถึงระบบโดยมิชอบ IDS ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ตัวตรวจจับ เก็บข้อมูลกิจกรรมเครือข่าย, เครื่องมือวิเคราะห์ ตรวจสอบความผิดปกติและระบบรายงานผล ที่แจ้งเตือนผู้ดูแลเมื่อพบการบุกรุก โดยทั่วไป IDS สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ IDS ที่ทำงานบนเครือข่าย (Network-based IDS หรือ NIDS) และ IDS ที่ทำงานบนโฮสต์ (Host-based IDS หรือ HIDS) NIDS จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับหนึ่งหรือหลายส่วนของเครือข่ายและทำการวิเคราะห์ทราฟฟิกเครือข่ายอย่างต่อเนื่องเพื่อระบุรูปแบบพฤติกรรมที่บ่งชี้ถึงความพยายามโจมตีหรือการเข้าถึงโดยมิชอบส่วน HIDS จะถูกติดตั้งบนอุปกรณ์เฉพาะและติดตามกิจกรรมที่เป็นอันตรายภายในระบบนั้น ซึ่งแตกต่างจาก NIDS ตรงที่ HIDS จะวิเคราะห์ไม่เพียงแค่ทราฟฟิกเครือข่ายเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการเรียกใช้งานระบบ, กระบวนการที่กำลังทำงาน, การเปลี่ยนแปลงในระบบไฟล์, การสื่อสารระหว่างกระบวนการและบันทึกการทำงานของแอปพลิเคชันด้วย

3. การจำแนกประเภทของ IDS

3.1 การตรวจจับการบุกรุกแบบใช้ลายเซ็น

ในการตรวจจับแบบใช้ลายเซ็น IDS จะระบุการโจมตีโดยการเปรียบเทียบพฤติกรรมของระบบหรือเครือข่ายกับลายเซ็นการโจมตีที่กำหนดไว้ล่วงหน้าและจัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูลภายในของระบบ เมื่อพบว่ากิจกรรมใดตรงกับลายเซ็นที่มีอยู่ ระบบจะส่งสัญญาณเตือน IDS แบบใช้ลายเซ็นมีความแม่นยำสูงและมีประสิทธิภาพในการตรวจจับภัยคุกคามที่รู้จัก และกลไกการทำงานก็ตรงไปตรงมา อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้มีข้อจำกัดในการตรวจจับการโจมตีที่รูปแบบใหม่หรือถูกดัดแปลงเพราะภัยคุกคามที่ไม่รู้จักหรือรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงไปของภัยคุกคามเดิมยังไม่มีลายเซ็นที่กำหนดไว้ล่วงหน้าให้ใช้อ้างอิง ได้มีการนำเสนอแนวทางที่ใช้ทราฟฟิกเครือข่ายจากอุปกรณ์ในการตรวจจับการบุกรุกโดยมุ่งเน้นที่ระบบที่มีอุปกรณ์ 6LoWPAN ซึ่งมีทรัพยากรจำกัด งานวิจัยนี้มุ่งเป้าไปที่การตรวจจับการโจมตีแบบหลุมดำ (sinkhole attack) และการส่งต่อข้อมูลแบบเลือก (selective-forwarding attack) โดยเฉพาะอย่างไรก็ตาม กรอบการทำงานที่ชื่อ COLIDE ซึ่งนำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ขยายขีดความสามารถให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ที่หลากหลายและจัดการกับปัญหาที่หลากหลาย รวมถึงรูปแบบการโจมตีที่แตกต่างกัน, ความยืดหยุ่นโดยธรรมชาติของเครือข่าย IoT และการขาดความไว้วางใจระหว่างอุปกรณ์ที่เข้าร่วมในเครือข่าย [1], ผู้เขียนได้เสนอให้ใช้ Snort ซึ่งเป็น IDS แบบใช้ลายเซ็นบนเครือข่ายรุ่นใหม่ เพื่อสร้างระบบตรวจจับการบุกรุกสำหรับเครือข่าย IoT ที่สามารถพกพาได้ เป็นมิตรกับผู้ใช้ และมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน IDS นี้ถูกติดตั้งลงใน Raspberry Pi ทำให้สามารถพกพาไปพร้อมกับอุปกรณ์และใช้งานกับเครือข่ายใดก็ได้ที่อุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่ ข้อดีคือไม่ต้องพึ่งพาระบบ IDS ส่วนกลางซึ่งเป็นลักษณะของระบบตรวจจับการบุกรุกแบบโฮสต์ [2]

3.2 การตรวจจับการบุกรุกแบบวิเคราะห์ความผิดปกติ

ระบบตรวจจับการบุกรุกแบบวิเคราะห์ความผิดปกติ (Anomaly-Based IDS) ทำงานโดยเปรียบเทียบพฤติกรรมปัจจุบันกับโปรไฟล์พฤติกรรมปกติ หากพบความเบี่ยงเบนเกินขอบเขต ระบบจะส่งสัญญาณเตือน วิธีนี้เหมาะสำหรับการตรวจจับภัยคุกคามรูปแบบใหม่โดยเฉพาะการโจมตีที่ใช้ทรัพยากรเกินควร อย่างไรก็ดี แนวทางนี้ยังมีข้อจำกัดสำคัญ เช่น อัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดที่สูง (false positives) และความต้องการทรัพยากรในการประมวลผลที่มาก ซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์ IoT ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร

วิเคราะห์พลังงาน โหนด (node) จะตรวจสอบการใช้พลังงานของตนทุก 0.5 วินาที และจัดการโหนดผิดปกติ [3], (Deep-packet anomaly detection) ใช้การจับคู่บิตใน n-gram ตรวจจับความผิดปกติแบบประหยัดพลังงาน [4]

3.3 การตรวจจับการบุกรุกแบบอิงตามข้อกำหนด

ข้อกำหนด (specification) หมายถึงชุดของกฎและค่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ซึ่งอธิบายพฤติกรรมที่คาดหวังขององค์ประกอบเครือข่าย เช่น โหนด โปรโตคอล และตารางเส้นทาง ในวิธีการแบบอิงตามข้อกำหนด การบุกรุกจะถูกตรวจจับเมื่อพฤติกรรมของเครือข่ายเบี่ยงเบนไปจากข้อกำหนดที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเหล่านี้ เป้าหมายหลักของการตรวจจับแบบอิงตามข้อกำหนดมีความคล้ายคลึงกับการตรวจจับแบบวิเคราะห์ความผิดปกติ นั่นคือการตรวจจับการเบี่ยงเบนจากพฤติกรรมปกติ ความแตกต่างสำคัญอยู่ที่ในวิธีการแบบอิงตามข้อกำหนดนั้นกฎที่กำหนดข้อกำหนดแต่ละข้อจะต้องถูกกำหนดขึ้นโดยผู้เชี่ยวชาญด้วยตนเอง ข้อกำหนดที่ผู้เชี่ยวชาญกำหนดขึ้นด้วยตนเองเหล่านี้โดยทั่วไปส่งผลให้อัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวิธีการแบบ

วิเคราะห์ความผิดปกติ นอกจากนี้ ระบบตรวจจับแบบอิงตามข้อกำหนดไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการฝึกสอนระบบ (training) และสามารถเริ่มทำงานได้ทันทีหลังจากได้กำหนดข้อกำหนดเรียบร้อยแล้ว อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดที่กำหนดขึ้นด้วยมืออาจไม่สามารถปรับใช้กับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้ และกระบวนการกำหนดเหล่านี้อาจใช้เวลามากและมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดจากมนุษย์ ผู้เขียนได้เสนอแนวทางแบบอิงตามข้อกำหนดที่มุ่งตรวจจับการโจมตีในโปรโตคอล RPL พวกเขาได้กำหนดพฤติกรรมที่คาดหวังของ RPL ในรูปของเครื่องสถานะจำกัด (finite state machine) ซึ่งนำมาใช้ในการตรวจสอบเครือข่ายและตรวจจับกิจกรรมที่เป็นอันตราย ผู้เขียนยังได้ต่อยอดผลงานนี้โดยใช้ไฟล์เทรซจากโปรแกรมจำลองเครือข่าย Contiki เพื่อสร้างเครื่องสถานะจำกัดสำหรับโปรโตคอล RPL จากนั้นโมเดลนี้ถูกแปลงเป็นชุดของกฎเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการเฝ้าระวังจากโหนดเครือข่าย การทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการตรวจจับที่เป็นจริงสูงมาก โดยในบางกรณีสูงถึง 100% ขณะที่อัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดอยู่ในระดับต่ำ (ประมาณ 0% ถึง 6.78%) นอกจากนี้ รูปแบบที่นำเสนอส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 6.3% เมื่อเทียบกับเครือข่าย RPL ปกติ [5]

3.4 การตรวจจับการบุกรุกแบบผสมผสาน

วิธีการแบบผสมผสานนั้นผนวกรวมวิธีการตรวจจับแบบใช้ลายเซ็น, แบบอิงตามข้อกำหนด, และแบบวิเคราะห์ความผิดปกติเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อใช้ประโยชน์จากจุดแข็งของแต่ละวิธี ในขณะเดียวกันก็ลดผลกระทบจากจุดอ่อนของวิธีการเหล่านั้น SVELTE ซึ่งเป็น IDS แบบผสมผสานที่นำเสนอ มีเป้าหมายเพื่อสร้างสมดุลระหว่างต้นทุนด้านหน่วยความจำของวิธีแบบลายเซ็นกับต้นทุนด้านการประมวลผลของวิธีแบบวิเคราะห์ความผิดปกติ [6], ระบบ IDS ที่ชื่อ INTI ถูกออกแบบมาเพื่อ ตรวจจับและป้องกันการโจมตีแบบหลุมดำ โดยผสานเทคนิคการวิเคราะห์ความผิดปกติเข้ากับวิธีอิงตามข้อกำหนดในการประเมินพฤติกรรมโหนดผ่านตัวชี้วัด ชื่อเสียง (reputation) และความเชื่อถือ (trust) ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยถือว่าโหนดเป็น โหนดที่ดี หากค่าหนึ่งในสองเกิน 0.5 INTI ถูกทดสอบเทียบกับระบบ SVELTE พบว่า มีอัตราการตรวจจับการโจมตีแบบหลุมดำ 92% ในเครือข่ายคงที่ และ 75% ในเครือข่ายเคลื่อนที่มีอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาด และอัตราการตรวจไม่พบที่ต่ำกว่า SVELTE แสดงให้เห็นว่า INTI มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการรับมือกับการโจมตีแบบหลุมดำในเครือข่าย IoT [7]

4. วิธีการทดลองและผลการจำลอง

ในการศึกษานี้ ได้มีการออกแบบและจำลองสถานการณ์ของระบบ Internet of Things (IoT) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการใช้พลังงานของอุปกรณ์ภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีความผิดปกติที่อาจบ่งชี้ถึงการโจมตีจากผู้ไม่หวังดี โดยใช้อุปกรณ์ ESP32 ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มี Wi-Fi ในตัว เหมาะกับงานด้าน IoT และมีการใช้พลังงานที่วัดได้แม่นยำ การทดลองแบ่งออกเป็นสองช่วง

- ช่วงการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างค่าอ้างอิง (baseline)
- ช่วงการจำลองการโจมตี (Anomalous Behavior)

วัตถุประสงค์หลักของการทดลองคือ เพื่อวัดและเปรียบเทียบรูปแบบการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ ESP32 ในสองสภาวะดังกล่าว และศึกษาว่า ค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถใช้เป็นดัชนีเพื่อระบุพฤติกรรมผิดปกติหรือการบุกรุกได้หรือไม่

4.1 การจำลองสถานการณ์

กรณีที่ 1 สถานะปกติ (Normal Operation / Baseline)

อุปกรณ์ ESP32 ถูกตั้งค่าให้ทำงานในสภาวะปกติ โดยอ่านข้อมูลจากเซ็นเซอร์และส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi ไปยังระบบปลายทาง ตามรอบเวลาที่กำหนด (เช่น ทุก 5 วินาที หรือ 5000 ms) อย่างต่อเนื่อง

การวัดค่ากระแสไฟฟ้าจะถูกเก็บในช่วงนี้เพื่อนำมาใช้เป็น ค่าอ้างอิงของพฤติกรรมปกติ (baseline) ค่ากระแสที่วัดได้จะแสดงพฤติกรรมที่มีการทำงานแบบแทรกระหว่าง active (ส่งข้อมูล) กับ idle (พักการทำงาน) ซึ่งมีความสม่ำเสมอและใช้พลังงานต่ำ

กรณีที่ 2 สถานการณ์ผิดปกติ / จำลองการโจมตีแบบ DDoS

เพื่อจำลองพฤติกรรมที่คล้ายกับการถูกโจมตีทางไซเบอร์แบบ Distributed Denial of Service (DDoS) อุปกรณ์ ESP32 ถูกตั้งค่าให้ ส่งข้อมูลด้วยความถี่ 3 ระดับคือ 50 ms, 500 ms และ 1000 ms เพื่อใช้ในการเทียบการทำงาน พฤติกรรมนี้จะทำให้อุปกรณ์ต้องทำงานหนักตลอดเวลา ส่งผลให้ การใช้พลังงานเฉลี่ยและ peak สูงขึ้น

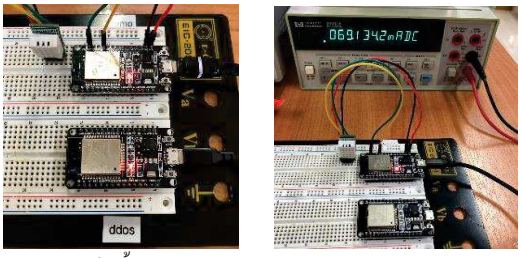
การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจะถูกบันทึกและนำไปเปรียบเทียบกับค่าจากกรณี (baseline) วิเคราะห์ว่าการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบการใช้พลังงาน เพื่อตรวจสอบความผิดปกติ และยืนยันสมมุติฐานว่า พฤติกรรมของอุปกรณ์ที่ถูกโจมตีจะสะท้อนผ่านการใช้พลังงานที่ผิดปกติ

4.2 ผลทดลอง

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการส่งข้อมูลกับการใช้กระแสไฟฟ้า ของอุปกรณ์ ESP32

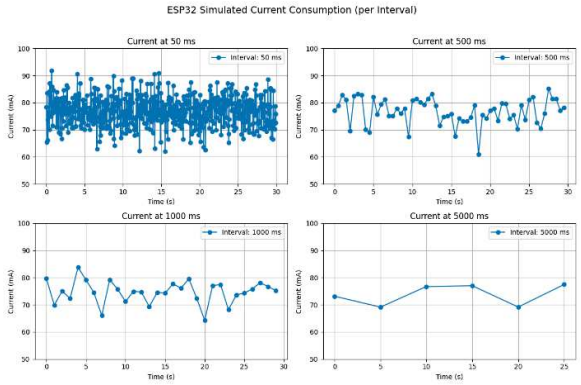
อุปกรณ์ ESP32 ตัวที่	ความถี่การส่งข้อมูล (ms)	ค่ากระแสเฉลี่ย (mA)	ค่ากระแสสูงสุด (mA)	ค่ากระแสต่ำสุด (mA)
1	5000	74.04	76.49	69.13
2	50	76.80	80.16	70.09
	500	76.16	79.24	70.02
	1000	74.98	77.58	69.78

จากตารางที่ 1 พฤติกรรมการใช้งานที่ผิดปกติ (เช่น การส่งข้อมูลถี่เกินไป) จะส่งผลให้ ESP32 ใช้พลังงานมากขึ้นผิดปกติ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อระบุการบุกรุกหรือการโจมตีในระบบ IoT ได้



(ก) ติดตั้งทดลอง (ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 1 การทดสอบการใช้พลังงาน



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ในการส่งข้อมูลกับรูปแบบการใช้พลังงานของอุปกรณ์ ESP32

จากรูปที่ 2 จำลองการใช้กระแสของ ESP32 ที่ส่งข้อมูลด้วยความถี่ต่างกัน พบว่าความถี่ที่สูง 50 ms ทำให้กระแสเฉลี่ยสูงและผันผวนมาก ส่วนความถี่ต่ำ 5000 ms ใช้กระแสน้อยและเสถียร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความถี่ของการส่งข้อมูลส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการใช้พลังงานและสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเพื่อจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ IoT ได้

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการจำลองพฤติกรรมของอุปกรณ์ IoT ภายใต้สถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษารูปแบบการใช้พลังงาน และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจบ่งชี้ถึงการโจมตีไซเบอร์ เช่น Distributed Denial of Service (DDoS) โดยได้กำหนดให้อุปกรณ์ ESP32 ส่งข้อมูลในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในสถานการณ์ปกติและสถานการณ์ที่มีการส่งข้อมูลถี่ผิดปกติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการส่งข้อมูลในความถี่สูงก่อให้เกิดการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับช่วงเวลาปกติ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเบี่ยงเบนของรูปแบบการใช้พลังงานจากค่าพื้นฐาน (baseline)

แม้ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ดำเนินการพัฒนาโมเดลตรวจจับหรือจำแนกความผิดปกติโดยตรง แต่ผลการทดลองสามารถสนับสนุนแนวคิดการใช้พฤติกรรมด้านพลังงานเป็นตัวชี้วัดในการวิเคราะห์หรือพัฒนาระบบตรวจจับการบุกรุกที่ใช้พลังงานเป็นดัชนีหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบ IoT ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ซึ่งต้องอาศัยแนวทางที่ประหยัดพลังงานและมีประสิทธิภาพสูง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Sheikhan, H. Bostani, A hybrid intrusion detection architecture for internet of things, in: 2016 8th (IST), 2016, pp. 601–606.

[2] A. Sforzin, F. Marmol, M. Conti, J. Bohli, Rpids: Raspberry pi ids? A fruitful intrusion detection system for iot, in: Intl IEEE Conferences on (UIC/ATC/ScalCom/CBDCom/IoP/SmartWorld), 2016.

[3] Lee, T.-H., Wen, C.-H., Chang, L.-H., Chiang, H.-S., Hsieh, M.-C., 2014. A lightweight intrusion detection scheme based on energy consumption analysis in 6LowPAN. In: Huang, Y.-M., Chao, H.-C., Deng, D.-J., Park, J.J.J.H. (Eds.), in Electrical Engineering 260. Springer, Netherlands, 1205–1213.

[4] Summerville, D.H., Zach, K.M., Chen, Y., 2015. Ultra-lightweight deep packet anomaly detection for Internet of Things devices. IEEE Proceedings of the 34th (IPCCC), IEEE, pp. 1–8.

[5] Le, A., Loo, J., Luo, Y., Lasebae, A., 2011. Specification-based IDS for securing RPL from topology attacks, In: (WD), 2011 IFIP, pp. 1–3.

[6] S. Raza, L. Wallgren, T. Voigt, Svelte: real-time intrusion detection in the internet of things, Ad Hoc Networks 11 (8) (2013) 2661–2674.

[7] Cervantes, C., Poplade, D., Nogueira, M., Santos, A., 2015. Detection of sinkhole attacks for supporting secure routing on 6LoWPAN for Internet of Things. In: IFIP/ IEEE (IM), pp. 606–611.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในการประจุไฟฟ้าของวาเนเดียมรีดอกซ์โฟล์วแบตเตอรี่

A Study on the Relationship Between Electrolyte Concentration for Charging the VRFB

บรรชา กวีวงษ์พิพัฒน์[1] **บุญยัง ปลั่งกลาง**[1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: bancha_k@mail.rmutt.ac.th, boonyang.p@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับ ความสัมพันธ์ ความเข้มข้นของสารสะลายอิเล็กโตรไลต์เพื่อศึกษาหาแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการประจุไฟฟ้า โดยใช้การวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อประเมินผลกระทบของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของระบบ และลดการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่ก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนหรือออกซิเจน ที่ส่งผลกระทบกับแรงดันในระบบการทำงานทำให้เมนเบรนเกิดความเสียหายและมีอายุการใช้งานที่สั้นลง โดยการควบคุมการประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมสามารถควบคุมและลดการเกิดปฏิกิริยาที่เกิเพื่อยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน และส่วนประกอบอื่นในระบบ วาเนเดียมโฟล์วแบตเตอรี่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบชาร์จให้มีความแม่นยำและมีความปลอดภัย

คำสำคัญ: วาเนเดียมโฟล์วแบตเตอรี่, อิเล็กโตรไลต์, การประจุไฟฟ้า

Abstract

This study investigated the relationship between electrolyte concentration and the determination of the optimal charging voltage in vanadium redox flow batteries (VRFBs). The research used theoretical analysis to evaluate the impact of varying electrolyte concentrations on the charging voltage, aiming to improve the system's efficiency and stability. The study also addressed the reduction of undesirable chemical reactions, such as hydrogen and oxygen gas evolution, which can affect the system's voltage and lead to membrane damage, resulting in a shorter lifespan of the components. Controlling the appropriate charging voltage, it is possible to minimize these side reactions, thereby extending the lifespan of the membrane and other components within the VRFB system. The findings of this study provided valuable information for designing accurate and safe charging systems, contributing to the development of charging control technologies that enhance the safety and reliability.

Keywords: Vanaduim Flow Battery, Electrolizer, Charging

1. บทนำ

การผลิตพลังงานไฟฟ้าหมุนเวียนสามารถสร้างความมั่นคงด้านพลังงานในอนาคต และสร้างผลประโยชน์ด้านเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิต แต่เนื่องจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการใช้งาน ระบบจัดเก็บพลังงานจึงเป็นอีกทางเลือกที่ทำให้การใช้งานพลังงานไฟฟ้ามีความต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพสูง และ วาเนเดี่ยมรีดอกซ์โฟล์วแบตเตอรี่เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีในการ กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมเนื่องจาก อายุการใช้งานที่ยาวนาน และการเพิ่มขนาดการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าทำได้ง่ายไม่มีความซับซ้อนเนื่องจาก ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าและความจุพลังงานไฟฟ้าแยกกัน โดยความจุพลังงานไฟฟ้าจะถูกกำหนดด้วยขนาดของถังอิเล็กโตรไลต์ และขนาดการจ่ายกำลังไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยขนาด ของเมนเบรนและจำนวนของเมนเบรน โดยหลักการทำงานจะใช้การแลกเปลี่ยนโปรตรอนผ่านเมมเบรนระหว่างสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งสารละลายประกอบด้วย วาเนเดี่ยมที่ละลายอยู่ในกรดซัลฟูริค ในสถานะความเป็นไอออนที่ต่างกัน การกักเก็บและจ่ายพลังงาน ในสารละลายอิเล็กโตไลต์ทั้งสองฝั่งที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ตามรูปที่ 1. ทำให้เกิดการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยการแตกตัวของวาเนเดียมในสารละลายกรดซัลฟูริคขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของปริมาณของตัวถูกละลายและตัวทำละลายต้องมีปริมาณที่เหมาะสมทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าและการสถานะชาร์จและดิสชาร์จของโฟล์วแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพและช่วยลดการเกิดตะกอนในระบบการไหลเวียนของโฟล์วแบตเตอรี่[1] ตามรูปที่ 2.

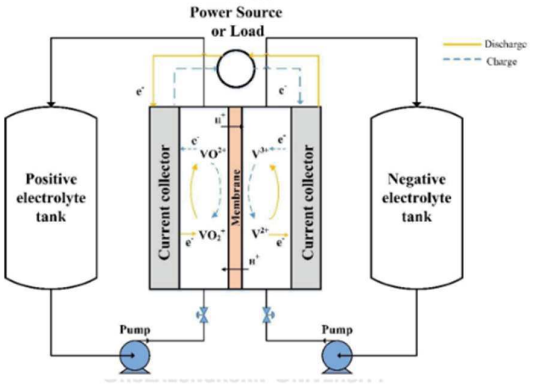
ปฏิกิริยา ครึ่งบวก

$$VO^{2+} + H_2O \underset{\text{discharge}}{\overset{\text{charge}}{\rightleftharpoons}} VO_2^+ + 2H^+ + e^- \qquad E_p^0 = 1.004\ \text{V}$$

ปฏิกิริยา ครึ่งลบ

$$V^{3+} + e^- \underset{\text{discharge}}{\overset{\text{charge}}{\rightleftharpoons}} V^{2+} \qquad E_n^0 = -0.255\ \text{V}$$

รูปที่ 1. การเกิดปฏิกริยารีดอกซ์



รูปที่ 2. การทำงานของวาเนเดี่ยมโฟล์วแบตเตอรี่

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และอุปกรณ์ต่างๆ

2.1 ส่วนประกอบ วาเนเดียมโฟล์วแบตเตอรี่

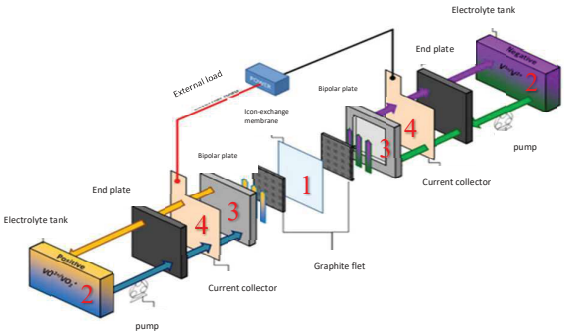
2.1.1 เมนเบรน ทำหน้าที่ยอมให้โปรตอนผ่านได้

2.1.2 อิเล็คโตรไลต์ ทำหน้าที่จัดเก็บหลังงาน

2.1.3 ไบโพลาเพลส ทำหน้าเป็นตัวนำอิเล็กตรอนและกระจายอิเล็กโตรไลต์ให้กับเมนเบรนผ่านทางเยื่อคาร์บอน

2.1.4 อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า

ตามรูปที่ 3.



รูปที่ 3. ส่วนประกอบโฟล์วแบตเตอรี่

2.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลาย สามารถหาได้จากสมการ[2]

มวลโมเลกุล = จำนวนอะตอมในสารประกอบ x น้ำหนักอะตอม

$$\text{โมล} = \frac{\text{มวล}\ (g)}{\text{มวลโมเลกุล}\ \left(\frac{g}{mol}\right)} \qquad (1)$$

$$\text{ความเข้มข้น}\ (\text{mol/L}) = \frac{\text{โมล}}{\text{ปริมาตรสารละลาย}\ (L)} \qquad (2)$$

2.3 ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (cell potential, E_{cell})

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ หาได้จากศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ [3]

$$E_{cell} = E_{red}(\text{reduction}) + E_{ox}(\text{Oxidation})$$
$$E_{cell} = E_{red}(\text{reduction}) + E_{red}(\text{Oxidation})$$
$$E_{red}(\text{half-cell}) = -E_{ox}(\text{half-cell}) \qquad (3)$$

2.4 ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (STD cell Potential, E^0_{cell})

การหาศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานตามสมการ[4]ทำโดยการวัดเทียบกับ SHE ตามรูปที่ 4.

ศักย์รีดักชั่น (E^0_{red}) และศักย์ออกซิเดชั่น (E^0_{ox}) ของครึ่งปฏิกิริยาเดียวกันจะมีค่าเท่ากันแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม[5]

$$E^0_{cell} = E^0_{red}\ (\text{half-cell}) + E^0_{ox}\ (\text{SHE})$$
$$= E^0_{red}\ (\text{half-cell}) \qquad (4)$$

	Reduction Half-Reaction		E° (V)	
Stronger oxidizing agent	$F_2(g) + 2e^-$	$\longrightarrow 2F(aq)$	2.87	Weaker reducing agent
	$H_2O_2(aq) + 2H^+(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow 2H_2O(l)$	1.78	
	$MnO_4^-(aq) + 8H^+(aq) + 5e^-$	$\longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$	1.51	
	$Cl_2(g) + 2e^-$	$\longrightarrow 2Cl^-(aq)$	1.36	
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^-$	$\longrightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$	1.33	
	$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^-$	$\longrightarrow 2H_2O(l)$	1.23	
	$Br_2(l) + 2e^-$	$\longrightarrow 2Br^-(aq)$	1.09	
	$Ag^+(aq) + e^-$	$\longrightarrow Ag(s)$	0.80	
	$Fe^{3+}(aq) + e^-$	$\longrightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77	
	$O_2(g) + 2H^+(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow H_2O_2(aq)$	0.70	
	$I_2(s) + 2e^-$	$\longrightarrow 2I^-(aq)$	0.54	
	$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^-$	$\longrightarrow 4OH^-(aq)$	0.40	
	$Cu^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Cu(s)$	0.34	
	$Sn^{4+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15	
	$2H^+(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow H_2(g)$	0	
	$Pb^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Pb(s)$	−0.13	
	$Ni^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Ni(s)$	−0.26	
	$Cd^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Cd(s)$	−0.40	
	$Fe^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Fe(s)$	−0.45	
	$Zn^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Zn(s)$	−0.76	
	$2H_2O(l) + 2e^-$	$\longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$	−0.83	
	$Al^{3+}(aq) + 3e^-$	$\longrightarrow Al(s)$	−1.66	
	$Mg^{2+}(aq) + 2e^-$	$\longrightarrow Mg(s)$	−2.37	
	$Na^+(aq) + e^-$	$\longrightarrow Na(s)$	−2.71	
Weaker oxidizing agent	$Li^+(aq) + e^-$	$\longrightarrow Li(s)$	−3.04	Stronger reducing agent

รูปที่ 4. ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐาน (SHE)

2.5 ความเข้มข้นและค่าศักย์ของเซลล์

ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์กับค่าศักย์ไฟฟ้า สามารถอธิบายความสัมพันธ์โดยใช้ สมการของเนินสต์[6] [7]

$$E_{\text{cell}} = E^{0}_{\text{cell}} - \frac{RT}{nF}\ln Q = E^{0}_{\text{cell}} - \frac{2.303RT}{nF}\log Q \qquad (5)$$

โดยที่ E = ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ (V)
E^0 = ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ (V)
R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 j/mol-k)
T = อุณหภูมิ (K)
n = จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทระหว่างสองครึ่งเซลล์
F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,485 C/mol)
Q = อัตราส่วนผลคูณความเข้มข้น (Reaction Quotient)

คิดที่ 25°C จะได้

$$E_{\text{cell}} = E^{0}_{\text{cell}} - \frac{0.0257}{n}\ln Q = E^{0}_{\text{cell}} - \frac{0.0592}{n}\log Q$$

$$E_{\text{cell}} = E^{0}_{\text{cell}} - \frac{0.0592}{n}\log Q \qquad (6)$$

3. การกำหนดตัวแปรเพื่อหาค่าแรงดันที่เหมาะสมในการชาร์จ

การกำหนดค่าตัวแปร ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1. กำหนดค่าตัวแปรในหาค่าแรงดัน

ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน	E^{o}	1.26 V
วาเนเดี่ยมเพนทอกซ์ไซด์	V_2O_5	100 กรัม
กรดซัลฟูริค	H_2SO_4	1 ลิตร
น้ำหนักโมเลกุล	V_2O_5	181.88 g/mol
โมล	V_2O_5	0.55 mol
ความเข้มข้น	V_2O_5	0.55 mol/L
ความเข้มข้น	H_2SO_4	2-9 mol/L

3.1 ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ปริมาณสาร V_2O_5

หาน้ำหนักโมเลกุลของ V_2O_5

V = 50.94 g/mol

O = 16.00 g/mol

Mass $_{V2O5}$ = (2 x 50.94) + (5 x 16.00) = 101.88 + 80.00 = 188.88 g/mol

หาจำนวนโมล ของ V_2O_5 จาก 100 กรัม

$$\mathbf{n}_{V2O5} = \frac{100\ \text{g}}{181.88\ \text{g/mol}} = 0.55\ \text{mol}$$

จำนวนอะตอมของ วาเนเดียม = 2 x 0.55 = 1.01 mol

3.2 ขั้นตอนที่ 2 ค่าความต่างศักย์เซลล์

E^{0}_{cell} = 1.00 - (- 0.26) = 1.26 V

แต่ในการใช้งานจริงจะมี overpotential (โดยทั่วไปประมาณ 0.1 - 0.2 V)

แรงดันที่เหมาะสมในการชาร์จ = 1.35 - 1.45 V

3.3 ขั้นตอนที่ 3 ความเข้มข้นของ H_2SO_4

โดยค่าความเข้มข้นของ H_2SO_4 คงที่เท่ากับ 0.55 mol ที่ 100g กำหนดให้ความเข้มข้นของ H_2SO_4 = 2-10 mol

$E = 1.26 - = \frac{0.591}{1}\ log\ (\frac{0.55}{2})$

E = 1.29 V

$E = 1.26 - = \frac{0.591}{1}\ log\ (\frac{0.55}{4})$

E = 1.31 V

$E = 1.26 - = \frac{0.591}{1}\ log\ (\frac{0.55}{6})$

E = 1.32 V

$E = 1.26 - = \frac{0.591}{1}\ log\ (\frac{0.55}{8})$

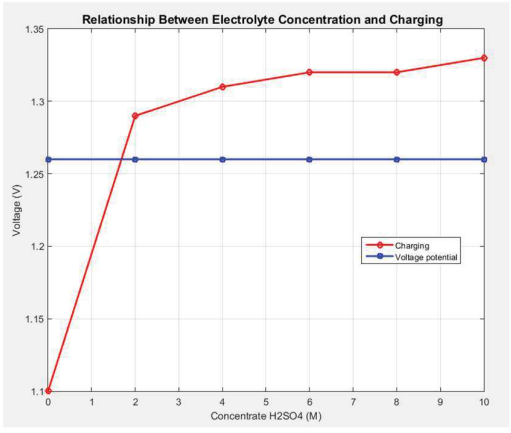
E = 1.32 V

$E = 1.26 - = \frac{0.591}{1}\ log\ (\frac{0.55}{10})$

E = 1.33 V

4. ผลการหาค่าแรงดันที่ใช้ในการชาร์จ

จากการหาค่าความต่างศักย์ของเซลล์ได้ 1.26V และหาค่าความต่างศักย์เซลล์ที่น้ำหนักโมเลกุลของ วาเนเดียมเพนทอกซ์ไซด์ (V_2O_5) คงที่ 181.88 g/mol มีความเข้มข้น 0.55 mol / น้ำหนัก 100g ในสารละลายกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) ที่ความเข้มข้นต่างกันเพื่อแรงดันในการชาร์จที่เหมาะสมเทียบกับค่าความต่างศักย์ของเซลล์ ได้ค่าแรงดันตามรูปที่ 5.



รูปที่ 5. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เทียบกับค่าแรงดันในการชาร์จ

ค่าแรงดันในการชาร์จในความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟูริ (H_2SO_4) ที่ต่างกัน โดยเริ่มพิจารณาความเข้มข้น ตั้งแต่ 2 – 8 mol ซึ่งค่าการชาร์จที่เหมาะสมในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งความเข้มข้นที่สูงต้องใช้แรงดันในการชาร์จที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนสูงและทำให้เกิด side reaction เพิ่มขึ้น แรงดันที่ใช้ในการชาร์จไม่ควรเกินค่าความต่างไฟฟ้าของเซลล์ มากกว่า 0.1-0.2 V แรงดันที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 1.38-1.55 V และในขณะชาร์จแรงดันไม่ควรต่ำกว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ในการใช้งานควรมีการตรวจสอบค่าความเข้มข้นของสารละลาย และแรงดันที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า หรือต้องมีการออกแบบระบบชาร์จให้ควบคุมกระแสและแรงดันในขณะชาร์จเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

4. สรุปผลการวิจัย

ค่าแรงดันที่ในการชาร์จไฟฟ้าวาเนเดียมโฟล์วแบตเตอรี่ ไม่ควรเกินค่า ความต่างศักย์เซลล์มากกว่า 0.2V ค่าแรงดันในการชาร์จที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 1.38-1.55V และในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันจะมีผลต่อแรงดันที่ใช้ในการชาร์จไฟฟ้า การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการใช้งานจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการใช้งานดีขึ้นและยืดอายุการใช้งานของโฟล์วแบตเตอรี่และในสารละลายที่พิจารณาเป็น กรดซัลฟูริค ซึ่งเป็นตัวทำละลายวาเนเดียมเพนทอกซ์ไซด์และสารสามารถเจือจางด้วยน้ำบริสุทธ์ไม่มีสารเจือปนและต้องมีการออกแบบระบบควบคุมการชาร์จให้ควบคุมกระแสและแรงดันในขณะชาร์จ

เอกสารอ้างอิง

[1] Md. Parvez Akter , Yifeng Li ,Jie Bao, Maria Skyllas Kazacos and Muhammed Fazlur Rahman, "Optimal Charging of Vanadium Redox Flow Battery with Time-Varying Input Power, Batteries 2019, 5, 20; doi:10.3390/batteries5010020

[2] Faizur Rahmana , Maria Skyllas-Kazacos "Vanadium redox battery: Positive half-cell electrolyte studie," Journal of Power Sources 189 (2009) 1212–1219, doi:10.1016/j.jpowsour.2008.12.113

[3] Dennis Düerkop , Hartmut Widdecke , Carsten Schilde ,Ulrich Kunz and Achim Schmiemann"Polymer Membranes for All-Vanadium Redox Flow Batteries: A Review" Membranes 2021, 11, 214.https://doi.org/10.3390/membranes11030214

[4] Mani Ulaganathan, Vanchiappan Aravindan, Qingyu Yan, Srinivasan Madhavi,Maria Skyllas-Kazacos, and Tuti Mariana Lim "Recent Advancements in All-Vanadium Redox Flow Batteries" Advanced Materials InterfacesVolume 3, Issue 1 1500309

[5] Lorenz Gubler "Membranes and separators for redox flow batteries" Current Opinion in Electrochemistry Volume 18, December 2019, Pages 31-36

[6] Feiran Wang, Fei Ai, Yi-Chun Lu "Ion selective membrane for redox flow battery, what's next? " Next Energy Volume 1, Issue 3, September 2023, 100053

[7] Abdul Ghani Olabi, Mohamed Adel Allam , Mohammad Ali Abdelkareem , T. D. Deepa ,Abdul Hai Alami , Qaisar Abbas, Ammar Alkhalidi and Enas Taha Sayed , "Redox Flow Batteries: Recent Development in Main Components, Emerging Technologies, Diagnostic Techniques, Large-Scale Applications, and Challenges and Barriers"batteries 2023, 9(8), 409;

.



นายบรรชา กวีวงษ์พิพัฒน์ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขางานวิจัยที่สนใจ ระบบกักเก็บพลังงานแบบวาเนเดียมรีดอกซ์โฟล์วแบตเตอรี่

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเก็บเกี่ยวพลังงานสำหรับอุปกรณ์ต้นทาง

Energy Harvesting for Edge Devices

จีรยุ คณธิดามี[1] และ พฤศยน นินทนาวงศา[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: {Jerayu.k, Prusayon.n}@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) สำหรับอุปกรณ์ต้นทาง (Edge Devices) กำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างระบบพลังงานต่ำที่สามารถพึ่งพาตนเองได้ สำหรับการใช้งานในอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), เทคโนโลยีแบบสวมใส่ (Wearable Technologies) และการตรวจวัดระยะไกล (Remote Sensing Applications) อุปกรณ์เหล่านี้มักทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านพลังงาน โดยต้องพึ่งพาแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานจำกัด การเก็บเกี่ยวพลังงานเข้ามาแก้ไขปัญหานี้ โดยการดึงพลังงานจากแหล่งพลังงานโดยรอบ เช่น แสงอาทิตย์, ความต่างของอุณหภูมิ, การสั่นสะเทือน, และคลื่นความถี่วิทยุ (RF) และแปลงให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้ บทความนี้ให้ภาพรวมของเทคโนโลยีและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการเก็บเกี่ยวพลังงาน รวมถึงความก้าวหน้าใน เซลล์แสงอาทิตย์, วัสดุเพียโซอิเล็กทริก, วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก และ วิธีการการจัดเก็บพลังงาน ยังมีการกล่าวถึงประเด็นสำคัญในการออกแบบ เช่น การจัดการพลังงาน, การเพิ่มประสิทธิภาพ และ ความเข้ากันได้กับการประมวลผลที่อุปกรณ์ต้นทาง นอกจากนี้การผนวกการเก็บเกี่ยวพลังงานเข้ากับแนวโน้มใหม่ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ที่อุปกรณ์ต้นทาง, โปรโตคอลการสื่อสารพลังงานต่ำ ยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีนี้ในการปฏิวัติการใช้งานอุปกรณ์ต้นทางอัตโนมัติ, ขยายขนาดได้, และยั่งยืน

คำสำคัญ: การเก็บเกี่ยวพลังงาน, อุปกรณ์ต้นทาง, IoT

Abstract

Energy harvesting for edge devices is a rapidly evolving field aimed at enabling self-sustaining, low-power systems for the Internet of Things (IoT), wearable technologies, and remote sensing applications. Edge devices often operate in energy constrained environments, relying on batteries with limited lifespans or requiring frequent maintenance. Energy harvesting addresses this challenge by capturing energy from ambient sources such as solar radiation, thermal gradients, vibrations, and radio frequency (RF) waves, converting it into usable electrical power. This paper provides an overview of the technologies and materials used in energy harvesting, including advancements in photovoltaic cells, piezoelectric and thermoelectric materials, and energy storage solutions. Key design considerations such as power management, efficiency optimization, and compatibility with edge computing architectures are also discussed. The integration of energy harvesting with emerging trends like artificial intelligence at the edge and low-power communication protocols highlights its potential to revolutionize the deployment of autonomous, scalable, and sustainable edge networks.

Keywords— Energy Harvesting, Edge Devices, IOT

1. บทนำ

เมื่อโลกเชื่อมโยงถึงกันมากขึ้น ระบบการประมวลผลที่ต้นทาง (Edge Computing) ได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญในการรองรับความต้องการที่เพิ่มขึ้นของ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), เมืองอัจฉริยะ (Smart Cities) และระบบกระจายอื่นๆ อุปกรณ์ต้นทาง เช่น เซ็นเซอร์, เทคโนโลยีแบบสวมใส่และอุปกรณ์พกพา มักถูกนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถเข้าถึงแหล่งพลังงานที่เชื่อถือได้ อุปกรณ์เหล่านี้ต้องพึ่งพาแบตเตอรี่ ซึ่งอาจจำเป็นต้องได้รับการบำรุงรักษาหรือเปลี่ยนใหม่บ่อยครั้ง ทำให้เกิดต้นทุนในการดำเนินงานเพิ่มขึ้นและลดความยั่งยืนในระยะยาว

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) คือการแปลงพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เช่น แสงอาทิตย์ ความร้อน แรงสั่นสะเทือน และคลื่น RF ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ช่วยลดการพึ่งพาแบตเตอรี่หรือแหล่งพลังงานภายนอก แม้จะยังมีข้อท้าทายเรื่องประสิทธิภาพ แต่เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาระบบอัตโนมัติที่พึ่งพาตนเองในอนาคต

บทความนี้เสนอระบบเก็บเกี่ยวพลังงานแบบไฮบริดที่รวมพลังงานแสงอาทิตย์ เพียโซอิเล็กทริก เทอร์โมอิเล็กทริก และคลื่น RF เข้ากับระบบจัดการพลังงานขั้นสูง คาดว่าผลการทดลองจะช่วยขับเคลื่อนอุปกรณ์ IoT ในสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้สามารถใช้งานได้อย่างยั่งยืน ลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานแบบเดิม และลดการบำรุงรักษาในระยะยาว

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเก็บเกี่ยวพลังงานในระบบ IoT

การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) หรือที่เรียกอีกชื่อว่า การแสวงหาพลังงาน (Energy Scavenging) คือกระบวนการในการดึงพลังงานจากแหล่งภายนอก พลังงานนี้มักถูกเรียกว่า "พลังงานโดยรอบ (Ambient Energy)" เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติในสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้งานได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

หน้าที่หลักของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานคือการแปลงพลังงานโดยรอบที่เก็บมาได้นี้ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้ใช้งาน, โหนดเซ็นเซอร์ไร้สาย, ไบโอเซ็นเซอร์ที่ฝังในร่างกาย, อุปกรณ์ทางทหาร และอื่น ๆ แหล่งพลังงานที่สามารถใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานมีหลายประเภท เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งในร่มและกลางแจ้ง [1], พลังงานความร้อน [2], พลังงานจากคลื่นวิทยุ (RF) [3][4], พลังงานจลน์ (การเคลื่อนไหวหรือการสั่นสะเทือน) [5] การเก็บเกี่ยวพลังงานโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่เฉพาะกับแอปพลิเคชัน – ทำหน้าที่เก็บและแปลงพลังงานโดยรอบให้เป็นไฟฟ้า วงจรอินเทอร์เฟซ (Interface Circuit) – ใช้ในการดึงพลังงานจากหน่วยเก็บเกี่ยวพลังงานให้ได้มากที่สุด และปรับให้เข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้งาน เช่น การปรับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation) หรือการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นตรง (Rectification), ตัวรับโหลด (Load)

หน่วยจัดเก็บพลังงาน มักถูกนำมาใช้ร่วมด้วย เพื่อช่วยให้การเริ่มต้นระบบราบรื่น และป้องกันปัญหาพลังงานหมด โดยเฉพาะในพื้นที่ห่างไกลหรือเข้าถึงไม่สะดวกในการบำรุงรักษาแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอ วิธีการนี้ช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ และลดการพึ่งพาแบตเตอรี่ บทความยังได้กล่าวถึงปัจจัยสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นของเทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงานในระบบ IoT ซึ่งตารางที่ 1 แสดงศักยภาพของแหล่งพลังงานแต่ละประเภท

ตารางที่ 1 ศักยภาพของการเก็บเกี่ยวพลังงาน

พลังงานในการเก็บเกี่ยว	ความหนาแน่นของพลังงาน
คลื่นความถี่วิทยุ	0.1 μW/cm^2 (GSM) 1 μW/cm^2 (WiFi)
พลังงานความร้อน	25 μW/cm^2 (ร่างกายมนุษย์) 10 mW/cm^2 (อุตสาหกรรม)
แสงจากสิ่งแวดล้อม	10 μW/cm^2 (ภายในอาคาร) 10 mW/cm^2 (ภายนอกอาคาร)
พลังงานกล	4 μW/cm^2 (การเคลื่อนไหว) 100 μW/cm^2 (การสั่นสะเทือน)

2.2 อุปกรณ์ต้นทาง (Edge Devices)

การติดตั้งระบบ IoT ในพื้นที่ห่างไกล จำเป็นต้องพึ่งพาการทำงานระยะยาวโดยไม่ต้องดูแล ซึ่งความท้าทายที่สำคัญคือการจัดหาพลังงานอย่างต่อเนื่องและประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน การเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting) ช่วยให้สามารถชาร์จพลังงานเข้าสู่อุปกรณ์จัดเก็บได้ ณ จุดใช้งานโดยตรง ทำให้โหนดเซ็นเซอร์สามารถทำงานได้ต่อเนื่องโดยไม่หยุดชะงัก โดยทั่วไปแล้วผู้ให้บริการจะใช้อุปกรณ์ต้นทางเป็นจุดเข้าออกของเครือข่าย หน้าที่หลักของอุปกรณ์ต้นทางได้แก่ การประมวลผลข้อมูล, การกรองข้อมูล, การแปลหรือปรับข้อมูล, การจัดเก็บข้อมูล, การส่งและการกำหนดเส้นทางของข้อมูลภายในเครือข่ายเพื่อให้ระบบ IoT สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์ต้นทางที่พบได้บ่อยที่สุดคือ Edge Router ซึ่งทำหน้าที่เป็นประตูเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายต่าง ๆ โดยเฉพาะระหว่างเครือข่ายภายในองค์กร (WAN) และยังมี ไฟร์วอลล์ (Firewalls) ทำหน้าที่กรองข้อมูลที่ผ่านเข้าออกระหว่างเครือข่ายภายในและภายนอก อุปกรณ์ต้นทางอื่น ๆ เช่น เซ็นเซอร์, แอคชูเอเตอร์ (Actuators) และ อุปกรณ์รับ-ส่งข้อมูล ต่างก็ทำหน้าที่ในฐานะอุปกรณ์ต้นทางเช่นกัน เมื่อมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IoT จำนวนมากเข้าในระบบเดียว อุปกรณ์ต้นทางจะช่วยจัดการการทำงานแบบกระจายผ่านโปรโตคอล เช่น DNS, DHCP ในระบบ Cloud Computing ข้อมูลถูกรวบรวมจากอุปกรณ์ที่อยู่รอบนอกสุดแล้วส่งต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ศูนย์กลางเพื่อประมวลผลต่อ เหตุผลมาจากข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่อยู่ใกล้ต้นทางของเครือข่ายมักมีความสามารถจำกัดในด้านฟังก์ชัน การใช้พลังงาน และความจุของหน่วยความจำ ทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นไม่สามารถประมวลผลข้อมูลได้

ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการย่อขนาดและการผลิตอุปกรณ์ IoT สมัยใหม่จึงสามารถจัดการข้อมูลจำนวนมากได้ ซึ่งช่วยให้ระบบเครือข่ายทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุปกรณ์ต้นทางสามารถเก็บและประมวลผลข้อมูลได้ทันที ดังนั้น Edge Computing ช่วยให้สามารถประมวลผลข้อมูลได้ ณ จุดที่ข้อมูลนั้นถูกสร้างขึ้น แทนที่จะต้องส่งไปยังศูนย์ข้อมูลกลาง ส่งผลให้เวลาตอบสนองลดลงอย่างมาก

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้พลังงานของอุปกรณ์ IoT

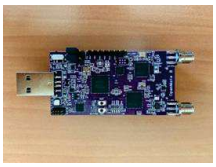
อุปกรณ์ IoT	การใช้พลังงาน
นาฬิกา	1 μW
RFID	10 μW
เซนเซอร์ /รีโมต	100 μW
เซนเซอร์ไร้สาย	1 mW
ตัวส่งสัญญาณ (Bluetooth)	10 mW
โมดูล GPS	100 mW

ข้อดีของการประมวลผลที่ต้นทางในระบบ IoT สามารถสรุปได้ดังนี้

- ช่วยลดการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ลดความเสี่ยงข้อมูลรั่วไหล
- ลดความหน่วง (Latency)
- การประมวลผลแบบกระจายช่วยเพิ่มความปลอดภัย

2.2.1 อุปกรณ์ต้นทางระดับล่าง (Low-end Edge Devices)

เป็นอุปกรณ์ที่อยู่บริเวณต้นทางของเครือข่าย โดยทั่วไปจะมีการประมวลผลต่ำมาก อุปกรณ์เหล่านี้มักเชื่อมต่อกับแอคชูเอเตอร์ และเซนเซอร์ แต่ด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากร จึงไม่สามารถใช้งานระบบปฏิบัติการภายในได้ และต้องใช้เฟิร์มแวร์ในการโปรแกรมแทน ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้คือ OpenMote-B (รูปที่ 1) ถูกนำไปใช้ในแอปพลิเคชันของ IoT ที่ต้องการความประหยัดและประสิทธิภาพต่ำ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ต้นทางระดับล่าง (OpenMote-B)

2.2.2 อุปกรณ์ต้นทางระดับกลาง (Middle-end Edge Devices)

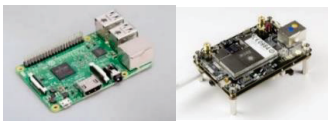
อุปกรณ์ต้นทางระดับกลาง มีคุณสมบัติที่สมดุลระหว่างการประมวลผล และการใช้พลังงานต่ำ มีหน่วยความจำมากกว่า 250 kB ความเร็วของหน่วยประมวลผล (CPU) ประมาณ 100 MHz และมักใช้โปรเซสเซอร์แบบคอร์เดียว (Single-core) เหมาะสำหรับงานเชื่อมต่อกับเซนเซอร์หลายประเภท และการคำนวณทางคณิตศาสตร์พื้นฐาน ตัวอย่างได้แก่ Arduino Yun, Net Duino ทั้งสองถูกนำไปใช้งานจริงในด้าน IoT

- Arduino Yun ใช้หน่วยประมวลผล ATmega32u4 และ Atheros AR9331 แสดงอยู่ใน รูปที่ 2(ก)
- ESP8266 หน่วยประมวลผล 32 บิต ทำงานที่ความถี่ 80 MHz ความจำแฟลช 1 MB และรองรับ Wi-Fi แสดงใน รูปที่ 2(ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 2 อุปกรณ์ต้นทางระดับกลาง (ก) Arduino Yun (ข) ESP8266



(ก) (ข)

รูปที่ 3 อุปกรณ์ต้นทางระดับสูง
(ก) Raspberry Pi 3 (ข) Samsung ARTIK 710

2.2.3 อุปกรณ์ต้นทางระดับสูง (High-end Edge Devices)

อุปกรณ์ต้นทางระดับสูงมักถูกพัฒนาในรูปแบบของคอมพิวเตอร์บอร์ดเดี่ยว อุปกรณ์เหล่านี้มักถูกใช้ในการประมวลผลอัลกอริธึมแมชชีนเลิร์นนิง (Machine Learning) ที่ซับซ้อนที่ต้นทางของเครือข่าย ซึ่งสามารถดำเนินการประมวลผลขั้นสูงไม่ต้องพึ่งพาเซิร์ฟเวอร์คลาวด์ ตัวอย่างของอุปกรณ์ต้นทางระดับสูง

- Raspberry Pi 3 หน่วยประมวลผล Cortex-A53 64 บิต และหน่วยความจำ SDRAM ขนาด 1GB แสดงใน รูปที่ 3(ก)
- Samsung ARTIK 710 หน่วยประมวลผล ARM Cortex-A53, หน่วยความจำ RAM 1GB, และความจำแฟลช 4GB แสดงใน รูปที่ 3(ข)

3. เทคโนโลยีการเก็บเกี่ยวพลังงาน

3.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy)

พลังงานแสงอาทิตย์ สามารถผลิตพลังงานได้ในระดับสูงและประสิทธิภาพที่ดี โดยเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic หรือ PV) มักทำจากวัสดุกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน มีหน้าที่จับแสงแดดและแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงในพื้นที่ที่มีแสงแดดแรงและสม่ำเสมอ เซลล์ PV ถือเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการใช้งานภายในอาคาร วงจรติดตามจุดพลังงานสูงสุด จะเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานเข้าสู่แบตเตอรี่แบบชาร์จซ้ำได้ เซลล์แสงอาทิตย์มีต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำและแสงอาทิตย์ยังคงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด

3.2 พลังงานความร้อน (Thermal Energy)

พลังงานความร้อน คือพลังงานที่ได้จากความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของอุณหภูมิ มี 2 เทคนิคหลักที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อน เทคนิคเทอร์โมอิเล็กทริก แปลงความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่าน Seebeck Effect ประสิทธิภาพของการเก็บเกี่ยวพลังงานแบบนี้อยู่ในช่วง 5–8% เทคนิคไพโรอิเล็กทริก สร้างพลังงานไฟฟ้าเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยใช้ผลึกไพโรอิเล็กทริกที่ผลิตแรงดันไฟฟ้าเมื่อถูกทำให้ร้อนหรือเย็น ไพโรอิเล็กทริก จะสร้างแรงดันแบบชั่วคราว เทอร์โมอิเล็กทริกจะสร้างแรงดันถาวร

3.3 พลังงานกล (Mechanical Energy)

พลังงานกลคือพลังงานที่วัตถุมีการเคลื่อนไหว โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท พลังงานจลน์ มาจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ พลังงานศักย์ มาจากพลังงานที่สะสมอยู่ในวัตถุ เช่น การเคลื่อนไหว การสั่นสะเทือน กิจกรรมของมนุษย์ เทคนิคที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานกล ได้แก่ เพียโซอิเล็กทริก แปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยวัสดุพิเศษ อิเล็กโทรสแตติก ใช้การเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุที่ขึ้นอยู่กับการสั่นแม่เหล็กไฟฟ้า ใช้หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าในการสร้างพลังงานแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกและอิเล็กโทรสแตติก

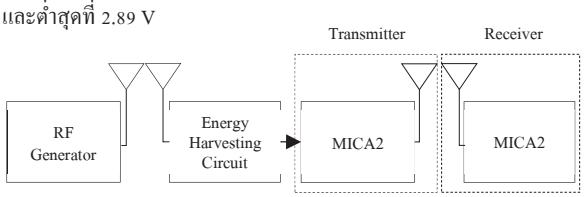
3.4 พลังงานจากคลื่นวิทยุ (RF Energy)

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นวิทยุเป็นทางออกที่น่าสนใจสำหรับการจัดหาพลังงานให้กับโหนดเซนเซอร์ไร้สาย โดยเซนเซอร์สามารถชาร์จตัวเก็บพลังงานด้วยพลังงานจากคลื่นวิทยุ ที่ตกกระทบ ความท้าทายหลักของคลื่นวิทยุ คือการสูญเสียพลังงานในอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณเดินทางในระยะไกล พลังงานที่ได้รับจะลดลงตามระยะทาง ดังนั้นการออกแบบวงจรต้องให้ความสำคัญกับความไวของการรับสัญญาณ พลังงานจากคลื่นวิทยุ ที่ได้รับจะถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ วงจรคูณแรงดัน (Voltage Multiplier) ขณะที่ วงจรแมตชิ่ง (Matching Network) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งพลังงานจากเสาอากาศไปยังวงจรแปลงพลังงาน หน่วยเก็บพลังงานจะช่วยจ่ายพลังงานอย่างต่อเนื่องให้กับโหลด และทำหน้าที่เป็นแหล่งสำรอง

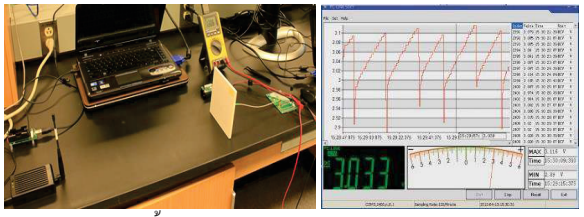
4. ผลการทดลอง

การทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยคลื่นวิทยุ ระบบเริ่มจากการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF Signal) ด้วยชุดส่งสัญญาณคลื่นวิทยุ ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศขนาดเล็ก โดยคลื่นวิทยุที่ส่งออกมาจะถูกสายอากาศรับสัญญาณ (Patch Antenna) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานจากคลื่นวิทยุ ส่งเข้าสู่วงจรเก็บเกี่ยวพลังงาน [3] วงจรนี้มีหน้าที่แปลงสัญญาณที่รับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง พลังงานไฟฟ้าที่ได้นี้จะถูกจ่ายให้กับอุปกรณ์ไมโครเซ็นเซอร์ไร้สาย (MICA2) เพื่อใช้ขับเคลื่อนการทำงาน การส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านโปรโตคอล TinyOS ไปยังคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเพื่อแสดงผล ซึ่งแสดงการทำงานทั้งหมดของระบบใน รูปที่ 4

การติดตั้งการทดลองจริงแสดงใน รูปที่ 5 (ก) และ ผลการทดลองที่วัดได้แสดงใน รูปที่ 5 (ข) โดยผลการทดลองที่วัดได้แสดงเป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา ซึ่งกราฟจากการทดลองมีการเก็บพลังงานโดยเริ่มเก็บแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 2.89 V เพิ่มขึ้นแบบขั้นบันได เกิดจากพลังงานไฟฟ้าที่แปลงจากคลื่นวิทยุ ถูกสะสมไว้ในอุปกรณ์เก็บประจุ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) แรงดันไฟฟ้าจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่คลื่นวิทยุ ถูกส่งเข้ามาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ลักษณะของแรงดันที่วัดได้เมื่อพล็อตกราฟออกมาจะเป็นรูปทรงฟันเลื่อย (Sawtooth Pattern) ซึ่งแสดงถึงการสะสมพลังงานแบบเป็นช่วง (Stepwise accumulation) โดยพลังงานจะยังไม่ถูกนำไปใช้งานทันทีในระหว่างที่ยังอยู่ในระดับต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ปลายทาง (MICA2) เกิดความไม่เสถียรจากพลังงานไม่เพียงพอ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่สะสมได้ถึงระดับแรงดันขั้นต่ำที่สามารถทำให้อุปกรณ์ปลายทางเริ่มทำงานได้อย่างปลอดภัย จากการทดลองจะอยู่ที่ประมาณ 3 V เป็นต้นไป จากนั้นวงจรควบคุมพลังงานหรือแรงดันจะปล่อยพลังงานให้กับอุปกรณ์ (MICA2) เพื่อให้ระบบทำการส่งข้อมูลแบบไร้สาย จากการทดลองเซ็นเซอร์สามารถส่งข้อมูลกลับมายังคอมพิวเตอร์แม่ข่ายได้อย่างต่อเนื่องและข้อมูลที่ส่งมาก็สามารถแสดงผลได้อย่างครบถ้วน โดยหลักการนี้ถือเป็นการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์จะทำงานในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่เกิดอาการรีเซ็ตหรือหยุดทำงานกลางคัน ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในระบบ IoT ที่ต้องการแหล่งพลังงานจากสิ่งแวดล้อม วงจรเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยคลื่นวิทยุสามารถเก็บแรงดันไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง 3.116 V และต่ำสุดที่ 2.89 V



รูปที่ 4 ระบบการทดสอบ การเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยคลื่นวิทยุ



(ก) การติดตั้งการทดลอง (ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 5 การทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยคลื่นวิทยุ

5. สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองยืนยันว่า การเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นวิทยุเป็นวิธีที่มีศักยภาพสูงในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ IoT หรือเซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้พลังงานต่ำ โดยลดความจำเป็นในการเปลี่ยนแบตเตอรี่หรือพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอกอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ระบบมีเสถียรภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] A Sudevalayam, S. and Kulkarni, P. (2011). Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 13(3), 443-461.

[2] Hoang, D.C.; Tan, Y.K.; Chng, H.B.; Panda, S.K. Thermal energy harvesting from human warmth for wireless body area network in medical healthcare system. In Proceedings of the 2009 International conference on power electronics and drive systems (PEDS), Taipei, Taiwan, 2–5 November 2009; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2009; pp. 1277–1282.

[3] P. Nintanavongsa, U. Muncuk, D. R. Lewis, and K. R. Chowdhury, Design Optiization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, Mar. 2012.

[4] P. Nintanavongsa, M.Y. Naderi, and K. R. Chowdhury, Medium Access Control Protocol Design for Sensors Powered by Wireless Energy Transfer. Proc. of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), pp. 150–154 , April 2013.

[5] Atallah, R., Khabbaz, M., & Assi, C. (2016). Energy harvesting in vehicular networks: a contemporary survey. IEEE Wireless Communications, 23(2), 70-77.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียวและสองหน้าสำหรับการติดตั้งหลายรูปแบบ

Power Generation of Monofacial and Bifacial Solar Panels for Various Installation Patterns

นพณัฐ จิตกรียาน[1] ชวลิต ทองดี[1] ภัคจิรา กำเนิดเขว้า[1] ขวัญชีวา กันทะสาร[1] อดิศร พลเสนา[1] รุ่งเพชร ก่องนอก[1]
วุฒิชัย สง่างาม[1] ยุทธณา คงจีน[1] กฤติเดช บัวใหญ่[1] กาณฑ์ เกิดชื่น[1*]
[1]หน่วยวิจัยไฟฟ้าและพลังงานอัจฉริยะ (IPER) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail: kaan.ke@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์เป็นสิ่งสำคัญต่อผู้ใช้งานจำนวนมาก บทความนี้นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าระหว่างแผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียว (Monofacial) และแบบสองหน้า (Bifacial) โปรแกรม PVsyst© ใช้จำลองระบบโซลาร์เซลล์โดยแบ่งรูปแบบการติดตั้งเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ การติดตั้งบนดาดฟ้า (Rooftop) หลังคาหน้าจั่ว (Gable Roof) และแบบลอยน้ำ (Floating) ฐานข้อมูล Meteonorm 8.1 ใช้จำลองข้อมูลสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา ผลการจำลองพบว่าแผงแบบสองหน้าให้ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานสูงกว่าแผงแบบหน้าเดียวในทุกรูปแบบการติดตั้ง การติดตั้งโซลาร์เซลล์แบบสองหน้าบนดาดฟ้ามีค่าการผลิตพลังงานสูงสุดที่ 13,280 kWh/ปี สมรรถนะของระบบ (Performance Ratio, PR) เฉลี่ยสูงสุดที่ 76.78% และระยะเวลาการคืนทุน 7 ปี 2 เดือน ดังนั้นการเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์และลักษณะการติดตั้งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และระยะเวลาในการคืนทุน ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการวางแผนและตัดสินใจ

คำสำคัญ: การผลิตพลังงานไฟฟ้า, โซลาร์เซลล์, แผงโซลาร์เซลล์แบบสองหน้า, สมรรถนะของระบบ

Abstract

Choosing a solar panel remains essential to many users. This paper presents a comparison of the power generation efficiency between monofacial and bifacial solar panels. PVsyst© program was used to simulate solar cell systems by dividing the installation patterns into 3 types: rooftop, gable roof, and floating. The Meteonorm 8.1 database was used to model climate data of the study area. The simulation results show that bifacial panels provide higher power generation efficiency than monofacial panels in all installation configurations. Installing bifacial solar cells on the rooftop has the highest power generation value at 13,280 kWh/year. The highest average performance ratio (PR) at 76.78%, and the payback period is 7 years and 2 months. Therefore, the selection of solar panels and installation patterns affects the system efficiency and payback period, which need to be planned and decided.

Keywords: Power generation, solar cells, bifacial solar panels, performance ratio

1. บทนำ

ในปัจจุบันการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าในอาคาร โดยแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งานส่วนใหญ่เป็นแบบโมโนคริสตัลไลน์ ซึ่งมีทั้งชนิดหน้าเดียว (Monofacial) และชนิดสองหน้า (Bifacial) อย่างไรก็ตาม การเลือกประเภทแผงที่เหมาะสมกับการใช้งานยังคงเป็นคำถามสำคัญของผู้ใช้งานจำนวนมาก เนื่องจากต้องพิจารณาทั้งด้านประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ความคุ้มค่าด้านการลงทุน และรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน

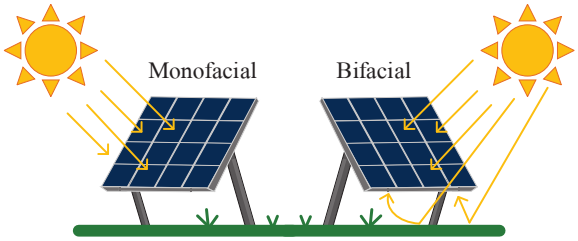
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีหลายงานวิจัยที่มุ่งเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์แต่ละชนิด อาทิเช่น การเปรียบเทียบแผงโซลาร์เซลล์ประเภทที่แตกต่างกัน คือ เซลล์แบบผลึกซิลิคอนเชิงเดี่ยว (Monocrystalline) และเซลล์แบบผลึกรวม (Polycrystalline) โดยวิเคราะห์คุณสมบัติและตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้า [1] ขณะที่การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบการออกแบบระบบโซลาร์เซลล์ระหว่างแผงแบบหน้าเดียว (Monofacial) และแบบสองหน้า (Bifacial) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองผลในการประเมินความสามารถในการผลิตพลังงาน [2] และการศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลการจำลองและผลจากการตรวจวัดหน้างานจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยการใช้ข้อมูล และองค์ประกอบต่าง ๆ แบบเดียวกัน [3] อย่างไรก็ตาม การเปรียบเทียบชนิดของแผงเพียงอย่างเดียว แต่ขาดการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับผลกระทบจากรูปแบบการติดตั้งที่

หลากหลาย ซึ่งส่งผลต่อปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมและความเหมาะสมในการเลือกใช้งานระบบโซลาร์เซลล์ยังเป็นสิ่งที่สำคัญและจำเป็น

บทความนี้จึงมุ่งนำเสนอการจำลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียวและแบบสองหน้า ในรูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน ได้แก่ การติดตั้งบนดาดฟ้า (Rooftop) บนหลังคาหน้าจั่ว (Gable roof) และบนผิวน้ำ (Floating) โดยใช้โปรแกรม PVsyst© ที่ได้รับการยอมรับทั้งในวงการวิชาการและเชิงพาณิชย์ ซึ่งมุ่งศึกษาผลกระทบของลักษณะการติดตั้งที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนและตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและบริบทการใช้งานที่หลากหลายในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียว (Monofacial) และแบบสองหน้า (Bifacial) มีหลักการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ที่คล้ายกัน แต่ต่างกันที่แผงแบบหน้าเดียวสามารถรับแสงได้เฉพาะด้านหน้า ขณะที่แผงแบบสองหน้าสามารถรับแสงได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งช่วยเพิ่มการผลิตไฟฟ้าได้มากขึ้นประมาณ 5-20% ขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อน (Albedo) ของพื้นและลักษณะการติดตั้ง [4] โดยแผงแบบสองหน้าจะเหมาะกับพื้นที่โล่ง อาทิเช่น Solar Farm ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางด้านหลัง ในขณะที่แผงแบบหน้าเดียวเหมาะกับการติดตั้งทั่วไปบนหลังคาบ้านหรืออาคาร เนื่องจากมีราคาถูกกว่าและติดตั้งง่ายกว่า



รูปที่ 1 แผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียวและแบบสองหน้า

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ในระบบโซลาร์เซลล์พิจารณาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ ระยะเวลาการรับแสงแดด กำลังไฟฟ้าของระบบที่สภาวะมาตรฐานของผู้ผลิต และประสิทธิภาพรวมของระบบซึ่งเปลี่ยนแปลงจากการสูญเสียจากอุณหภูมิ อินเวอร์เตอร์ สายไฟ ฯลฯ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ดังนี้ [5]

$$E_{AC} = G_{eff} \times P_{nom} \times \eta_{total} \times t \quad (1)$$

เมื่อ E_{AC} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh) G_{eff} คือ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ (kWh/m²) P_{nom} คือ กำลังไฟฟ้าของระบบ (kWp) η_{total} คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบ และ t คือ เวลารับแสง (ชั่วโมง)

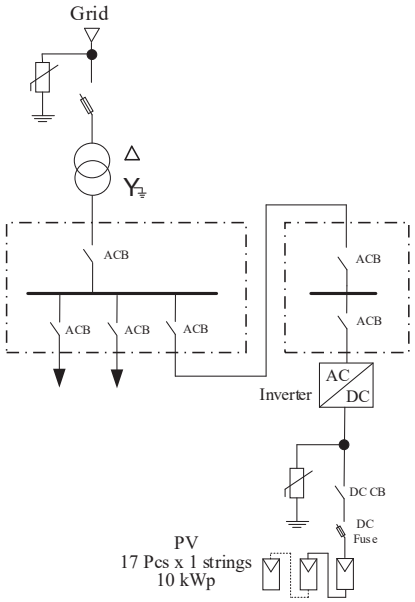
สัดส่วนระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงและพลังงานที่ควรจะผลิตได้ในสภาวะอุดมคติ หรือ Performance Ratio (PR) คือตัวชี้วัดที่นิยมใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยไม่ขึ้นกับพลังงานที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ทั้งหมดในแต่ละวันหรือฤดูกาล [6] นำเสนอดังสมการที่ (2) ดังนี้

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (2)$$

เมื่อ Y_f คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบ และ Y_r คือ พลังงานในสภาวะอุดมคติจากรังสีของดวงอาทิตย์

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบของบทความนี้จะจำลองระบบโซลาร์เซลล์ขนาด 10 kWp ด้วยโปรแกรม PVSyst© 6.8.0 เลือกใช้แผง Jinko Solar ขนาด 580 Wp แบบโมโนคริสตัลไลน์ โดยในระบบแผงหน้าเดียว (Monofacial) ใช้รุ่น JKM580N-7HL4-60V ในขณะที่ระบบแผงสองหน้า (Bifacial) ใช้รุ่น JKM580N-7HL4-BDV ซึ่งทั้งสองแบบใช้จำนวน 17 แผงต่อหนึ่ง String เชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์ Huawei ขนาด 10 kW รุ่น SUN2000-10KTL-M1-400V และใช้สถานที่การจำลองการทดสอบบริเวณภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา สามารถนำเสนอวงจรการจำลองการติดตั้งดังรูปที่ 2 ดังนี้



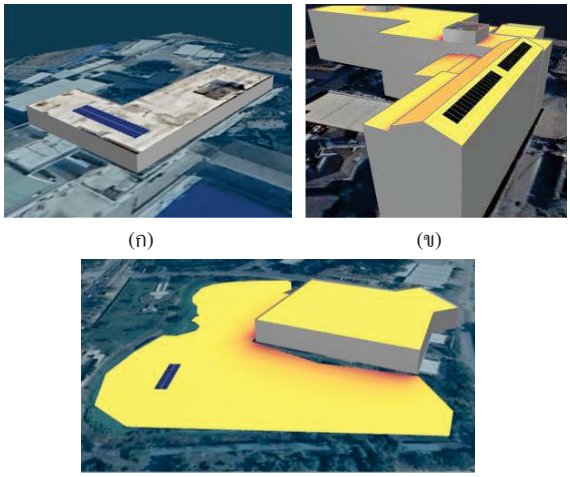
รูปที่ 2 Single-line diagram

ลักษณะการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 3 รูปแบบถูกกำหนดให้หันหน้าไปยังทิศใต้นำเสนอดังรูปที่ 3 คือการติดตั้งบนดาดฟ้า (Rooftop) ซึ่งแผงโซลาร์เซลล์จะวางราบบนหลังคาอาคาร การติดตั้งบนหลังคาทรงหน้าจั่ว (Gable roof) ซึ่งมักติดตามมุมเอียงของหลังคา หรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสงอาทิตย์ และการติดตั้งแบบลอยน้ำ (Floating) ซึ่งติดตั้งบนผิวน้ำใกล้อาคารซึ่งความแตกต่างของวัสดุพื้นผิวจะส่งผลต่อค่าการสะท้อน (Albedo) [7] ของรังสีดวงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามการจำลองด้วยโปรแกรม PVSyst© เลือกใช้ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์และ

ภูมิอากาศจาก Meteonorm 8.1 แต่ใช้การพิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับการลงทุนจากบัญชีราคามาตรฐานครุภัณฑ์ ฉบับ เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ในขณะที่การผลิตพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) ซึ่งพิจารณาค่าไฟฟ้าช่วงความต้องการไฟฟ้าสูง-ต่ำ (On-Off Peak) 4.60 และ 2.60 บาท อย่างไรก็ตามจากการสำรวจพื้นที่ศึกษาสามารถกำหนดพารามิเตอร์การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละรูปแบบนำเสนอได้ดังตารางที่ 1 ดังนี้:

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ในแต่ละรูปแบบ

ตำแหน่งติดตั้ง		**ดาดฟ้า**	**หลังคาหน้าจั่ว**	**ผิวน้ำ**
ระดับความสูง (เมตร)		186		171
มุมเงย (องศา)		15	25	10
ค่าสะท้อน (%)		0.30	0.35	0.06
การลงทุน (฿/W)	**หน้าเดียว**	32		45
	สองหน้า	34		47



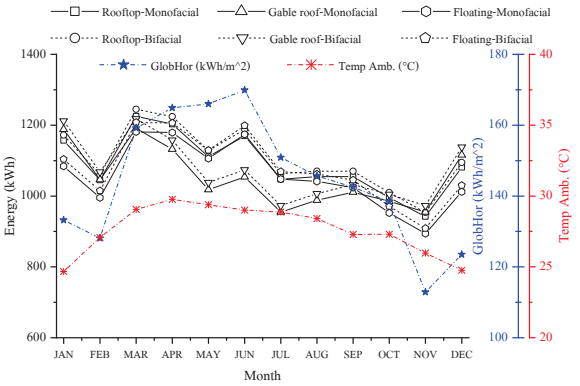
(ก) (ข)

(ค)

รูปที่ 3 ลักษะการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ในรูปแบบต่าง ๆ
(ก) การติดตั้งบนดาดฟ้า (Rooftop)
(ข) การติดตั้งบนหลังคาหน้าจั่ว (Gable roof)
(ค) การติดตั้งแบบลอยน้ำ (Floating)

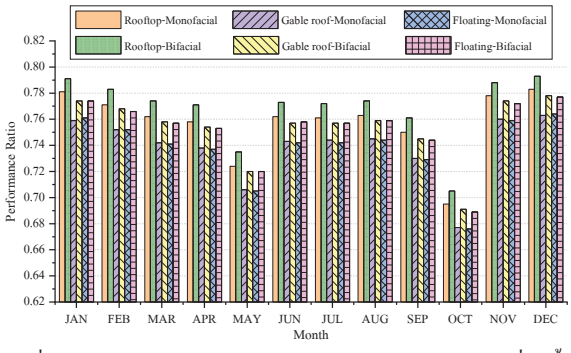
4. ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายเดือนจากระบบโซลาร์เซลล์ในรูปแบบการติดตั้งต่าง ๆ ทั้งแผงแบบด้านเดียวและแบบสองหน้านำเสนอดังรูปที่ 4 พบว่าการเลือกใช้แผงแบบสองหน้าให้พลังงานมากกว่าแบบหน้าเดียวในทุกรูปแบบการติดตั้ง โดยการผลิตพลังงานสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเดือน มีนาคม-มิถุนายน ซึ่งสอดคล้องกับช่วงที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (GlobHor) ที่สูง ในขณะที่ระบบซึ่งเลือกใช้แผงแบบสองด้านติดตั้งแบบหลังคา (Rooftop) มีแนวโน้มให้พลังงานสูงสุดในหลายเดือน แม้ว่าอุณหภูมิแวดล้อมที่สูงอาจส่งผลลบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของแผงโซลาร์เซลล์ก็ตาม ทั้งนี้รูปแบบการติดตั้งและประเภทของแผงโซลาร์เซลล์มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยมีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับความเข้มของรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปี



รูปที่ 4 การผลิตพลังงานไฟฟ้ารายเดือนจากระบบโซลาร์เซลล์ในรูปแบบการติดตั้งต่าง ๆ

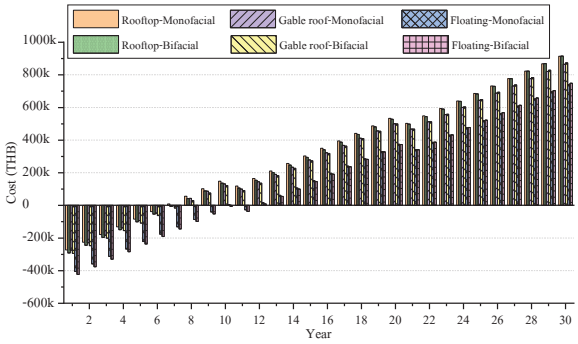
สมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ในแต่ละเดือนของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5 Performance Ratio (PR) รายเดือนของระบบโซลาร์เซลล์ในการติดตั้งบนดาดฟ้า (Rooftop) บนหลังคาหน้าจั่ว (Gable roof) และแบบลอยน้ำ (Floating) ผลการจำลองพบว่าระบบโซลาร์เซลล์แบบ Rooftop-Bifacial มีค่า PR สูงที่สุดตลอดทั้งปี ในขณะที่ระบบแบบ Monofacial ทุกรูปแบบมีค่า PR ต่ำกว่าแบบ Bifacial ที่ติดตั้งในรูปแบบเดียวกัน สังเกตได้ว่าเดือนพฤษภาคมและตุลาคมมีค่า PR ต่ำที่สุดในทุกรูปแบบการติดตั้ง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลาดังกล่าว นอกจากนี้ยังพบว่าระบบ Floating มีค่า PR ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งปีเนื่องจากการระบายความร้อนที่ดีกว่าจากผิวน้ำ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยี Bifacial มีประสิทธิภาพสูงกว่า Monofacial ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่ศึกษานี้



รูปที่ 5 Performance Ratio (PR) รายเดือนของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในรูปแบบต่าง ๆ

ระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีศึกษาดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าหลังจากปีที่ 9 เป็นต้นไป ทุกระบบเริ่มมีกำไรและเพิ่มขึ้นตาม

ระยะเวลา ซึ่งตารางที่ 2 แสดงระยะเวลาคืนทุนของแต่ละระบบ โดยระบบที่คืนทุนเร็วที่สุดคือ Rooftop-Monofacial (6 ปี 8 เดือน) และระบบที่คืนทุนช้าที่สุดคือ Floating-Monofacial (11 ปี 7 เดือน) ในขณะที่การพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะและการผลิตพลังงานไฟฟ้า พบว่าระบบ Bifacial มีสมรรถนะและการผลิตพลังงานสูงกว่าระบบ Monofacial ในทุกรูปแบบการติดตั้ง ระบบ Rooftop ทั้งการเลือกใช้แผงแบบ Monofacial และ Bifacial ให้กำลังการผลิตสูงสุด 13,086 และ 13,280 kWh/year และมีสมรรถนะเฉลี่ยของระบบสูงสุด 75.67% และ 76.78% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบที่เลือกใช้แผงสองหน้าจะให้ผลผลิตพลังงานสูงกว่า แต่ระยะเวลาคืนทุนที่ยาวกว่าบ่งชี้ว่ามีต้นทุนเริ่มต้นที่สูง ซึ่งการติดตั้งบนผิวน้ำมีระยะเวลาคืนทุนยาวที่สุด (11 ปี 7 เดือน) สะท้อนถึงต้นทุนโครงสร้างสำหรับรองรับและการติดตั้งที่สูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเลือกรูปแบบการติดตั้งและประเภทแผงโซลาร์เซลล์ควรพิจารณาทั้งในด้านสมรรถนะ กำลังการผลิต และระยะเวลาคืนทุนร่วมกัน



รูปที่ 6 ระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีศึกษา

ตารางที่ 2 การผลิตพลังงานไฟฟ้าและสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในรูปแบบต่าง ๆ

กรณีศึกษา	ดาดฟ้าอาคาร (Rooftop)	หลังคาหน้าจั่ว (Gable roof)	ผิวน้ำ (Floating)
แผงหน้าเดียว (Monofacial)			
การผลิตพลังงานไฟฟ้า (kWh/year)	13,086	12,640	12,691
สมรรถนะของระบบ (%)	75.67	73.8	73.69
ระยะเวลาการคืนทุน	6 ปี 8 เดือน	7 ปี 1 เดือน	11 ปี 6 เดือน
แผงสองหน้า (Bifacial)			
การผลิตพลังงานไฟฟ้า (kWh/year)	13,280	12,897	12,948
สมรรถนะของระบบ (%)	76.78	75.29	75.17
ระยะเวลาการคืนทุน	7 ปี 2 เดือน	7 ปี 4 เดือน	11 ปี 7 เดือน

5. สรุป

บทความนี้ประสบความสำเร็จในการนำเสนอการจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์แบบหน้าเดียวและแบบสองหน้าภายใต้รูปแบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน พบว่าการเลือกใช้แผงแบบสองหน้าให้ค่าการผลิตพลังงานและสมรรถนะของระบบสูงกว่าแบบหน้าเดียวในทุกรูปแบบ โดยเฉพาะการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์แบบสองหน้าบนดาดฟ้าอาคารจะให้ผลลัพธ์ดีที่สุด เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน ระบบซึ่งเลือกใช้การติดตั้งแบบลอยน้ำแม้จะมีการระบายความร้อนที่ดีซึ่งส่งผลให้ค่า PR มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งปีแต่กลับมีต้นทุนเริ่มต้นที่สูง ส่งผลให้ระยะเวลาการคืนทุนยาวนานที่สุด ขณะที่ระบบแผงหน้าเดียวมีระยะเวลาคืนทุนที่สั้นกว่าแสดงถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์และลักษณะการติดตั้งมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และระยะเวลาในการคืนทุน ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการวางแผนและตัดสินใจเลือกเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] L. Jiang, S. Cui, P. Sun, Y. Wang, and C. Yang, "Comparison of Monocrystalline and Polycrystalline Solar Modules," in 2020 *IEEE 5 th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 12-14 June 2020, pp. 341-344.

[2] A. Juaidi et al., "A comparative simulation between monofacial and bifacial PV modules under palestine conditions," Solar Compass, vol. 8, p. 100059, 2023/12/01/ 2023.

[3] ชัยพร สุภาหิตานุกูล และคณะ, "การเปรียบเทียบระหว่างผลจากการตรวจสอบกับผลจากการจำลองของแผงโซลาร์เซลล์," (2564), การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาลัยนครราชสีมา ครั้งที่ 8 (NMCCON2021), 27 มีนาคม 2564, หน้า 824-836.

[4] ยอดเสนี วัลลภ, "การวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่าระหว่างแผงโซล่าเซลล์แบบหน้าเดียวและแบบสองหน้า บนทุ่นลอยน้ำในจังหวัดสระบุรี" (2023). Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 11412.

[5] Z. Usman, J. Tah, H. Abanda, and C. Nche, "A Critical Appraisal of PV-Systems' Performance," Buildings, vol. 10, no. 11, p. 192, 2020.

[6] E. H. Sepúlveda-Oviedo, "A review of operational factors affecting photovoltaic system performance," Energy Conversion and Management: X, vol. 26, p. 100942, 2025/04/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100942.

[7] A. Ghosh, "A comprehensive review of water based PV: Flotavoltaics, under water, offshore & canal top," Ocean Engineering, vol. 281, p. 115044, 2023/08/01/ 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115044.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาการใช้พลังงานจากพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่ออะลูมิเนียม และท่อทองแดง

Study of Energy Consumption from the Heat Exchange Behavior of Aluminum and Copper Pipes

ภากรณ์ ปู่[1] ทรัพย์ทวี สุวรรณทา[1] เด่น คอกพิมาย[1] สัญชัย รำเพยพัด[1] ทรงยศ มาลีวงศ์[1], ธนวรรธน์ วัชรดำรงค์ศักดิ์[2] วะชิระพงษ์ พงศ์กิจวิทูร[3] และรุ่งเพชร ก่องนอก[1,*]

[1]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
[2]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
[3]บริษัท เอ็กโก โคเจนเนอเรชั่น จำกัด 222 หมู่ 8 ตำบลมาบข่า อำเภอนิคมพัฒนา จังหวัดระยอง
E-mail: rungphet.ko@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้ เสนอการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ ทองแดง และอะลูมิเนียม ขนาดท่อ 3/4 นิ้ว ยาว 3 เมตร ทดสอบคุณสมบัติของท่อโดยวัดอุณหภูมิที่ปากท่อ และอุณหภูมิที่ปลายท่อทดสอบขณะที่ยังไม่มีลมผ่านท่อ พบว่าที่ปากท่อทดสอบมีอุณหภูมิ 35 °C และปลายท่อทดสอบวัดได้ 34.6 °C อุณหภูมิของน้ำที่ทดสอบ 9.1 °C ทำการทดสอบโดยใช้พัดลมพัดผ่านท่ออะลูมิเนียมที่ทดสอบความเร็ว 8 m/s เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิที่ปากท่อได้ 32.6 °C และอุณหภูมิห้องทดสอบได้ 29.8 °C และอุณหภูมิของน้ำที่ทดสอบ 9.1 °C ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างขาเข้าและขาออกต่างกันที่ 2.8 °C และท่อทองแดงความเร็ว 8 m/s เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง วัดอุณหภูมิที่ห้องทดสอบได้ 32.7 °C และอุณหภูมิห้องวัดได้ 29 °C และอุณหภูมิของน้ำที่ทดสอบ 9.1 °C อุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างขาเข้าและขาออกต่างกันที่ 3.7 °C ค่าพลังงานที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 0.204 หน่วย ที่เวลา 6 ชั่วโมงทดสอบ

คำสำคัญ: การแลกเปลี่ยนความร้อน, ค่าอุณหภูมิแตกต่างกัน

Abstract

This article presents a study of heat exchange between two materials, copper and aluminum, with a pipe size of 3/4 inches and a length of 3 meters. The properties of the pipe were tested by measuring the temperature at the mouth of the pipe and the temperature at the end of the test pipe while there was no air flowing through the pipe. The temperature at the mouth of the test pipe was 35 °C and at the end of the test pipe was 34.6 °C. The temperature of the tested water was 9.1 °C while a fan was blowing through the tested pipe. The test result at the wind speed blowing through aluminum pipe at 8 m/s, test time 1 hour, the temperature at the pipe mouth is 32.6 °C, the temperature at the room test is 29.8 °C, and the temperature of the tested water is 9.1 °C, the temperature difference between the inlet and outlet is 2.8 °C. And copper pipe at 8 m/s, test time 1 hour, the temperature at the pipe mouth is 32.7 °C, the temperature at the room test is 29 °C, and the temperature of the tested water is 9.1 °C, the temperature difference between the inlet and outlet is 3.7 °C. The energy used in the test is 0.204 unit at 6 hours test.

Keywords: Heat exchange, temperature difference

1. บทนำ

ประเทศไทย เป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ร้อนชื้น พิกัดของประเทศตั้งอยู่ในร่องมรสุม ระหว่าง ละติจูด 5° 37' เหนือ กับ 20° 27' เหนือ และระหว่างลองจิจูด 97° 22' ตะวันออก กับ 105° 37' ตะวันออกซึ่งลักษณะอากาศจะมีทั้งฝนตกชุก อากาศร้อน ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปี จากกรมอุตุนิยมวิทยา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการของการปรับอากาศ

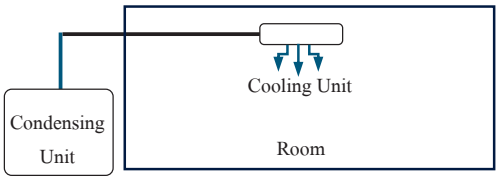
การทำงานของเครื่องปรับอากาศในปัจจุบันแบ่งออกเป็น ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) เป็นระบบที่ปรับสภาพอากาศให้เหมาะสมกับการทำงานของมนุษย์ การถนอมอาหาร โดยที่จะปรับอากาศให้มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำ ตามที่ต้องการได้ ซึ่งแยกประเภทของการปรับอากาศออกเป็นการทำความเย็นด้วยการทำน้ำเย็นระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooling Chiller) ประเภทระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooler Water Chiller) การระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooling Package) และการปรับอากาศประเภทแยกส่วน (Split Type) [1]

ระบบจะทำหน้าที่ปรับสภาพของอากาศให้เหมาะกับ สภาวะที่ผู้ใช้ต้องการ อาจจะเป็นการปรับอากาศเพื่อการเก็บรักษาอาหาร หรือสิ่งของ และรวมถึงการปรับอากาศเพื่อการอยู่อาศัยในอาคารด้วย โดยอาจจะเป็นการปรับให้อุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงก็ได้ และยังต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความเร็วลม กลิ่นและสิ่งเจือปนในอากาศด้วย

2.2 เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type)

เป็นเครื่องปรับอาศขนาดเล็กที่สุดของระบบปรับอากาศ ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ทำความเย็น (Fan coil unit) ซึ่ง

ประกอบด้วย ท่อขดทำความเย็น พัดลมกระจายความเย็น และส่วนระบายความร้อน (Condensing Unit) ประกอบด้วย ขดท่อระบายความร้อนพัดลม และคอมเพรสเซอร์ การทำงานของระบบแยกส่วนจะใช้สำหรับการปรับอากาศในห้องขนาดเล็ก โดยที่ส่วนระบายความร้อน และส่วนทำความเย็นจะติดตั้งไม่ห่างกันมากนัก [2]

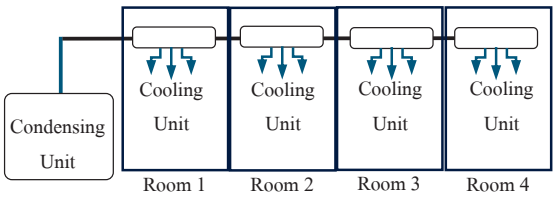


รูปที่ 1 ผังการทำงานการปรับอากาศแบบแยกส่วน

ในรูปที่ 1 การติดตั้งส่วนระบายความร้อน จะถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับส่วนทำความเย็น ทั้งนี้ หากทำการติดตั้งในระยะที่ห่างออกไปอาจส่งผลต่อการติดตั้งท่อทองแดง หรือทำให้ประสิทธิภาพการปรับอากาศลดลง เนื่องจากการใช้กำลังในการส่งจ่ายสารทำความเย็นในระยะที่ยาวขึ้นนั่นเอง

2.3 เครื่องปรับอากาศแบบ VRF (Variable Refrigerant Flow)

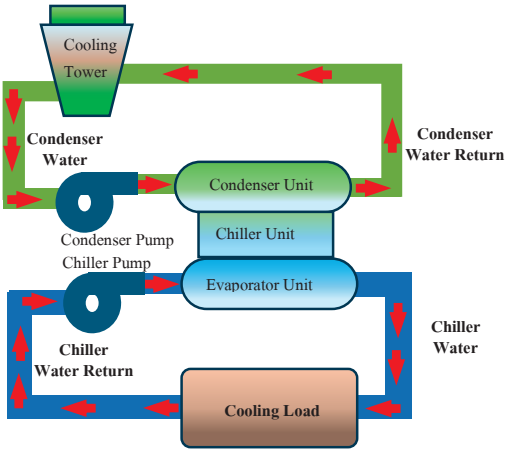
การปรับอากาศแบบนี้จะมีคอยล์ร้อนทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากตัวอาคาร และจ่ายน้ำยาทำความเย็นไปยังหัวจ่าย หรือที่เรียกว่าคอยล์เย็น ณ จุดต่าง ๆ ที่ออกแบบไว้ หัวจ่ายนี้จะควบคุมการจ่ายอากาศของหัวจ่ายด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมการฉีดสารทำความเย็นเพื่อทำการปรับอากาศให้ตัวอาคาร หรือบริเวณที่ต้องการปรับอากาศ โดยที่การควบคุมการจ่ายน้ำยาทำความเย็นควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2 ผังการทำงานการปรับอากาศระบบ VRF

2.4 เครื่องปรับอากาศแบบชิลเลอร์

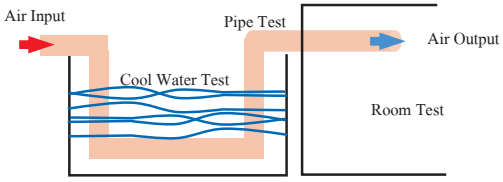
การปรับอากาศแบบชิลเลอร์ (Chiller System) เป็นระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ โดยทำให้น้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนมีความเย็นแล้วส่งไปยังชุดหัวจ่ายที่ห้องต่างๆ ที่ต้องการปรับอากาศ คอมเพรสเซอร์ของระบบชิลเลอร์ ทำหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นในสภาวะที่เป็นก๊าซแรงดันสูง ส่งไปยังคอนเดนเซอร์เพื่อระบายความร้อนให้สารทำความเย็นให้เป็นของเหลวที่มีแรงดันสูง แล้วจึงลดแรงดันผ่านตัวลดแรงดัน แล้วจึงฉีดเข้าอีแวปเปอร์เรเตอร์ ซึ่งสารความเย็นจะเกิดการเดือด และดูดรับปริมาณความร้อนจากน้ำที่ส่งเข้ามาส่งผลทำให้น้ำเย็น จากนั้นจึงเอาน้ำเย็นที่ได้ไปใช้ในการทำความเย็นให้กับห้องที่ต้องการปรับอากาศ ระบบทำความเย็นแบบรวมศูนย์นี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ระบายความร้อนด้วยน้ำ และระบบปรับอากาศแบบรวมศูนย์ระบายความร้อนด้วยอากาศ [3]



รูปที่ 3 ผังระบบปรับอากาศแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooling Chiller)

3. แนวคิดการดำเนินงาน

การศึกษานี้ เป็นการยืนยันสมมุติฐานการแลกเปลี่ยนความร้อน/ความเย็น โดยการทดสอบกับท่อทองแดง และอะลูมิเนียม 3/4 นิ้ว

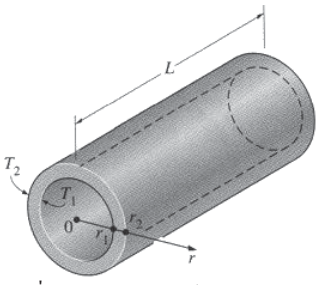


รูปที่ 4 การนำระบบแลกเปลี่ยนความเย็น(Cool Exchange) ในการทดสอบคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความเย็น

รูปที่ 4 ลมร้อนจะถูกขับโดยใช้พัดลมขนาดเล็กให้ผ่านท่อที่ใช้ในการทดสอบ เพื่อยืนยันสมมุติฐานของการแลกเปลี่ยนความเย็น ท่อที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ท่ออะลูมิเนียม และท่อทองแดง

ตารางที่ 2 อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ [4]

วัสดุ	k, W/m•K	วัสดุ	k, W/m•K
ทองแดง	400	แก้ว	1.1
อะลูมิเนียม	200	น้ำ	0.6
เหล็ก	64	ไม้	0.1
สแตนเลส	15	PVC	0.1
คอนกรีต	1.4	ไฟเบอร์กลาส	0.04



รูปที่ 5 การถ่ายเทความร้อนของท่อ [4]

การแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อในรูปที่ 5 มีสมการความสัมพันธ์ของการแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนี้

$$Q = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน

k คือ ค่าอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนวัสดุ

L คือ ความยาวของวัสดุ

T_1 คือ อุณหภูมิภายในท่อ

T_2 คือ อุณหภูมิภายนอกท่อ

r_1 คือ รัศมีภายในท่อ

r_2 คือ รัศมีภายนอกท่อ

4. ผลการศึกษา

การศึกษานี้ทำการทดสอบที่ขนาดของห้อง ด้านหน้าสูง 2 เมตร ด้านหลังสูง 1.65 เมตร ความลึกของห้อง 1 เมตร ความกว้างของห้อง 2 เมตร ขนาดของถังน้ำทำความเย็นมีขนาด 53 x 42 เซ็นติเมตร ขนาดท่อที่ใช้ในการทดสอบ 3/4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 6



(ก) การทดสอบด้วยท่อทองแดง (ข) การทดสอบด้วยท่ออะลูมิเนียม

รูปที่ 6 การวางท่อทองแดง และอะลูมิเนียมในการทดสอบ

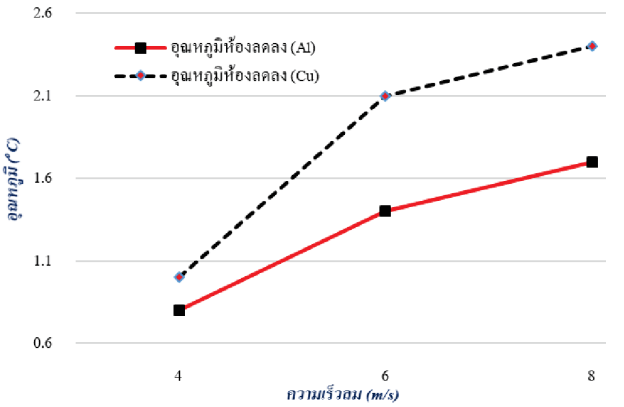
จากรูป เป็นการทดอสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนจากท่อโดยทำการทดลองด้วยวัสดุที่เป็นท่อทองแดงในรูปที่ 6 (ก) และวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียมในรูปที่ 6 (ข)



รูปที่ 7 ห้องทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 3 ผลทดสอบอุณหภูมิห้อง ที่เวลา 10 นาที และ 60 นาที ของท่อทองแดง/อะลูมิเนียม ความยาวท่อ 3 เมตร อุณหภูมิห้องประมาณ 35 °C

ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิลมขาเข้า (c°)	อุณหภูมิห้องที่ 10 นาที(c°)	อุณหภูมิห้องที่ 60 นาที (c°)	อุณหภูมิห้องลดลง
4	34.3/34.4	34.0/34.3	33.0/33.5	1/0.8
6	35.1/35.0	34.8/34.5	32.7/33.1	2.1/1.4
8	32.7/32.6	31.4/31.5	29.0/29.8	2.4/1.7



รูปที่ 8 กราฟความแตกต่างของการลดลงของอุณหภูมิจากวัสดุทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลทดลองการเปลี่ยนถ่ายความร้อนท่อทอแดงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่ความเร็วลม 8 m/s

T(hr)	T_{in} (C°)	WT (C°)	PL (m)	T_O (C°)	WS_O (m/s)	T_{Room} (C°)	E (kWh)
1	38.5	9.1	3	14.5	3.1	37.6	0.00384
2	38.5	9.1	3	13.3	3.1	36.0	0.0068
3	39.3	9.1	3	12.2	3.1	35.7	0.0102
4	38.1	9.1	3	12.1	3.1	35.1	0.0136
5	38.2	9.1	3	12.1	3.1	34.3	0.17
6	38.2	9.1	3	12.1	3.1	33.5	0.204

โดยที่

T(hr) คือ ชั่วโมงทดสอบ
T_O คือ อุณหภูมิของลมออก
WT คือ อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดสอบ
T_{Room} คือ อุณหภูมิของห้องทดสอบ
PL คือ ความยาวท่อทดสอบ (m)
WS_o คือ ความเร็วลมด้านออก (m/s)
T_{in} คือ อุณหภูมิของลมเข้าท่อ
E คือ พลังงานที่ใช้ในการทดสอบ (kWh)

จากตารางที่ 4 เป็นการทดสอบค่าการลดลงของท่อทองแดง ซึ่งได้คำนวณจากสมการที่ใช้เพื่อหาค่าของหน่วยพลังงานที่ใช้ โดยคำนวณจากสมการ

$$E = \frac{VI(\cos\theta)h}{1000} \quad (kWh) \tag{2}$$

โดยที่ E คือ ค่าพลังงานที่ใช้ (kWh)
V คือ แรงดันไฟฟ้า (V)
I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
h คือ ชั่วโมงที่ใช้งาน (h)
$\cos\theta$ คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

5. สรุป

จากการศึกษาพบว่า การแลกเปลี่ยนความร้อนของท่ออะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าท่อทองแดง ซึ่งข้อสรุปที่ได้ เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลาเพิ่มขึ้น การแลกเปลี่ยนความร้อน จะสามารถทำได้ดีขึ้น จากการทดลองนี้จะเป็นตัวช่วยสนับสนุนให้เกิดการเตรียมความเย็นด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อน ความเย็นนี้ จะช่วยลดภาระการปรับอากาศของเครื่องปรับอากาศที่ใช้งานได้ ซึ่งการใช้พลังงานในการทำให้ลมผ่านท่อนี้มีอัตราการใช้พลังงานที่อยู่ในเกณฑ์ที่น้อยอยู่โดยค่าพลังงานที่ใช้ 0.204 หน่วยในการทดสอบ 6 ชั่วโมง จากการทดสอบนี้ หากมีการใช้เวลาในการทดสอบ และความยาวของท่อที่ใช้มีความยาวเพิ่มขึ้น อาจจะสามารถทำให้อุณหภูมิที่ได้สามารถลดลงได้มากขึ้น ซึ่งทั้งนี้จะต้องมีการทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อนจากกรณีดังกล่าวด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ร่วมเขียนบทความทุกท่านที่ช่วยกันเขียนบทความนี้จนสำเร็จ รวมทั้งผู้ให้ข้อแนะนำ ตลอดจนช่วยเก็บข้อมูล ที่ใช้ในการเขียนบทความ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดจนคณาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ระบบปรับอากาศ ที่มา https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบปรับอากาศ สืบค้น ธ.ค. 67
[2] เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ที่มา https://ienergyguru.com/2015/01/เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนAsplit-type/ สืบค้น ธ.ค. 67
[3] ระบบปรับอากาศแบบศูนย์รวม ที่มา www.ecoen.co.th/news-events/knowledge/143/ระบบปรับอากาศแบบศูนย์รวม-(Chiller-System) สืบค้น ธ.ค. 67
[4] อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนของวัสดุ ที่มา https://xp20.ashrae.org/SupplementalFiles/ PHVAC9/Heat_Exchange_Equipment.pdf สืบค้น ธ.ค. 67

ประวัติผู้เขียนบทความ

ประวัติผู้เขียนบทความ


ภากรณ์ ปู ระบบปรับอากาศ พลังงาน พลังงานทดแทน ระบบควบคุมอัตโนมัติ มทร.อีสาน


ทรัพย์ทวี สุวรรณทา วิศวกรรมไฟฟ้า ระบบควบคุมพลังงานทดแทน มทร.อีสาน


เด่น คอกพิมาย วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ระบบควบคุมอัตโนมัติ พลังงาน พลังงานทดแทน มทร.อีสาน


สัญชัย รำเพยพัด วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ระบบปรับอากาศ พลังงาน พลังงานทดแทน มทร.อีสาน


ทรงยศ มาลีวงศ์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ระบบควบคุมอัตโนมัติ พลังงาน พลังงานทดแทน ระบบตรวจวัดพลังงาน มทร.อีสาน


ธนวรรธน์ วัชรดำรงค์ศักดิ์ วิศวกรรมเครื่องกล ระบบควบคุมอัตโนมัติ พลังงาน พลังงานทดแทน มทร.ล้านนา


วะชิระพงษ์ พงศ์กิจวิทูร ระบบไฟฟ้า พลังงาน พลังงานทดแทน การควบคุมอัตโนมัติ บริษัท เอ็กโก โคเจนเนอเรชั่น จำกัด


รุ่งเพชร ก่องนอก วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ระบบไฟฟ้า พลังงานทดแทน พลังงานทดแทน ระบบตรวจวัดพลังงาน มทร.อีสาน

Innovation and Invention

(IN)

นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่

Electrical Circuit Connecting Training Kit and Abnormality Check of Portable Air Condition

ภูชงค์ จันทร์จิระ[1*] โอภาส สุขหวาน[2] ศุภกาญจน์ รักษาศรี[3] และ สุชานันท์ บริบรูณ์[4]
[123*]ภาคอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
114 ซอยสุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10100 โทรศัพท์ 0-9196-4-5969 E-mail: Dr.puchung.chan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสริมสร้างศักยภาพผู้เรียนที่เรียนด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของ เครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง ที่ได้จัดทำขึ้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างและหาประสิทธิภาพตลอดจนเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรวมถึงการประเมินความคิดเห็นของผู้เรียนที่เรียนด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของ เครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง ที่ได้จัดทำขึ้น ได้ใช้กลุ่ม Try Out ในการวิจัยเป็นนักศึกษาที่ผ่านการเรียนวิชาเครื่องทำความเย็นและปรับอากาศมาแล้วจำนวน 7 คน โดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง พบว่า ในภาพรวม อยู่ในระดับเห็นด้วยอย่างยิ่ง ($\bar{X}$ = 4.50 , S.D. = 0.50) และในการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรวมถึงการประเมินความคิดเห็นของผู้เรียน ได้กำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษา สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมศึกษา - ไฟฟ้า ที่ยังไม่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาเครื่องทำความเย็น และปรับอากาศ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567 ได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง จำนวน 18 คน ตามเกณฑ์ที่กำหนด พบว่าชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของ เครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่ สามารถใช้ดำเนินการการจัดการเรียนการสอนร่วมกับใบงานการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพที่เกณฑ์ 81.90/81.70 สูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้ โดยมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของกลุ่มตัวอย่างหลังเรียนเฉลี่ยสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ .05 และความคิดเห็นในภาพรวมอยู่ในระดับเห็นด้วยอย่างยิ่ง ($\bar{X}$ = 4.56, S.D. = 0.45)

คำสำคัญ : เครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่, ชุดฝึก, วงจรไฟฟ้า ,ใบงานการทดลอง

Abstract

The objective of this research is to enhance the competency of students through the use of a practical training kit designed for electrical circuit connection and troubleshooting of portable air conditioners, in conjunction with experimental worksheets specifically developed for this study. The researcher developed, tested the efficiency, and compared the learning achievements, as well as evaluated the students' opinions toward the training kit and experimental worksheets.The Try-Out group consisted of 7 students who had previously completed the Refrigeration and Air Conditioning course, selected through purposive sampling. The overall results showed a very high level of satisfaction ($\bar{X}$ = 4.50, S.D. = 0.50). For the comparison of learning achievement and students' opinions, the sample group consisted of 18 students from the Industrial Education - Electrical Power Program, who had not yet enrolled in the Refrigeration and Air Conditioning course in the second semester of the academic year 2024. The sample was selected through purposive sampling based on specified criteria. The findings revealed that the electrical circuit training kit and troubleshooting of portable air conditioners, used together with the experimental worksheets, demonstrated an efficiency of 81.90/81.70, which exceeds the established standard criteria of 80/80. The students' post-test learning achievement scores were significantly higher than their pre-test scores at the 0.05 level of statistical significance. Additionally, the overall students' opinions were at a very high level of agreement ($\bar{X}$ = 4.56, S.D. = 0.45).

Keywords: Portable Air Conditioner, Training Kit, Electrical Circuit, Experimental Worksheet

1. บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตรทำให้ภูมิอากาศของประเทศมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้นประกอบกับภาวะโลกร้อน ที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้คนที่อาศัยอยู่ในประเทศต้องอยู่ในสภาพอากาศที่ร้อนจัด ดังนั้น [1] จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยงานในภาครัฐและเอกชน เช่น โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า สถานบันเทิง สนามกีฬาในร่ม ต้องติดตั้งเครื่องปรับอากาศ รวมถึงสถานศึกษาที่จะต้องติดตั้งเครื่องปรับอากาศ

งานอุตสาหกรรมเทคโนโลยีด้านระบบเครื่องปรับอากาศมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านโครงสร้าง อุปกรณ์ และระบบควบคุมไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องทำให้ช่างเทคนิคมีความรู้และทักษะที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีใหม่ ๆ ของเครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่ (Portable Air) เป็นเครื่องปรับอากาศชนิดตั้งพื้นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถย้ายจากห้องหนึ่งไปยังอีกห้องหนึ่งได้อย่างง่าย ไม่ต้องติดตั้งเข้ากับตัวบ้าน

มีวัตถุประสงค์ในการใช้งานที่ไม่แตกต่างจากเครื่องปรับอากาศอื่น ๆ คือให้ความเย็นเป็นหลัก แต่มักมีขนาด BTU ที่ต่ำกว่าแอร์บ้าน [2]

ดังนั้นในการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาเครื่องเย็นและการปรับอากาศจึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดการเรียนการสอนให้สอดคล้องกับสภาพ เศรษฐกิจ และสังคมในยุคปัจจุบันและต้องอาศัยอุปกรณ์การเรียนรู้ที่เหมาะสมเพื่อผลิตและพัฒนากำลังคนในด้านวิชาชีพระดับฝีมือ ระดับเทคนิค และระดับเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นการยกระดับการศึกษาวิชาชีพให้สูงขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของตลาดแรงงาน

ดังนั้นจากหลักการและเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการจัดการเรียนการสอนในรายวิชาเครื่องเย็นและการปรับอากาศที่มุ่งเน้นการฝึกปฏิบัติเรียนรู้เพื่อเสริมสร้างทักษะให้กับผู้เรียนได้เรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพตามแนวทางการเรียนรู้เชิงรุก ซึ่งส่งเสริมให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ด้วยตนเอง ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของ เครื่องปรับอากาศแบบเคลื่อนที่ขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่

เครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่ หรือที่เรียกสั้นๆ ว่าแอร์เคลื่อนที่ (Portable Air) เป็นเครื่องปรับอากาศชนิดตั้งพื้นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ สามารถย้ายจากห้องหนึ่งไปยังอีกห้องหนึ่งได้อย่างง่ายดายสะดวกสบาย มีจุดหมายเพื่อให้ความเย็นแบบเดียวกับแอร์ทั่วๆ ไป แต่ไม่ต้องติดตั้งเข้ากับตัวบ้าน เพียงเสียบปลั๊กก็ใช้งานให้ความเย็นฉ่ำที่ไม่แตกต่างจากแอร์บ้านคือ ให้ความเย็นเป็นหลัก แต่มักมีขนาด BTU ที่ต่ำกว่าแอร์บ้าน เนื่องจากไม่มีคอมเพรสเซอร์แยกด้านนอกเพื่อระบายความร้อน รวมทั้งเป็นเครื่องขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบาเพื่อการขนย้าย ดังนั้นฟังก์ชั่นต่างๆ ในรูปแบบแอร์บ้านจึงถูกตัดออกไป [3]

2.2 คุณภาพของชุดฝึก

คุณภาพชุดฝึกหมายถึงการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือการเรียนรู้ที่สามารถตอบสนองความต้องการวัตถุประสงค์และเป้าหมายการเรียนรู้ได้อย่างครบถ้วน โดยเน้นทั้งด้านความเหมาะสม การใช้งานที่ปลอดภัยและการสนับสนุนการเรียนรู้ เพื่อเตรียมผู้เรียนให้พร้อมสำหรับโลกที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ[4] เราสามารถพิจารณาได้จากประเด็นสำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้ 1) ตอบสนองเป้าหมายการเรียนรู้ 2) รองรับการใช้งานที่หลากหลาย 3) ความน่าเชื่อถือและความปลอดภัย 4) สนับสนุนการเรียนรู้แบบองค์รวม 5) ส่งเสริมการเรียนรู้ที่ยั่งยืนและทันสมัย

2.3 การสอนแบบทดลอง

การสอนทดลอง เป็นวิธีการสอนที่มุ่งเน้นให้ผู้เรียนเรียนรู้ข้อเท็จจริงด้วยการกระทำเป็นประสบการณ์ตรง เป็นการนำรูปธรรมมาอธิบาย และนักเรียนสามารถค้นหาข้อสรุปจากการทดลองนั้นด้วยตนเอง

2.4 สื่อการจัดการเรียนรู้แบบเคลื่อนที่

สื่อการจัดการเรียนรู้แบบเคลื่อนที่คือเครื่องมือหรือเทคโนโลยีที่ช่วยส่งเสริมการเรียนรู้ทั้งในและนอกห้องเรียน เช่น หนังสือ สื่อดิจิทัล วิดีโอ แอปพลิเคชัน และเว็บไซต์ ซึ่งช่วยให้การถ่ายทอดความรู้มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหา สื่อเหล่านี้ยังช่วยกระตุ้นความสนใจ พัฒนาทักษะการคิดวิเคราะห์ และส่งเสริมการเรียนรู้ตลอดชีวิต โดยเฉพาะชุดฝึกอบรมที่ออกแบบมาเพื่อพัฒนาทักษะเฉพาะเรื่องอย่างมีจุดประสงค์ชัดเจน ผู้วิจัยจึงพัฒนาสื่อการเรียนรู้แบบเคลื่อนที่ เนื่องจากสามารถสร้างประสบการณ์ตรงให้ผู้เรียน ฝึกปฏิบัติได้อย่างยืดหยุ่น ใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลา ส่งเสริมการเรียนรู้และพัฒนาตนเองอย่างต่อเนื่อง

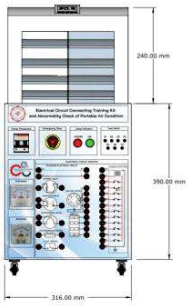
2.5 ใบงานการทดลอง

หมายถึงเอกสารหรือแผ่นงานที่ออกแบบขึ้นเพื่อสนับสนุนการเรียนรู้ผ่านกระบวนการปฏิบัติจริง โดยมุ่งเน้นให้ผู้เรียนสามารถพัฒนาทักษะการเรียนรู้ด้วยตนเองและเสริมสร้างความเข้าใจในเนื้อหาที่ศึกษา ใบงานการทดลองประกอบด้วยส่วนสำคัญ ได้แก่ วัตถุประสงค์ของการทดลอง เครื่องมือและอุปกรณ์ ขั้นตอนการดำเนินการ คำถามชี้นำสำหรับการวิเคราะห์ และช่องทางสำหรับบันทึกผลการทดลอง ทั้งนี้ยังช่วยให้ผู้เรียนสามารถสะท้อนความรู้และข้อสรุปจากการทดลองได้ และใบงานการทดลองยังถือเป็นเครื่องมือสำคัญในกระบวนการเรียนการสอนที่เน้นการลงมือปฏิบัติจริงซึ่งเป็นแนวทางที่ผู้เรียนได้พัฒนาทักษะกระบวนการคิด การตั้งสมมติฐาน และการวิเคราะห์ข้อมูล[5]

2.6 วิธีดำเนินการ

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ เนื้อหาการออกแบบและสร้างชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1) ออกแบบและพัฒนาชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่



รูปที่ 1 แบบชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสีย

2) หาคุณภาพชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง โดยใช้ประชากรที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง (Try Out) เป็นนักศึกษาที่ผ่านการเรียนวิชาเครื่องทำความเย็นและปรับอากาศมาแล้วจำนวน 7 คน โดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

1. ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง

2. แบบประเมินการหาคุณภาพของชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง

3) ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนที่เรียนด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่โดยมี

1. ประชากรในการวิจัย นักศึกษา สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมศึกษา - ไฟฟ้า จำนวน 80 คน

2. กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยเป็นนักศึกษานักศึกษา สาขาวิชาช่างอุตสาหกรรมศึกษา - ไฟฟ้า ที่ยังไม่ลงทะเบียนเรียนรายวิชาเครื่องทำความเย็น และปรับอากาศ ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2567 ได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง จำนวน 18 คน ตามเกณฑ์ที่กำหนด

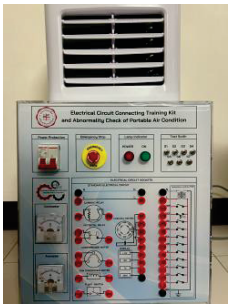
3. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง

4. แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้จากการทดลองวงจรไฟฟ้า

5. แบบสอบถามความคิดเห็นจากนักศึกษาที่เป็นกลุ่มตัวอย่างเกี่ยวกับชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่

2.7 ผลการทดลอง

1) ผลการออกแบบและพัฒนาชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่



รูปที่ 2 ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสีย

2) ผลการประเมินคุณภาพชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ร่วมกับใบงานการทดลอง

1. ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ

ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่านประเมินไปในทิศทางเดียวกัน สามารถใช้ร่วมกันได้อย่างเหมาะสม

2. ผลการประเมินความเหมาะสม (Try out) ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 7 คน จากการทดลองผู้วิจัยได้ สร้างแบบประเมินความคิดเห็นโดยกลุ่มตัวอย่าง (Try out) ที่มีต่อชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ ได้แบ่งเป็น 4 ด้านดังนี้ 1) ด้านจุดประสงค์เชิงพฤติกรรม 2) ด้านเนื้อหา 3) ด้านชุดทดลอง 4) ด้านใบงานการทดลอง โดยวิเคราะห์แสดงค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D)

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการประเมินความคิดเห็นโดยกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ในภาพรวม

รายการ	ระดับความคิดเห็น	
	$\bar{X}$	S. D
1. ด้านจุดประสงค์เชิงพฤติกรรม	4.47	0.48
2. ด้านเนื้อหา	4.49	0.55
3. ด้านชุดทดลอง	4.52	0.48
4. ด้านใบงานการทดลอง	4.50	0.48
รวม	4.50	0.50

3) ผลการประเมินผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของผู้เรียนที่เรียนด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่จากสมมติฐานการวิจัย

1. ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่ และใบงานการทดลองที่ได้พัฒนาสร้างขึ้น สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80/80

2. ผู้เรียนที่เรียนด้วยชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่และใบงานการทดลองที่ได้พัฒนาสร้างขึ้น จะมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิต

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของผลการนำชุดทดสอบไปใช้ในการเรียนการสอนคิดเป็นร้อยละ

คะแนน	คะแนนเต็ม	เฉลี่ย	S.D	ร้อยละ	(E_1/E_2)
คะแนนจากการทำแบบทดสอบหลังเรียน	50	40.95	0.88	81.90	81.90/81.70
คะแนนจากการทำแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน	50	40.85	0.87	81.70	

จากตารางที่ 2 พบว่า ประสิทธิภาพของผลการนำชุดทดสอบและใบงานการทดลองที่พัฒนาสร้างขึ้นสามารถนำไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างในการทำแบบทดสอบหลังเรียนด้วยชุดทดสอบและใบงานมีความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์สมมติฐานที่ตั้งไว้และกลุ่มตัวอย่างที่ทำแบบทดสอบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้ถูกต้องร้อยละ 81.70 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ตัวหลังที่กำหนดไว้จึงแสดงได้ว่าชุดฝึก และใบงานการทดลองสามารถใช้จัดการเรียนการสอนในรายวิชา เครื่องทำความเย็นและปรับอากาศ ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากับ 81.90/81.70 สูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้

ตารางที่3 ผลการเปรียบเทียบคะแนนผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของกลุ่มตัวอย่างระหว่างก่อนเรียนกับหลังเรียน โดยใช้ชุดฝึก

กลุ่มตัวอย่าง	N	$\bar{X}$	S.D	t-test	sig
ก่อนเรียน	18	28.45	3.85	13.09	0.00
หลังเรียน	18	40.85	0.85		

*มีความแตกต่างที่ระดับ .05

จากตาราง 3 พบว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของกลุ่มตัวอย่างหลังเรียน โดยใช้ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่ มีผลการเรียนเฉลี่ยสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ .05 และมีค่า sig = 0.00

3. สรุป

จากผลการทดลอง พบว่าชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศ แบบหน่วยเคลื่อนที่และใบงานการทดลอง สามารถใช้ดำเนินการการจัดการเรียนการสอนร่วมกับใบงานการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพที่เกณฑ์ 81.90/81.70 สูงกว่าเกณฑ์ 80/80 ที่กำหนดไว้สอดคล้องกับผลวิจัยของ พีรพล จันทร์หอม (2562) โดยมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของกลุ่มตัวอย่างหลังเรียน เฉลี่ยสูงกว่าก่อนเรียน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระดับ .05 และมีการประเมินผลการใช้ชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่และใบงานการทดลองตามความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างพบว่าในภาพรวมอยู่ในระดับเห็นด้วยอย่างยิ่งโดยเฉพาะด้านชุดฝึกการต่อวงจรไฟฟ้าและทดสอบอาการเสียของเครื่องปรับอากาศแบบหน่วยเคลื่อนที่และด้านใบงานการทดลองและยังสอดคล้องกับผลวิจัยของอัยฎา วรรณกายนต์ และคณะ (2562) เนื่องจากผู้เรียนสามารถนำไปวิเคราะห์อาการเสียและซ่อมบำรุงเครื่องปรับอากาศได้ต่อไปและสามารถนำไปประยุกต์ต่อยอดในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงเครื่องปรับอากาศ ต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ว่าที่ร้อยตรีดร.ภุชงค์ จันทร์จิระ ที่ได้กรุณาถ่ายทอดความรู้ แนวคิด แนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำโครงงานและตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2567). ภูมิอากาศของประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 10 ธันวาคม 2567, จาก https://www.tmd.go.th/info/ภูมิอากาศของประเทศไทย

[2] Bwell. (2567). แอร์เคลื่อนที่ Bwell เครื่องปรับอากาศเคลื่อนที่ เย็นฉ่ำ ราคาพิเศษ. 10 ธันวาคม 2567, จากhttps://bwell.co.th/portable-air-conditioner

[3] NinaMichigan_Girl. (2567). ทำความรู้จักกับแอร์ตั้งพื้นพร้อมแนะนำห้องที่เหมาะนำไปใช้.Central Inspirer. สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2568, จากhttps://www.central.co.th/e-shopping/get-to-know-movable-air-conditioner

[4] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2557). การสร้างชุดฝึกทักษะคณิตศาสตร์ เรื่องการหารทศนิยม สำหรับนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 6. สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2568, จาก https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2557/edtec40757rt_ch2.pdf

[5] มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. (2550). ผลการใช้วิธีสอนแบบทดลองที่มีต่อทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ของนักเรียนชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 โรงเรียนเซนต์โยเซฟ บางนาจังหวัดสมุทรปราการ. สืบค้นเมื่อ 16 มกราคม 2568, จากhttps://ir.stou.ac.th/bitstream/123456789/4970/1/fulltext_118563.pd

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลเพื่อการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงาน

Development of a Robotic Arm Simulation Model for Pre-Operational Training

ฐานทัพ นนท์ตุลา[1] สุรชัย เหมหิรัญ[1*] วสันต์ เธียรสุวรรณ[1] ประชา บุณยวานิชกุล[2] และณัฐชานันท์ อังศุเศรณี[3]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: surachai.h@mail.rmutk.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลสำหรับการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงานจริง เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถฝึกทักษะการควบคุมเครื่องจักรอุตสาหกรรมได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ โดยใช้การจำลองหุ่นยนต์แขนกลที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม ผ่านโปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรมสำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติ ซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนและข้อต่อที่เชื่อมโยงกันอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งนำโปรแกรมวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมมาใช้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการควบคุมการหมุนของข้อต่อแต่ละตำแหน่ง รวมถึงการตอบสนองของหุ่นยนต์เมื่อได้รับคำสั่งควบคุม แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถศึกษาหลักการควบคุม สร้างความคุ้นเคยกับการใช้งาน และตระหนักถึงความปลอดภัยโดยไม่ต้องใช้เครื่องจักรอุตสาหกรรมจริง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถแสดงผลการควบคุมได้ถูกต้องและสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการฝึกอบรมเชิงวิชาการและพัฒนาทักษะให้ผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: หุ่นยนต์แขนกล, แบบจำลองเสมือน, การฝึกอบรมก่อนปฏิบัติงาน

Abstract

The goal of this research is to create a pre-operational training robotic arm simulation model that will allow users to practice industrial machine control in a safe and efficient manner. The simulation, which was developed using engineering design software to build a 3D model with continuously connected joints and components, is based on industrial robotic arms. Furthermore, a mathematical model that replicates the rotational control of every joint and the robot's reaction to user commands was created using engineering analysis equipment. The resulting simulation allows users to study control principles, gain familiarity with robotic operations, and develop safety awareness without relying on real industrial machinery. The model can be successfully used for operator skill development and academic training, according to test results, which show that it accurately depicts control behavior in line with theoretical principles.

Keywords: Robotic Arm, Simulation Model, Pre-Operational Training,

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิต โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ดังเดิมและยานยนต์พลังงานใหม่ที่มีเพิ่มขึ้น [1] ที่ต้องอาศัยความแม่นยำ ความปลอดภัย และการควบคุมที่ซับซ้อน หุ่นยนต์แขนกล (Robotic Arm) จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิต เช่น การเชื่อมประกอบ การหยอดกาว การพ่นสี การหยิบจับชิ้นส่วน และการติดตั้งระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งล้วนต้องการบุคลากรที่มีความรู้ความเข้าใจ และทักษะเฉพาะทางที่จะสามารถควบคุมหรือแก้ปัญหาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามการฝึกอบรมในสถานการณ์จริงอาจมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ ความเสียหายต่ออุปกรณ์ ค่าใช้จ่าย รวมถึงข้อจำกัดด้านเวลาและทรัพยากร ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์เสมือนจริง (Virtual Robotic Arm Model) จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2] เพื่อใช้สำหรับให้ฝึกอบรมให้ความรู้ที่สัมพันธ์กับทฤษฎีกับผู้ใช้ พนักงานหรือนักศึกษาให้สามารถเรียนรู้ และมีประสบการณ์เบื้องต้นในการทำงานที่ปลอดภัย โดยสามารถฝึกซ้ำได้ตามความต้องการ รวมถึงสร้างความคุ้นเคยกับการทำงานของหุ่นยนต์ก่อนเข้าสู่การฝึกปฏิบัติจริง

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลในรูปแบบสามมิติและพัฒนาแบบจำลองให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของข้อต่อต่างๆ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการผู้วิจัยมีการดำเนินการตามลำดับดังนี้ คือ สร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมช่วย

ออกแบบจากนั้นนำแบบจำลองที่สร้างพัฒนาให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่และท่าทางด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการจำลองหุ่นยนต์แขนกล

การจำลองหุ่นยนต์แขนกล (Robot Arm Simulation) เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญที่ถูกนำมาในภาคการศึกษา การฝึกอบรมและการออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบหุ่นยนต์ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องจักรจริง ซึ่งการจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่ การควบคุม และการตอบสนองของหุ่นยนต์ต่อคำสั่งต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ ทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทั้งนี้ในการจำลองจะประกอบด้วยแบบจำลองสามมิติของโครงสร้างหุ่นยนต์ (3D Robot Structure) ข้อต่อ (Joint) และชิ้นต่อโยง (Links) ที่เชื่อมโยงกันแบบอนุกรมและอาศัยหลักการของจลนศาสตร์ (Kinematics) และจลนพลศาสตร์ (Kinetics) เพื่อคำนวณพฤติกรรมการเคลื่อนที่ที่ดำเนินการผ่านเครื่องมือจำลองทางวิศวกรรม สามารถแบ่งออกเป็น 4 เครื่องมือจำลอง 1) เครื่องมือช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรม เช่นโปรแกรม SolidWorks หรือ โปรแกรม Autodesk Inventor สำหรับใช้สร้างแบบจำลองโครงสร้างสามมิติ 2) เครื่องมือช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เช่น โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3) เครื่องมือช่วยพัฒนาหุ่นยนต์โดยเฉพาะ (Robot Operating System: ROS) และ 4) เครื่องมือสำหรับพัฒนาเกม เช่น Unity ที่มีความเสมือนจริง เทคโนโลยีเหล่านี้ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเสมือนที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจโครงสร้าง การทำงาน การป้อนคำสั่งควบคุม และมีความถูกต้องของการแสดงผลตามหลักทฤษฎี ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับบริบทของการฝึกอบรมก่อนการปฏิบัติงาน

นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือสำเร็จรูปพร้อมใช้งานเพื่อให้ความรู้และการฝึกทักษะการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลที่ถูกพัฒนาขึ้นจากบริษัทผู้ผลิตและผู้จำหน่ายหุ่นยนต์แขนกล ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หุ่นยนต์แขนกลเสมือนจริงจาก RoboDK
ที่มา: https://robodk.com/

2.2 การประยุกต์ใช้แบบจำลองในการฝึกอบรม

การฝึกอบรมหรือการสอนให้ผู้ใช้งานหุ่นยนต์แขนกลก่อนการปฏิบัติงานจริงถือเป็นขั้นตอนสำคัญซึ่งการใช้เครื่องจักรจริงมักประสบปัญหาเรื่องความปลอดภัย ค่าใช้จ่ายสูง และความเพียงพอของเครื่องจักรต่อผู้ใช้งาน การประยุกต์ใช้แบบจำลองจึงเป็นแนวทางที่สามารถเตรียมผู้ใช้งานให้มีความพร้อมก่อนการปฏิบัติงานที่มีประสิทธิภาพชิ้นหนึ่ง ซึ่งมีนักวิจัยที่นำเสนอแนวทางการสอนที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) เป็นการสร้างหุ่นยนต์แขนกลขนาดเล็กที่มีซับซ้อนไม่มากและราคาถูกกว่าแขนกลจริงที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยการให้ผู้เรียนลงมือสร้าง ประกอบชิ้นส่วนรวมถึงสร้างการควบคุมขึ้นมา ดังผู้วิจัยที่นำเสนอหุ่นยนต์แขนกลที่มีข้อต่อจำนวน 2 ข้อต่อ (2DOF) ที่สร้างขึ้นเองเพื่อสอนการสร้างขั้นตอนวิธี (Algorithm) การควบคุมและแสดงภาพมุมข้อต่อแบบต่อเนื่อง (Real time) [3] และในแนวทางเดียวกันชุดการเรียนรู้หุ่นยนต์แขนกลที่มีข้อต่อจำนวน 3 ข้อต่อ (3DOF) ที่สร้างด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ (Computer-aided design: CAD) และพัฒนาการควบคุมด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering: CAE) ที่ต้องมีการวิเคราะห์จลนศาสตร์ไปข้างหน้า และจลนศาสตร์ย้อนกลับ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้การรับรู้ตำแหน่งของวัตถุด้วยสัญญาณภาพจากกล้องที่น่าสนใจ [4] และ 2) เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นตัวช่วยในการสร้างภาพเสมือน ซึ่งวิธีนี้จะเหมาะสมกับการให้ความรู้กับผู้ใช้หรือนักศึกษาจำนวนมาก เพื่อให้เข้าใจการควบคุมในด้านความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและแบบเชิงมุมผ่านการวิเคราะห์ทาง ดังผู้วิจัยที่สอดคล้องกันได้ใช้การจำลองหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ (CAD) โดยแขนกลมีชิ้นต่อโยงและข้อต่อจำนวน 4 ข้อต่อหมุนและจำนวน 5 ข้อต่อหมุนตามลำดับ จากนั้นนำแบบจำลองมาพัฒนาการควบคุมด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) [5] และ [6] ตามลำดับ

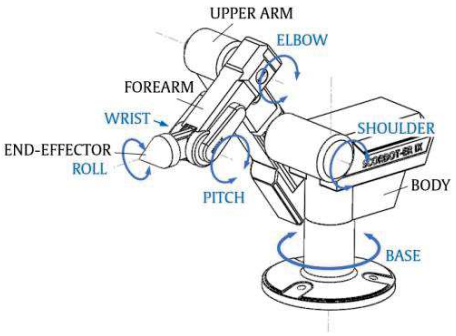
3. ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)

การพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล มีลำดับการดำเนินการ 2 ส่วนหลัก คือการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์อุแขนกล และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังมีรายละเอียดดังนี้

3.1 แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

แนวทางในการสร้างแบบจำลองที่ทำให้ผู้ใช้เห็นภาพการทำงานของหุ่นยนต์แขนกลที่สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริง ซึ่งส่วนให้มีข้อต่อหมุนจำนวน 5 ข้อต่อหมุน ผู้วิจัยใช้แบบจำลองหุ่นยนต์ชื่อ SCORBOT-ER IX ซึ่งต้องทำความรู้จักกับชื่อเรียกพื้นฐานของโครงสร้างหุ่นยนต์แขนกล ชิ้นต่อโยง (Links) ข้อต่อ (Joints) ที่เชื่อมโยงระหว่างชิ้นที่ต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 2 รวมถึงการจำลองแบบหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรมช่วย

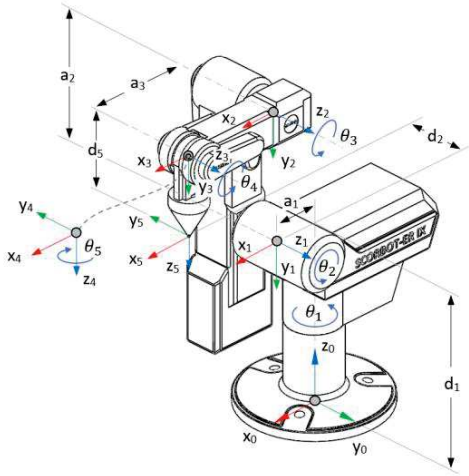
ในการออกแบบ (CAD) ที่สอดคล้องกับข้อมูล ขนาดสัดส่วน ความยาว และขอบเขตที่จำกัดการหมุนที่ไม่ครบรอบ ดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ นอกจากนี้จะต้องมีการกำหนดพิกัดฉากของทีศทางเพื่อเป็นข้อมูลการศึกษาต่อไป ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 หุ่นยนต์แขนกล SCORBOT-ER IX

ตารางที่ 1 รายละเอียดของข้อต่อหมุนต่างๆ

แกน	ชื่อข้อต่อ	การหมุนรอบ	ช่วงการหมุน
1	ฐานหุ่นยนต์ (Base)	รอบฐาน	0° - 276°
2	หัวไหล่ (Shoulder)	หัวไหล่ขึ้น-ลง	0° - 153°
3	ข้อศอก (Elbow)	ข้อศอกขึ้น-ลง	0° - 214°
4	ข้อมือกระดก (Wrist Pitch)	ข้อมือกระดกขึ้น-ลง	0° - 202°
5	ข้อมือหมุน (Wrist Roll)	หมุนข้อมือ	0° - 737°



รูปที่ 3 แบบจำลองหุ่นยนต์จากโปรแกรมช่วยออกแบบ (CAD)

3.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากข้อมูลโครงสร้าง ขนาดสัดส่วน แกนหมุน รวมถึงข้อมจำกัดของมุมของข้อต่อหมุน ทั้งหมดนี้สามารถนำมาพัฒนาแบบจำลองที่ต้องศึกษาถึงการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Kinematics Analysis) คือ จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forword Kinematics: FK) เป็นสมการคำนวณตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก (x, y และ z) ณ ส่วนปลายของแขนกล (End-Effector) จากข้อมูลมุมข้อต่อหมุนต่าง ๆ ที่ต่อเนื่องกัน ในระบบพิกัดเชิงข้ว (θ_1, θ_2, θ_3, θ_4 และ θ_5) ที่อาศัยเทคนิควิธีการกำหนดตัวแปรของ Denavit-Hartenberg Parameter ดังระบุในรูปที่ 3 [7] และนำตัวแปรที่ได้ใส่ลงตารางที่ 2 ร่วมกับการ

ตารางที่ 2 DH พารามิเตอร์

ข้อต่อหมุน (Joint, i)	α_i (rad)	θ_i (rad)	a_i (mm)	d_i (mm)
1	$-\pi/2$	θ_1	a_1	d_1
2	0	θ_2	a_2	$-d_2$
3	0	θ_3	a_3	0
4	$-\pi/2$	θ_4	0	0
5	0	θ_5	0	d_5

เพื่อหาสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์แขนกลต้องอาศัยข้อมูลตาราง DH พารามิเตอร์และใช้การแปลงเมทริกซ์ (Transformation Matrix) ดังสมการที่ 1 แสดงตัวอย่างการแปลงเมทริกซ์ของข้อต่อหมุนที่ 1 โดยแทนค่า i เป็น 1 จะได้ ${}^{0}T_{1}$ ดังสมการที่ 2 และดำเนินการตามลำดับแทนค่า i เป็น 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับได้การแปลงเมทริกซ์ ดังสมการที่ 3 จะได้ผลการคำนวณตำแหน่งพิกัดฉาก ณ ส่วนปลายแขนกลดังสมการที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

$$ {}^{i-1}T_{i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1) $$

$$ {}^{0}T_{1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & a_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & a_1\sin\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) $$

$$ {}^{0}T_{5} = {}^{0}T_{1}\ {}^{1}T_{2}\ {}^{2}T_{3}\ {}^{3}T_{4}\ {}^{4}T_{5} \quad (3) $$

$$ X = {}^{0}p_{5x} = c\theta_1\left[a_1 + a_2c\theta_2 + a_3c\theta_{23} - d_5s\theta_{234}\right] + d_2s\theta_1 \quad (4) $$

$$ Y = {}^{0}p_{5y} = s\theta_1\left[a_1 + a_2c\theta_2 + a_3c\theta_{23} - d_5s\theta_{234}\right] - d_2c\theta_1 \quad (5) $$

$$ Z = {}^{0}p_{5z} = -a_2s\theta_2 + a_3s\theta_{23} - d_5c\theta_{234} + d_1 \quad (6) $$

4. ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์

จากการดำเนินการการพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลจำลองในรูปแบบสามมิติ โดยใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบ (CAD) ในการสร้างโครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนและชิ้นต่อโยงที่เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง การอ้างอิงข้อมูลหุ่นยนต์แขนกลจริง ด้านขนาดสัดส่วนในการกำหนดพารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg ทำให้แบบจำลองนี้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ พร้อมทั้งแสดงภาพเคลื่อนไหวอย่างแม่นยำเมื่อได้รับคำสั่งควบคุมจากผู้ใช้งานหรือผู้เรียน โดยการดำเนินการสร้างสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเพื่อคำนวณตำแหน่ง ณ ส่วนปลายของแขนกล (End-Effector) จากค่ามุมของข้อต่อหมุนแต่ละข้อต่อที่ผู้ใช้กำหนด ผู้วิจัยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) เช่น MATLAB/Simulink ในการคำนวณการแปลงเมทริกซ์ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ณ ส่วนปลายของหุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี

การทดสอบการพัฒนาแบบจำลองเสมือนจริง ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านปุ่มควบคุมโดยตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์จะการตอบสนองเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาจริง

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสามารถนำไปใช้กับผู้ใช้งานหรือนักศึกษาก่อนการลงปฏิบัติงานจริงได้ โดยสามารถจำลองลักษณะโครงสร้าง การเคลื่อนที่และการตอบสนองได้อย่างถูกต้อง ตามหลักทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ นอกจากนี้แบบจำลองดังกล่าวยังช่วยสร้างความเข้าใจในทิศทางการหมุนสร้างความคุ้นเคย ทำให้ผู้ใช้หรือนักศึกษามีความมั่นใจมากขึ้น และเพิ่มความตระหนักถึงการควบคุมที่ผิดพลาดช่วยลดความเสียหายจากการขาดความชำนาญในการใช้ในกรณีใช้กับหุ่นยนต์แขนกลจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนซอฟต์แวร์ หรือโปรแกรมช่วยออกแบบ (CAD) และโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (CAE) ที่มีลิขสิทธิ์ SolidWorks EDU Edition 2010 - 2011 NETWORK Serial Number 25734@rmutk-4c2643252 และ MATLABR2024b 41249753 Academic Teaching Master License 31732827 ตามลำดับจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เอกสารอ้างอิง

[1] Miao, X. and B. Li., "Research on the Development of New Energy Vehicles Based on Multiple Machine Learning Models and the ARIMA Algorithm," 2024 IEEE 6th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 2024, pp. 407-412.

[2] Cohodar Husic, M., et al., "An Approach to Dynamic Modelling of Industrial Robots Based on 3 D Cad Technique," 2023 in International Conference “New Technologies, Development and Applications”, 2023, pp.450-458.

[3] Hernández-Ordoñez, M., et al., "An education application for teachingrobot arm manipulator concepts using augmented reality," in Mobile Information Systems, vol. 1, pp. 6047034, 2018, doi.org/10.1155/2018/6047034

[4] Yildirim, M.Y. and M. Anutgan, "Development of an Industrial Robotic Arm Education Kit Based on Object Recognition and Robot Kinematics for Engineers," in Selçuk-Teknik Dergisi, vol. 19, no. 4, pp. 47-65, 2020.

[5] สุรชัย เหมหิรัญ และคิฐภัทร ตันประดิฐ. (2565). จลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมแมทแลป. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 17(1), 40-52.

[6] สุรชัย เหมหิรัญ, กิตติคม นนท์ประสาท และพงษ์นรินทร์ สว่างวงษ์. (2565). การศึกษาจลนศาสตร์และการสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมแมทแลป. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี*, 6(2), 59-73.

[7] István, T. and H. György, "Direct kinematics of a tilting table using Denavit–Hartenberg convention," in Multidiszciplináris Tudományok, vol.13, no. 4, pp. 163-171, 2023.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องทดสอบการทำงานของบริภัณฑ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า

Testing Device for Electric Vehicle Supply Equipment

ชานนท์ ชูพงษ์* พัชรพร มั่นกิจ ณัฐพล หาอุปละ ณฐภัทร พันธ์คงและ ศิริชัย แดงเอม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
E-mail: charnon.c@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบการทำงานของบริภัณฑ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฟฟ้ากระแสสลับตามมาตรฐาน IEC 61851 โดยเครื่องทดสอบสามารถวัดค่าสัญญาณควบคุมในสภาวะการทำงานต่างๆ เพื่อตรวจสอบการสื่อสารระหว่างบริภัณฑ์จ่ายไฟและยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อประเมินความถูกต้องและปลอดภัย เครื่องทดสอบถูกออกแบบให้มีต้นทุนต่ำ ใช้งานง่าย และเข้าถึงได้สำหรับช่างเทคนิคที่ต้องการเครื่องมือช่วยวิเคราะห์และซ่อมบำรุงบริภัณฑ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า โดยการทดลองเปรียบเทียบเครื่องที่นำเสนอกับเครื่องมาตรฐานที่ใช้งานในท้องตลาดพบว่า อ่านค่าได้ใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทำงานโดยค่าแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 0.7% และค่าดิวตี้ไซเคิลแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 4%

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า, สถานีอัดประจุ, บริภัณฑ์จ่ายไฟ

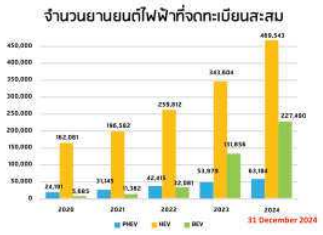
Abstract

This article presents the design and development of a functional tester for electric vehicle supply equipment according to IEC 61851. The tester can measure control signals under different operating states to verify the communication between the supply equipment and the electric vehicle and measure the voltage supplied to the electric vehicle to evaluate its correctness and safety. The tester is designed to be low-cost, easy to use, and accessible to technicians who need a tool to help analyze and maintain the electric vehicle supply equipment. Comparative experiments between the proposed device and a standard commercially available device, it was found that the readings were closely matched under all operating conditions, with a maximum voltage deviation of no more than 0.7% and a maximum duty cycle difference of no more than 4%

Keywords: electric vehicle, charging station, electric supply equipment

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยจากข้อมูลของสมาคมยานยนต์ไฟฟ้าไทย (EVAT) ระบุว่าเมื่อสิ้นปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมียานยนต์ไฟฟ้าพลังงานแบตเตอรี่ (BEV) ที่จดทะเบียนแล้ว สะสมมากกว่า 220,000 คัน โดยเกือบทั้งหมดเป็นยานยนต์ที่จดทะเบียนในปี พ.ศ. 2566-2567 ดังรูปที่ 1 [1] นอกจากนี้ทางภาครัฐยังส่งเสริมการผลิตและใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าตามนโยบาย 30@30 ซึ่งมีเป้าหมายส่งเสริมการผลิตและใช้ยานยนต์ที่ปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ (Zero Emission Vehicle : ZEV) ให้ได้ 30% ภายในปี ค.ศ.2030 ซึ่งคิดเป็นจำนวนรถยนต์นั่งและรถกระบะ 440,000 คัน [2] จากข้อมูลดังกล่าวทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าในอีก 5-6 ปีข้างหน้าในประเทศไทยจะมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าหลายแสนคัน ผลที่ตามมาคือจำนวนสถานีอัดประจุต้องมีเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าตามบ้านพักอาศัยซึ่งเป็นการอัดประจุที่เกิดขึ้นมากที่สุดสำหรับผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า เครื่องอัดประจุเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นบริภัณฑ์จ่ายไฟให้กับยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle Supply Equipment: EVSE) ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้มั่นใจถึงความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการใช้งาน ปัญหาที่พบคือ ในปัจจุบันอุปกรณ์ตรวจสอบ EVSE ดังกล่าว มักมีราคาสูง ทำให้ช่างเทคนิคหรือผู้ใช้งานทั่วไปเข้าถึงได้ยาก ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและค่าใช้จ่ายสูงในการดูแลรักษาอุปกรณ์เหล่านี้

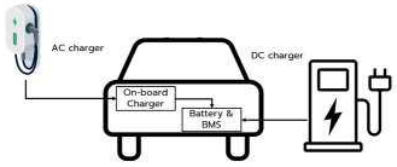


รูปที่ 1 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนสะสมในประเทศไทย [1]

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว บทความนี้จึงได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องทดสอบการทำงานของ EVSE ที่มีต้นทุนต่ำและสามารถใช้งานได้ง่าย โดยออกแบบให้สามารถทดสอบการทำงานและการสื่อสารตามมาตรฐาน IEC 61851-1 [3] เครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยให้ช่างเทคนิคท้องถิ่นหรือผู้ใช้งานสามารถทำการตรวจสอบเบื้องต้นได้เอง ลดความจำเป็นในการพึ่งพาอุปกรณ์ราคาแพงและผู้เชี่ยวชาญจากภายนอก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการศึกษาและการฝึกอบรมเพื่อเพิ่มทักษะของช่างเทคนิคในอนาคตได้อีกด้วย

2. ข้อมูลพื้นฐาน

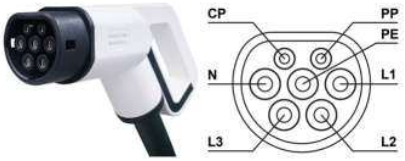
การอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันอาศัยแหล่งจ่ายไฟฟ้าอยู่ 2 รูปแบบ [3] ดังรูปที่ 2 คือ 1) ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC charge) อัดประจุผ่านอุปกรณ์ on-board charger ที่อยู่ในรถยนต์ และ 2) ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC charge) อัดประจุแบตเตอรี่โดยตรง ซึ่งโดยปกติจะให้กำลังไฟฟ้าสูงกว่า AC charge และมักเรียกวิธีการนี้ว่าการอัดประจุแบบเร็ว (Fast charge) ซึ่งในบทความนี้จะนำเสนอเครื่องทดสอบ EVSE ที่ทำงานอัดประจุแบบ AC charge เท่านั้น ซึ่ง EVSE นี้ทำหน้าที่ตรวจสอบความปลอดภัยและจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ On-board charger ส่วนการควบคุมการอัดประจุจะเป็นหน้าที่ของ On-board charger และระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ (BMS) ที่อยู่ภายในรถยนต์



รูปที่ 2 การอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าแบบ AC charge และ DC charge

หัวชาร์จแบบ AC ที่ใช้งานกันในระเทศไทย เป็นหัวชาร์จตามมาตราฐาน IEC 62196-2 หรือที่เรียกกันว่า AC Type 2 ดังรูปที่ 3 ซึ่งรองรับการอัดประจุแบบ Single-phase (230V) และ Three-phase (400V) ที่มีกำลังไฟสูงสุดถึง 43 kW [4] หัวชาร์จนี้ประกอบด้วยขาเชื่อมต่อหลักได้แก่

- L1 (L2, L3) เป็นขาเฟสสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้รถยนต์ หากเป็นระบบเฟสเดียวจะใช้แค่ขา L1
- N เป็นขานิวทรัลสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้รถยนต์
- Control Pilot (CP) เป็นขาที่ใช้สื่อสารระหว่างรถยนต์ไฟฟ้ากับ EVSE โดยสัญญาณที่ใช้สื่อสารเป็นสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ความถี่ 1 kHz โดยสร้างขึ้นจาก EVSE
- Proximity Pilot (PP) เป็นขาที่ใช้ตรวจสอบว่ามีการเสียบหัวชาร์จอยู่กับรถ และบอกพิกัดของสายไฟที่ใช้อัดประจุ



รูปที่ 3 หัวชาร์จแบบ AC Type 2

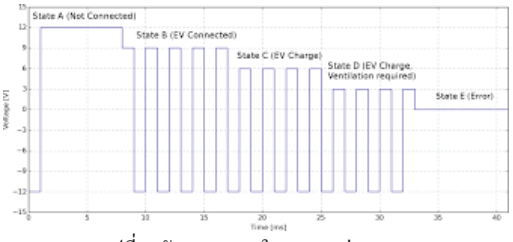
ในมาตรฐาน IEC 61851-1 ได้กำหนดให้ EVSE ต้องมีฟังก์ชันการทำงาน 4 ข้อดังนี้ [3]

1) ต้องมีการตรวจสอบว่ารถยนต์มีการเชื่อมต่อ
2) มีการตรวจสอบการเชื่อมต่อของสายดินอย่างต่อเนื่อง
3) เริ่มการจ่ายกระแสไฟฟ้า
4) หยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า

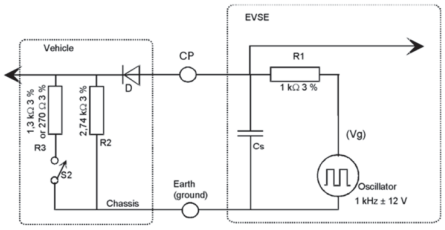
โดยในข้อที่ 1 ขาสัญญาณ PP ทำหน้าที่ดังกล่าว ส่วนในข้อที่ 2 ใช้วิธีการที่สัญญาณควบคุมที่ขา CP ต้องวัดเทียบกับขา PE (สายดิน) หากสายดินขาดหรือหลุดสัญญาณควบคุมจะหายไปทำให้ EVSE ตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า ส่วนในข้อที่ 3 และ 4 ตามมาตรฐานได้มีการกำหนดสภาวะการทำงานของ EVSE ไว้ 5 สภาวะ (State) โดยแต่ละสภาวะจะมีระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ CP แตกต่างกันดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4 ซึ่งวิธีการปรับค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะดำเนินการโดยวงจรแบ่งแรงดันที่มีการปรับค่าความต้านทานโดยยานยนต์ที่เชื่อมต่อตัวอย่างดังรูปที่ 5

ตารางที่ 1 ระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ CP และสภาวะการทำงาน

สภาวะ	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด	คำอธิบาย
State A	12 V	n/a	ไม่มีการเชื่อต่อ, ไม่มีสัญญาณ PWM, ขา CP ให้สัญญาณ DC
State B	9 V	-12 V	รถยนต์เชื่อมต่อกับ EVSE โดยยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า
State C	6 V	-12 V	EVSE จ่ายกระแสไฟฟ้าให้รถยนต์
State D	3 V	-12 V	EVSE จ่ายกระแสไฟฟ้า ให้รถยนต์โดยเป็นการอัดประจุที่ต้องการการระบายอากาศ
State E	0 V	0V	เกิดความผิดพลาด, EVSE ตัดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4 สัญญาณ CP ในสภาวะต่างๆ [5]



รูปที่ 5 ตัวอย่างวงจรการเชื่อต่อสัญญาณ CP ระหว่าง EVSE กับ ยานยนต์

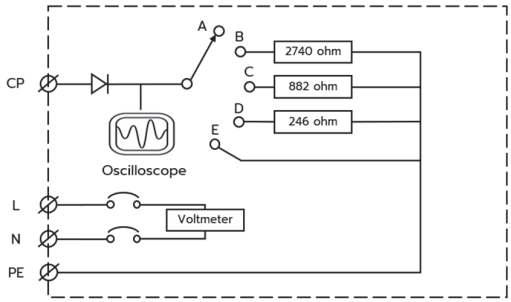
นอกจากนี้ค่า Duty cycle สัญญาณ CP ยังเป็นตัวบอกความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของ EVSE โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 2 ซึ่ง EVSE แบบติดผนังส่วนมากจะจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดประมาณ 30 แอมแปร์ ดังนั้นสัญญาณ CP จะมี duty cycle ที่ 50%

ตารางที่ 2 Duty cycle ของสัญญาณ CP และกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายได้

Duty cycle	กระแสไฟฟ้าสูงสุด
5 ±2%	สำหรับการอัดประจุด้วยไฟฟ้ากระแสตรง และสื่อสารด้วย Power Line Communication
10% ถึง 85%	6 A ถึง 51 A กระแสไฟฟ้าสูงสุด = 0.6 × %duty cycle
85% ถึง 96%	52 A ถึง 80 A กระแสไฟฟ้าสูงสุด = 2.5 × (%duty cycle – 64)

3. เครื่องทดสอบที่นำเสนอ

เครื่องทดสอบที่นำเสนอนี้เป็นการเชื่อมต่อกับ EVSE เพื่อวัดและแสดงผลสัญญาณ CP โดยตัวเครื่องจะจำลองสภาวะต่างๆ ของยานยนต์ไฟฟ้าดังตารางที่ 1 และผู้ใช้งานจะดูลักษณะของสัญญาณ CP รวมถึงการต่อวงจรของ EVSE เพื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ยานยนต์ไฟฟ้า บล็อคไดอะแกรมของเครื่องทดสอบนี้ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อคไดอะแกรมของเครื่องทดสอบที่นำเสนอ

จากรูปที่ 6 เครื่องทดสอบเชื่อมต่อกับ EVSE ผ่านเต้ารับแบบ AC Type 2 สายจากขั้วต่อ L, N จะต่อผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์เข้าโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ EVSE จ่ายให้ On-board charger ในยานยนต์ ส่วนสัญญาณ CP จะต่อผ่านไดโอดและผ่านสวิตช์ทางเลือก (Selector switch) ตัวต้านทานเพื่อปรับสภาวะการทำงาน (State) ตามวงจรในรูปที่ 5 สัญญาณ CP ที่วัดคร่อมตัวต้านทานดังกล่าวจะถูกแสดงผลบนออสซิลโลสโคปเพื่อดูค่า duty cycle และระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 7 เครื่องทดสอบที่นำเสนอ

การใช้งานเครื่องทดสอบเริ่มจากเสียบหัวชาร์จ เลือกสวิตช์ CP มาที่ตำแหน่ง A แล้วเริ่มทำการชาร์จโดยการแตะบัตรหรืออื่นๆ สังเกตค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งต้องได้ 0 โวลต์เนื่องจากยังไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าและไม่มีสัญญาณ PMW บนจอออสซิลโลสโคป ต่อมาให้เลือกตำแหน่ง B สังเกตค่า PMW ต้องได้ +9V/-12V, duty cycle คำนวณแล้วต้องได้ตามพิกัดกระแสของ EVSE และค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งต้องได้ 0 โวลต์ ต่อมาเลือกตำแหน่ง C หรือ D สังเกตค่า PMW ต้องได้ตามตารางที่ 1 และค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งต้องได้ประมาณ 220 โวลต์เนื่องจากมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าแล้ว สุดท้ายเลือกตำแหน่ง E ค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งต้องได้ 0 โวลต์เนื่องจากสัญญาณ CP หายจึงมีการตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า

4. การทดลองและผลการทดลอง

ผู้เขียนได้ทดลองใช้งานเครื่องทดสอบที่นำเสนอในบทความนี้ โดยนำไปทดสอบการทำงานของ EVSE ขนาด 7kW (220 โวลต์ 32 แอมแปร์) ยี่ห้อ NETA และได้เปรียบเทียบลการทดสอบกับเครื่องทดสอบ EVSE มาตรฐานยี่ห้อ HT รุ่น MACRO EV TEST โดยทดสอบใน State A, B, C, D และ E ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3



รูปที่ 8 การทดสอบกับ EVSE



รูปที่ 9 เครื่องทดสอบมาตราฐานที่ใช้เปรียบเทียบ

ตารางที่ 3 ผลการทดลอง

State	เครื่องที่นำเสนอ			เครื่องมาตรฐาน		
	CP Voltage	CP Duty cycle	Vout	CP voltage	CP Duty cycle	Vout
A	0 / 0	n/a	0	0 / 0	n/a	0
B	+8.95 / -11.92	53	0	+9.00 / -12.00	55	0
C	+6.03 / -11.96	53	229	+6.00/ -12.00	55	230
D	+3.02 / -11.96	53	229	+3.00/ -12.00	55	230
E	0	n/a	0	0	n/a	0

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ที่ทำการเปรียบเทียบเครื่องทดสอบที่นำเสนอกับเครื่องทดสอบมาตรฐาน เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า CP ซึ่งหมายถึงค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณ PWM ค่า Duty cycle ของสัญญาณ CP และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ยานยนต์ไฟฟ้าในสภาวะการทำงานต่างๆ คือสภาวะ A, B, C, D, E พบว่าเครื่องทดสอบทั้ง 2 อ่านค่าแรงดันไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกันและยังใกล้เคียงกับตารางที่ 1 ที่เป็นค่าตามมาตรฐาน ส่วนค่า Duty cycle เครื่องทดสอบที่นำเสนออ่านได้ 53% ซึ่งคิดเป็นค่าพิกัดกระแส 31.8 แอมแปร์ ส่วนเครื่องมาตรฐานอ่านได้ 55% ซึ่งคิดเป็นค่าพิกัดกระแส 33 แอมแปร์ซึ่งใกล้เคียงกัน

5.สรุป

เครื่องทดสอบการทำงานของบริภัณฑ์จ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้าที่นำเสนอในบทความนี้มีการติดตั้งออสซิลโลสโคปเพื่อวัดสัญญาณ CP ติดตั้งโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ยานยนต์ไฟฟ้า และมีสวิตช์ทางเลือกเพื่อจำลองสภาวะการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้าในการอัดประจุ โดยใช้วงจรอย่างง่ายเพื่อให้ต้นทุนในการสร้างต่ำ จากผลการทดลองเครื่องทดสอบที่นำเสนอและเครื่องทดสอบมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบสามารถอ่านค่าได้ใกล้เคียงกันในทุกสภาวะการทำงานโดยค่าแรงดันไฟฟ้ามีความแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 0.7% และค่า Duty cycle แตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 4%

เอกสารอ้างอิง

[1] Electric Vehicle Association of Thailand, "Current status of electric vehicles in Thailand," EVAT. [Online]. Available: https://evat.or.th/ev-information/current-status/index. [Accessed: Mar. 7, 2025].

[2] Thai Smart Grid, "แผนส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้า 3030 (EV 3030 Policy)." [Online]. Available: https://thai-smartgrid.com/ev-3030-plan/. [Accessed: Mar. 7, 2025].

[3] International Electrotechnical Commission, “IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements,” IEC, 2017.

[4] International Electrotechnical Commission, “IEC 62196-2:2016 Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles – Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories,” IEC, 2016.

[5] V. Schwarzer and R. Ghorbani, “Current state-of-the-art of EV chargers,” Report No. HNEI-01-15, Hawaii Natural Energy Institute, University of Hawaii at Manoa, Feb. 2015.

The Development of a Fault Detection Notification System Model for Street Lighting

Veerapatra Wangsilabatra[1] Peerapon Chanhom[1] Puttipong Ratanatikanon[2] Chitsanucha Loicharoenphon[2] Chanathip Saengchan[2]
Keerati Kongwattanathaworn[2] Sukan Chotwutthiphan[2] Peerawit Chaiareekij[2] Tannawat Wongsawang[3] and Promphak Boonraksa[*4]

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

[2]Department of Electrical Power and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3]Design and Estimation Department Metropolitan Electricity Authority Bang Yai

[*4]Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

E-mail: promphak.b@rmutsb.ac.th[*]

Abstract

The objective of this study is to present a relay status indicator system integrated with a notification mechanism through LINE Notify, enabling users to remotely monitor the status of a relay. The proposed system comprises a simulated circuit that incorporates three indicator lights: a green light representing the power supply status, a yellow light denoting the signal status, and a red light indicating the load status. A microcontroller facilitates the transmission of signals and the delivery of notifications to users via LINE Notify. Voltage measurement data is collected using the PZEM-004T device, and once obtained, the data is transmitted through the TX/RX port to an ESP32 microcontroller. This device subsequently forwards the data to LINE Notify, allowing users to receive real-time updates regarding the relay's status and enabling them to take appropriate actions when necessary. Experimental results demonstrate that the system effectively measures voltage and delivers notifications through LINE Notify with high efficiency.

Keywords: Relay, Microcontroller, LINE Application, Internet of Things

1. Introduction

Currently, street lighting systems play a crucial role in enhancing road safety for users, especially during nighttime and in low-light conditions such as heavy rain or dense fog. Traditional streetlight control methods, which rely on manual labor or timer-based systems, often face limitations in terms of accuracy, delay, and inconsistency in operation. These shortcomings can lead to issues such as excessive energy consumption or insufficient illumination during critical periods. With advancements in technology, the development and installation of street lighting systems capable of automatic on-off control, utilizing relays in conjunction with sensors such as light sensors or motion sensors, have significantly improved operational efficiency. This innovation helps optimize energy usage, ensuring that lighting is activated only when necessary while maintaining reliable and consistent performance [1-3] for instance, light sensors and motion sensors play an essential role in enhancing the operational efficiency of street lighting systems [4-8]. These sensors allow the system to reduce electricity consumption during periods of non-necessity while keeping operations stable and efficient. The adoption of relay-based automatic on-off controls in street lighting systems has emerged as an effective approach to enhancing energy conservation, safety, and system reliability. This system plays a crucial role in fostering sustainable societal and environmental development over the long term. However, the maintenance and management of street lighting systems still largely rely on public notifications. In the event of equipment failure, such as burnt-out bulbs or faulty relays, system administrators are often unaware of the problem until complaints are raised by residents or road users. Such delays in problem detection and resolution may jeopardize public safety and contribute to dissatisfaction among road users. Moreover, troubleshooting in large areas remains a time-consuming and resource-intensive process.

An effective solution to this issue is the installation of transmitters to integrate street lighting systems with the Internet of Things network. In the event of anomalies, such as lamp failures or relay malfunctions, the transmitters will immediately send alert notifications to the control center or relevant personnel in real time, eliminating the need for public reporting. This approach significantly reduces inspection time, enhances accuracy, and improves maintenance efficiency. Consequently, the system operates continuously and with greater stability, ultimately enhancing road safety and public confidence.

2. Methodology

2.1 Design of Circuits for Street Lighting Systems

The circuit design for street lighting systems is represented as a single-line diagram, as illustrated in Figure 1.

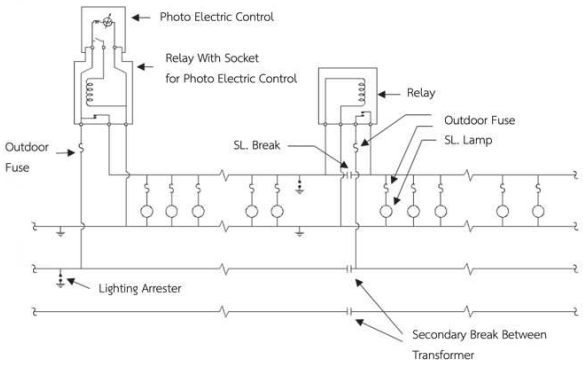


Figure 1. Single-Line Diagram of the Street Lighting System

As illustrated in Figure 1 , the left section of the diagram represents the photoelectric control system, which includes a photo control switch utilizing a Light Dependent Resistor (LDR) to detect light intensity variations. Changes in light intensity cause corresponding shifts in resistance, where lower light intensity increases resistance, and higher intensity decreases it, subsequently affecting the circuit voltage. This voltage variation is used to control relay operation based on day and night cycles. The system incorporates streetlight units connected between the streetlight line (SL) and the neutral line (N). At night, the contact switch shifts, allowing current to flow through the streetlight line, illuminating the lamps. However, excessive lamp connections may lead to overcurrent conditions. To mitigate this issue, a relay, as depicted on the right side of Figure 1, is integrated into the circuit. The relay operates by opening and closing its contacts in response to signals from the streetlight line, depending on the functionality of the photoelectric control system. To prevent overcurrent, different phase lines are routed through the relay, ensuring operation within the device's current tolerance limits. By properly connecting the streetlight fixtures, the system maintains safe current levels, enhancing both reliability and efficiency in street lighting operations.

2.2 Connection to the Voltage Measurement Device

Figure 2 shows that circuit integration for voltage measurement plays a crucial role in ensuring the reliable operation of electrical devices. In this work, a circuit was designed to operate in conjunction with an indicator light and a PZEM-004T power monitoring module, which is capable of measuring AC voltage.

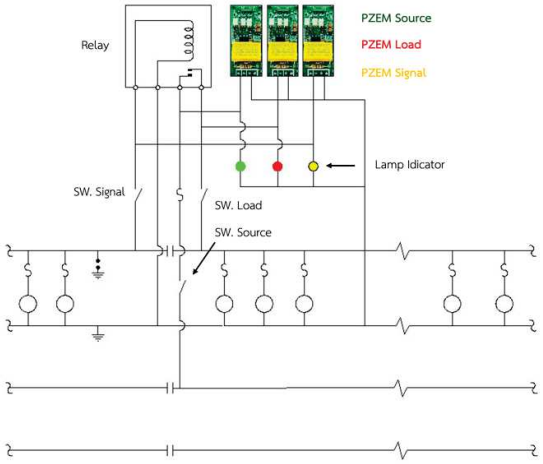


Figure 2. Circuit integration Diagram for voltage measurement.

The measured data is then transmitted to an ESP32 microcontroller for processing. Subsequently, the voltage information is forwarded to the Line Notify platform, enabling real-time alerts to users regarding the current status of the relay. This system enhances the monitoring capabilities by providing immediate and accessible updates, thereby improving the overall efficiency and responsiveness of electrical system management under dynamic conditions.

3. Results

3 .1 Evaluation of Status Indication via a Three-Color Indicator Lamp.

The model of the street lighting anomaly detection system is illustrated in Figure 3.

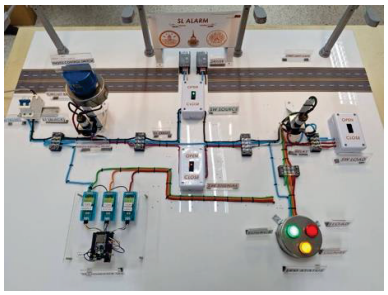


Figure 3. The system status indicator operates normally.

As shown in Figure 3, the three indicator lamps — green for the power supply, yellow for the signal, and red for the load — effectively represent the real-time status of the street lighting system. The

illumination of these indicators signifies the absence of abnormalities, ensuring the proper operation of the circuit.

3.2 Operation of the Alert System via LINE Notify

Once the PZEM-004T device measures the voltage at each point, the microcontroller processes the data and verifies the system status. If voltage is detected at the Source, Signal, and Load points, LINE Notify will transmit the voltage readings for each location. In the event of a signal loss at any point, that location will display "nanV," indicating the absence of a detectable signal.



Figure 4. Notification Messages via the LINE Notify System

Overall, integrating three voltage measurement devices with a microcontroller and transmitting data to LINE Notify or other alert systems enables continuous monitoring of the electrical system. This configuration enables users to continuously monitor system performance in real time and receive instant notifications of any anomalies or malfunctions, ensuring prompt and effective troubleshooting.

3.3 Testing the Notification System via LINE Notify

This section presents the results of testing the notification system via LINE Notify, categorized into five case studies.

Case 1 represents a scenario where no abnormalities are detected within the system.

Case 2 considers two possible issues: a malfunctioning relay that fails to supply power to the load or a mechanical failure in the relay's output terminal.

Case 3 also involves two possible failures: either the photoelectric relay is malfunctioning and does not allow power to pass through, or there is a disconnection or loose connection in the wiring between the photoelectric relay and the main relay.

Case 4 mirrors the diagnostic patterns of Cases 2 and 3, identifying two potential issues: a tripped main breaker or a blown fuse, preventing power distribution, or an insufficient backup power supply that is unable to sustain the load. Finally,

Case 5 represents a complete power outage across the system, caused by a total failure of the main breaker and fuses, a malfunction in the primary power supply unit, or severe damage to a critical circuit.

Table 1: Notification System via LINE Notify

Case: Green, Yellow, and Red Indicators Illuminated					
No.	PZEM-004T			Notification Status	
	Source	Signal	Load	Alert	No Alert
1.	228.50V	228.00V	228.30V	✓	
2.	228.50V	228.10V	228.40V	✓	
Case: Green and Yellow Indicators Illuminated, Red Indicator Off					
No.	PZEM-004T			Notification Status	
	Source	Signal	Load	Alert	No Alert
1.	228.80V	228.40V	nanV	✓	-
2.	228.80V	228.40V	nanV	✓	-
Case: Green Indicator Illuminated, Yellow and Red Indicators Off					
No.	PZEM-004T			Notification Status	
	Source	Signal	Load	Alert	No Alert
1.	229.60	nanV	nanV	✓	-
2.	229.10	nanV	nanV	✓	-

Case: Yellow Indicator Illuminated, Green and Red Indicators Off					
No.	PZEM-004T			Notification Status	
	Source	Signal	Load	Alert	No Alert
1.	nanV	229.20V	nanV	✓	-
2.	nanV	229.30V	nanV	✓	-
Case: Green, Yellow, and Red Indicators Off					
No.	PZEM-004T			Notification Status	
	Source	Signal	Load	Alert	No Alert

1.	nanV	nanV	nanV	✓	-
2.	nanV	nanV	nanV	✓	-

According to Table 1, the notification system operates efficiently within the designated time frame, achieving 100% accuracy in notifications with a 0% margin of error.

4. Conclusion

This research study has been conducted in accordance with the defined objectives and scope. An in-depth investigation into the status monitoring system for street lighting revealed that integrating technology into the inspection and notification process significantly reduces delays in incident reporting and enhances the efficiency of electrical system maintenance. The developed system incorporates LED indicators to display circuit operation status at various points, along with the installation of voltage measurement sensors to monitor voltage levels at key locations. The collected data is then transmitted to an ESP32 microcontroller, which promptly sends notifications via LINE Notify to relevant personnel upon detecting any irregularities. The experimental results demonstrate that utilizing LED indicators enhances the clarity of circuit status monitoring, with green, yellow, and red lights effectively representing different electrical states. Furthermore, the integration of the PZEM-004T device improves the accuracy of voltage measurements at critical points, reducing reliance on conventional relay disassembly for inspections. This advancement streamlines maintenance processes and enhances the overall efficiency of street lighting system management.This research was conducted in the form of a virtual simulation, utilizing actual hardware components assembled within the experimental setup. However, the system has not yet been tested in real environments. Therefore, it has the potential to be implemented in practical applications in the future.

References

[1] Jetanan Chueachan, “Temperature and Humidity Monitoring System in Server Room Using IoT,” Research Project Funded by Revenue Budget, Computer Center, Burapha University, 2019.

[2] Chirawat Thongkaemkaeo, “The Application of Internet of Things Technology in Smart Dust-Fall Jarr,” Environmental Engineering Program, Naresuan University, 2022.

[3] Janyaporn Jantachumni, “Development of Long Distancing Control and Alarm System for Street Light Maintenance Using LoRa” lectrical and Computer Engineering Program, Mahasarakham University, 2022.

[4] Chinawat Ngamwannakorn, Suthat Rungrawiwon and Amornthep Maniniam “Development of a Small Plant-based Device Control System with Wireless Technology Through Mobile Applications on the Internet of Things Concept”, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yala Rajabhat University, 2018.

[5] Sawitree Wongnoon, “The Application of ICT for Sending Notification Using Line Notify API During COVID-19 Breakout ”, Pakchomthong Academic Journal, 9(3), 2020, Issue No. 1, pp. 178-187, December 2020.

[6] InovatorsGuru. (2019). PZEM-004T V3.0 User Manual [Online]. Available https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/06/PZEM-004T-V3.0-Datasheet-User-Manual.pdf Access:

[7] DigiKey. (2015). ESP32-WROOM-32 [Online]. Available https://www.digikey.be/htmldatasheets/production/3271422/0/0/1/esp32-wroom-32-datasheet.pdf Access:

[8] Naichangmashare. (2020). IoT (Internet of Things) – inside industrial factories [Online]. Available https://naichangmashare.com/2020/11/27/iot-industry/ Access:

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุ

Intelligent Walking Support System For The Elderly

วารินี วีระสินธุ์[1] ภาวนา ชูศิริ[2] อนุชา ไชยชาญ[3] นราธิป มีศาสตร์ พสุพร ศักดิ์วธารักษ์ สิริพงษ์ เพชรนาค และ พิสิฐ สอนละ[4*]

[1,2,3,4]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: pisit.s@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะขับเคลื่อน 2 ล้อหน้าสำหรับผู้สูงอายุ โดยใช้บอร์ด NodeMCU ควบคุมระบบแจ้งเตือนการล้มผ่านแอปพลิเคชันไลน์และมีการส่งเสียงแจ้งเตือน ระบบการควบคุมการนับก้าวเดินจากเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุและส่งข้อมูลจัดเก็บไป Google Sheet และระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยวที่ควบคุมผ่านโมดูล Jostick เพื่อควบคุมทิศทาง สามารถแจ้งเตือนการหกล้มโดยการส่งข้อความแจ้งเตือนไปยัง LINE และส่งเสียง Alarm ขอความช่วยเหลือเมื่อเกิดการล้มระหว่างการใช้งาน

ผลการทดสอบ พบว่า ระบบการแจ้งเตือนมีประสิทธิภาพเท่ากับ 88.87% ซึ่งมีค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำสามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ว่า ค่าความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจจับการล้มมีการทำงานซ้ำที่ใกล้เคียงกันทำให้มีความแม่นยำสูง และค่าความถูกต้องการตรวจจับการล้มมีความสัมพันธ์กับค่าความไวที่ได้รับจากเซนเซอร์สามารถทำงานได้ถูกต้อง ระบบการนับก้าวเดิน พบว่า การตรวจจับการนับก้าวเดินมีความถูกต้องเท่ากับ 70% และมีการส่งข้อมูลไปจัดเก็บบน Google Sheet มีความถูกต้องเท่ากับ 80% และระบบการควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยวสามารถบังคับทิศทางในการเลี้ยวได้ทั้ง 4 ทิศทาง

คำสำคัญ: ระบบควบคุม, การช่วยพยุงเดิน, ผู้สูงอายุ

Abstract

This research focuses on the design and development of an intelligent two-wheel, front-wheel drive walking support system for the elderly. The system utilizes a NodeMCU microcontroller board to implement several key features: a fall warning system with notifications sent via the LINE application and audible alerts, a step counting system based on an object detection sensor with data storage in Google Sheets, and a motor and turning control system managed through a joystick module for directional control. The system is designed to detect and alert users of falls by sending warning messages to LINE and triggering an alarm sound for assistance during use.

The testing results demonstrate the following: the alert system achieved an efficiency of 88.87%, exhibiting analyzable accuracy and precision. The fall detection device showed consistent repeatability, resulting in high accuracy. The accuracy of fall detection is directly related to the sensitivity values obtained from the sensor and its proper functionality. The step counting system recorded an accuracy of 70%, while data storage on Google Sheets reached 80% accuracy. The motor control and turning system successfully controlled the turning direction in all four intended directions

Keywords: Control system, Walking aids, Elderly

1. บทนำ

ประเทศไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 และนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมาประเทศไทยก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างสมบูรณ์ และคาดว่าจะเป็นสังคมผู้สูงอายุระดับสูงสุดในปี พ.ศ. 2578 [1] ปัญหาสุขภาพเป็นผลกระทบสำคัญที่เกิดขึ้นในวัยผู้สูงอายุ ทำให้สุขภาพร่างกายเสื่อมโทรมไม่แข็งแรง มีปัญหาการเคลื่อนไหว ซึ่งส่งผลต่อการทำกิจวัตรประจำวัน [2],[3] จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยเหลือผู้สูงอายุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้อย่างปลอดภัย [4] อุปกรณ์เคลื่อนย้ายหรือช่วยในการทรงตัวมีหลากหลายรูปแบบ [5] เครื่องช่วยเดินแบบมีล้อเป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพร่างกายของผู้ที่มีปัญหาในการทรงตัวและการเดิน [6] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุให้มีการแจ้งเตือนไปสู่ญาติ และผู้ดูแลได้อย่างทันทีหากเกิดการหกล้ม ด้วยเทคโนโลยีด้านการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ (IoT)

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประยุกต์ใช้งานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และ NodeMCU ในระบบควบคุมแบบฝังตัว

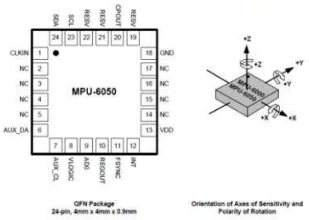
ระบบควบคุมแบบฝังตัวได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเทคโนโลยีต่างๆ รอบตัว ตั้งแต่เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน อุปกรณ์ทางการแพทย์ ระบบอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม ไปจนถึงยานยนต์และอากาศยาน หัวใจสำคัญของระบบควบคุมแบบฝังตัวคือไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ออกแบบมาเพื่อควบคุมการทำงานของระบบเฉพาะเจาะจง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino และ NodeMCU ได้รับความนิยมอย่าง

แพร่หลายในฐานะแพลตฟอร์มโอเพนซอร์สที่เข้าถึงง่ายและมีความสามารถหลากหลาย เหมาะสำหรับการพัฒนาต้นแบบ การเรียนรู้ และการใช้งานจริงในระบบควบคุมแบบฝังตัวที่หลากหลาย [7],[8]

NodeMCU เป็นบอร์ดที่สร้างขึ้นจาก ESP8266 Wi-Fi SoC (System-on-a-Chip) จาก Espressif Systems รวมไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับวิทยุ Wi-Fi ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย โดยมีคุณสมบัติของ NodeMCU คือการรองรับ Wi-Fi (802.11 b/g/n) ในตัว ซึ่งทำงานที่ความถี่ 2.4 GHz ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งาน IoT (Internet of Things) ซึ่ง ESP8266 สามารถทำงานได้ในสามโหมด Wi-Fi หลัก โหมด Station (STA) ซึ่งเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi ที่มีอยู่ โหมด Soft Access Point (AP) ซึ่งสร้างเครือข่าย Wi-Fi ของตัวเองเพื่อให้อุปกรณ์อื่น ๆ สามารถเชื่อมต่อได้ (จำกัดจำนวนสถานี โดยทั่วไปคือ 5 สถานี) และโหมดที่รวมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน (STA+AP) นอกจากนี้ยังมี TCP/IP stack ในตัว ทำให้สามารถสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ตโดยตรง [9],[10],[11],[12]

2.2 ระบบตรวจจับการล้มและวิธีการประเมินความแม่นยำของระบบ

ระบบการตรวจจับการล้มที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำมีความสำคัญอย่างยิ่ง มีเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งและโมดูลไจโรสโคปที่เป็นส่วนประกอบของระบบตรวจจับการล้ม เซนเซอร์มีการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเปลี่ยนแปลงทิศทางสามารถวัดความเร่งตามแนวแกนตั้งฉากหนึ่ง สอง หรือสามแกน โมดูล MPU6050 เป็นบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ที่รวมองค์ประกอบทั้งสองนี้เข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงในตำแหน่งขององค์ประกอบและทำให้สามารถสร้างปฏิกิริยาได้ [13] โมดูลนี้มี 6 แกน ประกอบด้วย การวัดความเร่ง X, Y และ Z แบบ 3 แกนและการวัดการหมุนวน 3 แกน เพื่อวัดความเร็วเชิงมุม การวางตำแหน่งโมดูลและทิศทางการหมุนสำหรับการวัด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างโมดูล MPU6050

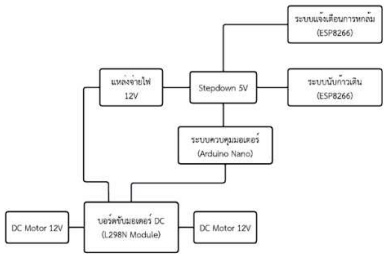
การประเมินความแม่นยำของระบบตรวจจับการล้ม มีตัวชี้วัดประสิทธิภาพความแม่นยำการล้ม ประกอบด้วย ความไว (Sensitivity) ความจำเพาะ (Specificity) และความแม่นยำ (Precision) ซึ่งสามารถคำนวณประสิทธิภาพ (F1) ได้ดังนี้ (1) [14]

$$F1 = (2 * (Precision * Sensitivity) / (Precision + Sensitivity)) \quad (1)$$

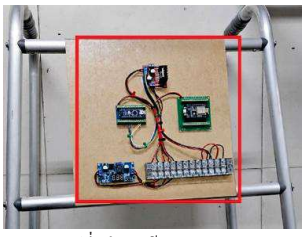
ความไวและความจำเพาะเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของระบบตรวจจับการล้ม ความไวสูงช่วยให้มั่นใจได้ว่าการล้มจะถูกตรวจพบอย่างน่าเชื่อถือ ดังนั้น ระบบตรวจจับการล้ม ในการใช้เซนเซอร์ตรวจจับมีแนวโน้มที่ดี สามารถวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนที่และการหมุนของร่างกายเพื่อตรวจจับการล้มได้ เพื่อปรับปรุงอัลกอริทึมและการวางตำแหน่งเซนเซอร์เพื่อเพิ่มความแม่นยำ

3. การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะขับเคลื่อน 2 ล้อหน้าสำหรับผู้สูงอายุ

คณะผู้วิจัยดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนของตัวอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และส่วนของระบบการทำงานของเซนเซอร์ในชิ้นงาน การเขียนโปรแกรมในขั้นตอนแรกเขียนส่วนระบบแจ้งเตือนการล้ม ซึ่งทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์ MPU6050 และส่งของข้อมูลเพื่อให้ Buzzer และ ระบบ LINE Notify ทำงาน ขั้นตอนที่สองเขียนส่วนของระบบนับก้าวเดิน ซึ่งทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ E18-D80NK และส่งข้อมูลไปจัดเก็บใน Google Sheet และขั้นตอนสุดท้ายเขียนส่วนของระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว ซึ่งทำการอ่านค่าจากโมดูล L298N สำหรับควบคุมมอเตอร์ผ่าน PS2 XY Module จากนั้นทำการทดสอบและทำการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นอะคริลิต พร้อมติดตั้งบนระบบควบคุมการช่วยพยุงเดิน มีบล็อกไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 2บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมการช่วยพยุงเดิน

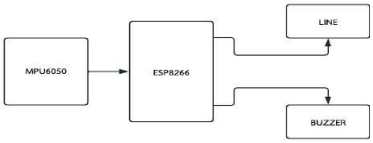


รูปที่ 3 โครงสร้างแผงควบคุม

จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 พบว่า โครงสร้างการทำงานของระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 3 ระบบได้แก่ ระบบแจ้งเตือนการล้ม ระบบการนับก้าวเดิน และระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว โดยแต่ละระบบมีการใช้ระบบไฟเลี้ยง 12 VDC ที่ควบคุมการทำงาน

3.1 ระบบแจ้งเตือนการล้ม

ระบบแจ้งเตือนการล้มเป็นการทำงานของเซนเซอร์ MPU6050 สำหรับตรวจจับองศาการเอียง โดยอิงจากแนวระดับแกน X และแกน Y ต่อเข้ากับบอร์ด NodeMCU ESP8266 ซึ่งติดตั้งไว้ที่คานส่วนล่างของเครื่องช่วยพยุงเดิน เพื่อทำการตรวจจับการผิดองศาในระหว่างการใช้งาน หากมีการขับเคลื่อนผิดองศา เซนเซอร์ตรวจจับจะทำการส่งข้อมูลให้บอร์ด NodeMCU ESP8266 สั่งการให้ Buzzer และ LINE Notify ทำการแจ้งเตือนทันที ซึ่งมีการแจ้งเตือนการลืม ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1

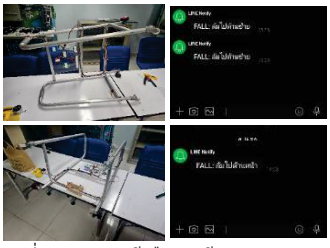


รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบแจ้งเตือนการล้ม

ตารางที่ 1 การแจ้งเตือนการล้มในลักษณะต่าง ๆ

ทิศทางในการล้ม	การแจ้งเตือนของ Buzzer	ข้อความการแจ้งเตือนของ LINE Notify
ล้มไปทางด้านซ้าย	ดังค้าง	ล้มไปทางด้านซ้าย
ล้มไปทางด้านขวา	ดังค้าง	ล้มไปทางด้านขวา
ล้มไปทางด้านหน้า	ดังค้าง	ล้มไปทางด้านหน้า
ล้มไปทางด้านหลัง	ดังค้าง	ล้มไปทางด้านหลัง
ได้รับการช่วยเหลือ	ดับ	-
เปิดเครื่อง	ดังสั้น 1 ครั้ง	เริ่มการทำงาน

จากตารางที่ 1 เมื่อเปิดเครื่อง Buzzer จะมีการดังสั้น 1 ครั้ง เพื่อเป็นการแจ้งเตือนการทำงาน และจะมีการส่งข้อความแจ้งเตือนของ LINE Notify หากเมื่อมีการล้มไปในทิศทางใด Buzzer จะมีการดังค้างจนกว่าจะมีการ ได้รับการเหลือโดยการยกขึ้นตั้งตรงตามเดิม ขณะเดียวกันจะมีการส่งข้อความแจ้งเตือนของ LINE Notify จนกว่าจะได้รับการช่วยเหลือเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงระบบแจ้งเตือนการล้มของ LINE Notify

3.2 ระบบการนับก้าวเดิน

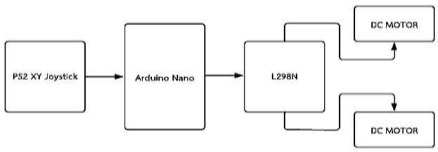


รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบการนับก้าวเดิน

จากรูปที่ 6 ระบบการนับก้าวเดินได้ใช้บอร์ดเดียวกับระบบแจ้งเตือนการลืม โดยรับค่าจากเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ E18-D80NK เพื่อนับจำนวนก้าวเดินระหว่างใช้งานเครื่องช่วยพยุงเดิน และส่งข้อมูลไปจัดเก็บบน Google Sheet ซึ่งเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที

3.3 ระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว

ระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยวเป็นการทำงานใช้ไฟเลี้ยง 12 VDC ควบคุมมอเตอร์ผ่าน PS2 XY Joystick โดยมีการต่อเข้ากับบอร์ดประมวลผล Arduino Nano ซึ่งโดย PS2 XY Joystick ทำการติดตั้งไว้ทางด้านที่จับฝั่งขวา ผู้ใช้สามารถเคลื่อนที่ได้ต่อเมื่อมีการขยับให้ PS2 XY Joystick ไปในทิศทางที่ต้องการ มีการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์และองศาที่ได้จากการควบคุมทิศทางดังรูปที่ 7 รูปที่ 8 และตารางที่ 2



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 8 แสดง Joystick ในการควบคุมทิศทาง

ตารางที่ 2 องศาที่ได้จากการควบคุมทิศทาง

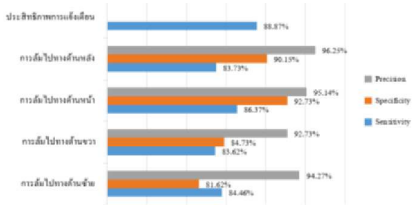
ทิศทางในการควบคุม Joystick	องศาที่ได้จากการควบคุม
ด้านหน้า	X = 0, Y = 512
ด้านหลัง	X = 1023, Y= 512
ด้านซ้าย	X = 512, Y = 1023
ด้านขวา	X = 512, Y = 0

จากตารางที่ 2 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตอยู่ที่ 2.5 V เมื่อโมดูลอยู่ในสถานะรอการควบคุม เมื่อการขยับควบคุมไปในทิศทางใด จะมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต จาก 0V ถึง 5V ขึ้นอยู่กับระดับการบังคับของผู้ใช้งาน หากมีการเชื่อมต่อโมดูลเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านขาแอนะล็อก สามารถแปลได้ว่าเมื่อโมดูลอยู่ในสถานะรอการควบคุม จะมีค่าแอนะล็อกประมาณ 512 และเมื่อมีการขยับบังคับทิศทาง ค่าแอนะล็อกจะเปลี่ยนจาก 0 ถึง 1023 ได้ ขึ้นอยู่กับการบังคับของผู้ใช้งาน จากการควบคุมบังคับทิศทางทำการเขียนโปรแกรมควบคุมทิศทางและการทำงานของมอเตอร์ที่ผ่านการสั่งการด้วย L298N ซึ่งเป็นตัวกลางในการควบคุมวงจร โดยมีจำนวนมอเตอร์ในการบังคับทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ มอเตอร์บังคับการเลี้ยวซ้ายจำนวน 1 ตัวและมอเตอร์บังคับการเลี้ยวขวาทั้งหมด 1 ตัว

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนการล้ม

คณะผู้วิจัยดำเนินการทดสอบการทำงานของระบบแจ้งเตือนการล้มจำนวน 10 รอบใน 4 ทิศทาง คือ 1) การล้มไปทางด้านซ้าย 2) การล้มไปทางด้านขวา 3) การล้มไปทางด้านหน้า และ 4) การล้มไปทางด้านหลัง มีผลการทดสอบดังกราฟที่ 1



กราฟที่ 1 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนการล้มทั้ง 4 ทิศทาง

จากกราฟที่ 1 พบว่า ระบบการแจ้งเตือนมีประสิทธิภาพ F1เท่ากับ 88.87% ซึ่งมีค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำสามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ว่า ค่าความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจจับการล้มมีการทำงานซ้ำที่ใกล้เคียงกันทำให้มี

ความแม่นยำสูง และค่าความถูกต้องการตรวจจับการล้มมีความสัมพันธ์กับค่าความไวที่ได้รับจากเซนเซอร์สามารถทำงานได้ถูกต้อง

4.2 ผลการทดสอบระบบนับก้าวเดิน

การทดสอบระบบนับก้าวเดินดำเนินการทดสอบโดยการตรวจจับการก้าวเดินผ่านเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ E18-D80NK และการส่งข้อมูลไปจัดเก็บบน Google Sheet มีผลการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบระบบนับก้าวเดิน

การทดสอบ	รอบที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
การตรวจจับการก้าวเดิน	✓	×	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
การส่งข้อมูลไปจัดเก็บ	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	✓	✓	✓
การตรวจจับ	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง = 70% , เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด = 30%									
การส่งข้อมูล	เปอร์เซนต์ความถูกต้อง = 80% , เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด = 20%									

จากตารางที่ 3 ระบบการนับก้าวเดิน พบว่า การตรวจจับการนับก้าวเดินมีความถูกต้องเท่ากับ 70% และมีการส่งข้อมูลไปจัดเก็บบน Google Sheet มีความถูกต้องเท่ากับ 80% แสดงให้เห็นว่า ระบบการนับก้าวเดินของเครื่องช่วยพยุงเดินสามารถตรวจจับและส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.3 ผลการทดสอบระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว

การทดสอบการบังคับไปในทิศทางทั้งหมด 4 ทิศทาง คือ 1) การเลี้ยวไปทางด้านซ้าย 2) การเลี้ยวไปทางด้านขวา 3) การบังคับไปทางด้านหน้า และ 4) การบังคับไปทางด้านหลัง เพื่อทดสอบระบบและประสิทธิภาพ จำนวน 10 รอบ มีการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว

การเลี้ยว	รอบที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
เลี้ยวซ้าย	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
เลี้ยวขวา	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
เลี้ยวหน้า	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
เลี้ยวหลัง	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

จากตารางที่ 4 ระบบการควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว พบว่า สามารถบังคับทิศทางในการเลี้ยวได้ทั้ง 4 ทิศทาง มีค่าความถูกต้อง 100%

5. สรุปผลการทดลอง

ระบบควบคุมการช่วยพยุงเดินแบบอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุ สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างต่อเนื่องสามารถกดปุ่ม Joystick เริ่มเดินก้างไว้ และในกรณีที่ต้องการให้เครื่องเคลื่อนที่หมุนตัว เคลื่อนที่ไปด้านข้าง และเคลื่อนที่ถอยหลัง และสามารถหยุดการเคลื่อนที่ของเครื่องได้ โดยปล่อยปุ่ม Joystick ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทำงาน 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแจ้งเตือนการล้ม ระบบการนับก้าวเดิน และระบบควบคุมมอเตอร์และการเลี้ยว โดยการใช้บอร์ด NodeMCU ควบคุมระบบแจ้งเตือนการล้มผ่านแอปพลิเคชันไลน์และมีการส่งเสียงแจ้งเตือน ผลการจากการทดสอบประสิทธิภาพ พบว่า ระบบการแจ้งเตือนมีประสิทธิภาพเท่ากับ 88.87% ระบบการนับก้าวเดินของเครื่องช่วยพยุงเดินสามารถตรวจจับและส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และระบบการควบคุมมอเตอร์การเลี้ยว สามารถบังคับทิศทางการเลี้ยวได้ทั้ง 4 ทิศทาง

6. ข้อเสนอแนะ

ระบบควบคุมการตั้งค่าการตรวจจับของระบบนับก้าวเดินที่ใช้ระยะเวลาที่สั้นเกินไป ทำให้ระบบมีการตรวจจับผิดพลาด และการเพิ่มจำนวนของข้อมูลไม่เป็นไปตามความเป็นจริงในการใช้งานบางครั้ง จึงควรมีการตั้งค่าการตรวจจับของระบบนับก้าวเดินให้ใช้ระยะเวลาที่นานขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการตรวจจับผิดพลาด และการเพิ่มจำนวนของข้อมูล ให้เป็นไปตามความเป็นจริงในการใช้งาน และเพิ่มปุ่มปรับระดับความเร็วของรถเข็นให้สามารถปรับระดับความเร็วในการใช้งานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] วัชรากรณ์ ชีวโกษิษฐ์. (2562). สังคมผู้สูงอายุ : ปัจจัยการตลาดที่เปลี่ยนไป. วารสารมหาจุฬาคานาครทรรศน์, 6(1), 38-54

[2] Jaul, E., & Barron, J. (2017). Age-related diseases and clinical and public health implications for the 85 years old and over population. Frontiers in Public Health, 5(335), 1-7. Retrieved from https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00335

[3] Klompstra, L., Ekdahl, A. W., Krevers, B., Milberg, A., & Eckerblad, J. (2019). Factors related to health-related quality of life in older people with multimorbidity and high health care consumption over a two-year period. BMC Geriatrics, 19(187), 1-8. Retrieved from https://doi.org/10.1186/s12877-019-1194-z

[4] Appeadu, M. K., & Bordoni, B. (2022). Falls and fall prevention in the elderly. Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560761/

[5] ยุพดี ฟูสกุล. (2560) เครื่องช่วยเดิน. วชิรเวชสารและวารสารเวชศาสตร์เขตเมือง, 61(2), 139-153.

[6] สมบูรณ์ จันทร์ปาและสายนที ปรารถนาผล, "การพัฒนาเครื่องช่วยเดินแบบมีล้อชนิดพกพา," วารสารเทคนิคการแพทย์เชียงใหม่, 40(3) กันยายน 2550, หน้า 228-235.

[7] E. Santosh Kumar. "Arduino Working Principle and It's Use in Education," in International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, vol. 10, pp. 2314-2319, 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.41784.

[8] ชัยพร อัคโคดคร และนิติคม อริยพิมพ์. (2565). การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 17(1), 29–39.

[9] อภิวิชญ์ ศรีสุก, สุวิมล มรรควิบูลย์ชัย, อุบลรัตน์ ศิริสุขโภคา และไพศาล สิมาเลาต่า. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 15* (น. 473-484). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

[10] ทุมมะลา, จันทิมา, "การตรวจจับการหกล้มของผู้สูงอายุโดยใช้โมดูลกล้องพร้อมระบบแจ้งเตือน" (2019). Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 9607. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/9607.

[11] พงษ์พันธ์ ลีลาธีธร และกันตพร ภาระราช. (2567). การตรวจจับการล้มตามลำดับความรุนแรงสำหรับผู้สูงอายุโดยใช้สัญญาณ Wifi. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 34(1), 1-12.

[12] อนุชา หยาอานุภาพ และวิยดา ยะไวทย์. (2565). ระบบตรวจจับการหกล้มสำหรับผู้สูงอายุ. ในการประชุม The 10th Asia Undergraduate Conference on Computing (AUC2), 2022, (น. 267-275). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี

[13] นโรดม์ นิลสุขุม และวิยดา ยะไวทย์. (2567). ระบบการแจ้งเตือนการล้มอัจฉริยะเพื่อการระบุตัวตนและท่าทางการล้ม. *วารสารวิทยาการสารสนเทศและเทคโนโลยีประยุกต์*, 6(1), 65-83.

[14] Zhang J, Li Z, Liu Y, Li J, Qiu H, Li M, Hou G, Zhou Z., "An Effective Deep Learning Framework for Fall Detection: Model Development and Study Design," J Med Internet Res. 2024 Aug 5;26:e56750. doi: 10.2196/56750. PMID: 39102676; PMCID: PMC11333863.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ

Automatic Garbage Sorting Machine

กฤษณะ จันทรวิจิตร[1] ไชยนุวัติ สิงหประชา[1] สิรวิชญ์ ตังตา[1] สุภัทรา เกิดเมฆ[1] ชิติสรรค์ วิชิโต[1] วิทยา ศรีกุล[1*]
[1*]สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
E-mail: witaya@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการพัฒนาเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ ที่ได้รับการพัฒนามาจาก แนวคิดของการคัดแยกโลหะ และขวดแบบเพ็ท ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การทำงานสามารถแยกขยะได้ 2 ชนิด ได้แก่ กระป๋อง และขวดพลาสติกใส โดยมีเซ็นเซอร์ 2 ประเภทในการแยกกระป๋อง และขวดพลาสติกใส ซึ่งสามารถสะสมคะแนนผ่านระบบจัดการสมาชิกโดยใช้ข้อมูลจากบัตรนักศึกษา ทำให้การทิ้งขยะมีการเก็บคะแนนทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง และในระบบงานยังรองรับและแสดงผลบนระบบอินเทอร์เน็ต รองรับขยะขวด 150 ขวด และกระป๋อง 150 กระป๋อง สามารถเก็บประวัติการทิ้งขยะได้โดยเครื่องมีความเที่ยงตรงร้อยละ 95

คำสำคัญ: การคัดแยกขยะ, ประเภทขยะ, ขยะรีไซเคิล

Abstract

This article discusses the development of an automatic waste sorting machine, which has been designed based on the concept of separating recyclable materials such as metal cans and PET plastic bottles. The system is capable of sorting two types of waste: cans and transparent plastic bottles. The machine employs two types of sensors to distinguish between these waste materials effectively. Additionally, it features a membership management system that utilizes student ID card data to accumulate reward points, promoting wider adoption and encouraging responsible waste disposal behavior.

The system is also integrated with an internet-based platform to support data visualization and remote monitoring. It has a capacity to accommodate 150 plastic bottles and 150 metal cans. The machine can record waste disposal history with an accuracy rate of 95%, ensuring reliable performance. This development aims to enhance waste management efficiency and contribute to sustainable environmental practices.

Keywords: waste sorting, waste types, recyclable waste

1. บทนำ

ปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น และขนาดของเมืองที่ขยายตัวซึ่งขยะเหล่านี้เป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม [1] และเป็นมลภาวะให้ประเทศ การทิ้งขยะบรรจุ ภัณฑ์ไปโดยไม่มีการดำเนินการใด ๆ เป็นการเพิ่มปัญหาการกำจัดขยะ ปัจจุบันนี้สินค้าเครื่องดื่มที่บรรจุภัณฑ์ลงในกระป๋องโลหะมีหลายแบบ หลายยี่ห้อซึ่งประชากรนิยมบริโภค จึงทำให้มีขยะที่เกิดจากหลังการดื่มเครื่องดื่มนั้นเกิดขึ้นมาก ถือเป็นปัญหาใหญ่ระดับโลก สหประชาชาติ(ยูเอ็น)ระบุว่า ปัจจุบันมีรัฐบาลกว่า 60 ประเทศออกกฎเกี่ยวกับพลาสติก ถ้า ปล่อยทิ้งโดยมีวิธีจัดการกับขยะเหล่านั้นในระยะเวลานานจะเกิดผลเสียด้านทัศนียภาพ บรรยากาศ และอาจทำให้เกิดโรคต่าง ๆ ได้

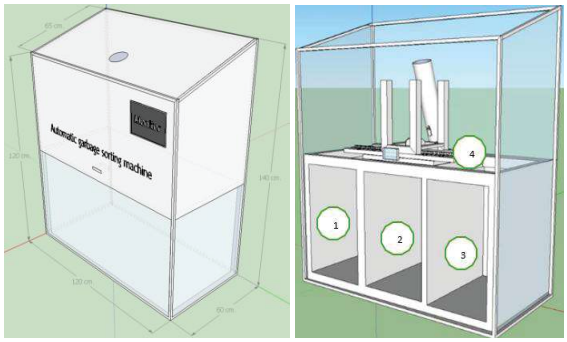
จึงเกิดมีแนวคิดในการนำขยะบรรจุภัณฑ์เหล่านี้กลับมา ใช้ใหม่ ซึ่งเรียกว่า “รีไซเคิล” จากการศึกษาพบว่าอลูมิเนียม และสังกะสีเป็นขยะบรรจุภัณฑ์ของ เครื่องดื่มกระป๋องที่สามารถนำมารีไซเคิลได้ และช่วยลดการใช้พลังงานในการผลิตอลูมิเนียม และสังกะสีสูงถึง 95% จึงทำให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ และมีการคิดวิธีสร้างเครื่องมือเก็บขยะสมัยใหม่ [4] และมีการส่งเสริมการนำกลับมาใช้ใหม่ ตัวอย่าง เช่น กระบวนการย่อยสลายตามธรรมชาติแต่ใช้เวลานาน ดังนั้น ขยะกลุ่มนี้สามารถนำมารีไซเคิลได้ใหม่ คณะวิจัยได้ทบทวนวรรณกรรม [8] เป็นงานแยกขยะโลหะ และขวดพลาสติก และแจ้งเตือนผ่านไลน์ โดยมีการแยกเพียง 2 ชนิดและยังไม่มีระบบการทำงานผ่าน Web site ไม่มีระบบสมาชิก และมีการเก็บผลการทดลองที่น้อย จึงได้แนวคิดในการพัฒนาเพิ่มเติม อีกทั้งทีมวิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมเพิ่มเติมพบว่า นวัตกรรมเครื่องมือที่สามารถรับซื้อกระป๋องเครื่องดื่มอัตโนมัติ [2] และมีการ

พัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยการพัฒนาเครื่องรับซื้อกระป๋องเครื่องดื่มอัตโนมัติระยะที่ 2 โดยมีลักษณะงานคล้ายกันกับงานวิจัยที่นำเสนอ โดยสามารถรับซื้อกระป๋อง ได้ 5 ชนิดแต่ไม่สามารถตรวจสอบขนาดของกระป๋องได้ และราคาในการรับซื้อที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นคณะวิจัย จึงได้คิดหาวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นและรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อพัฒนาโดยสร้าง และพัฒนาเป็นเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ โดยสามารถแยกขยะได้ 2 ชนิด แต่เก็บเป็นคะแนน สามารถกำหนดค่าคะแนนของกระป๋อง และขวดพลาสติกใสไว้ใน ฐานข้อมูล แสดงไฟเตือนสถานะของกระป๋อง และขวดพลาสติกใสที่ใส่ลงไป โดยได้ปรับเปลี่ยนระบบเซ็นเซอร์ค้นคว้าสืบค้นข้อมูล และประยุกต์ใช้งาน [3] [5] [6] ให้สามารถตรวจสอบชนิดของขยะซึ่งคัดแยกกระป๋อง และขวดพลาสติก การพัฒนาเครื่อง คัดแยกขยะรีไซเคิลอัตโนมัติ และมีแนวคิดการทำถังขยะให้มีความอัจฉริยะ [7] โดยการนำแอพลิเคชันมาเพิ่มความสามารถเก็บคะแนนด้วยระบบจัดการสมาชิกโดยใช้ข้อมูลจากบัตร ซึ่งสมาชิกสามารถสะสมคะแนนที่ได้จากการทิ้งกระป๋อง และขวดพลาสติกใส ระบบงานยังรองรับผู้ใช้งานที่ประสงค์จะบริจาคเพื่อส่งเสริมการคัดแยกขยะรีไซเคิลจะเกิดประโยชน์อย่างมาก ถ้านำไปใช้ในระบบคะแนนกิจกรรมนักศึกษา หรือ ระบบคะแนนจิตอาสาของ กยศ.

2. กระบวนการออกแบบ

2.1 การออกแบบตัวเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ

การออกแบบโครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ วัสดุใช้โครงสร้างเป็นเหล็กขนาด 1×1 นิ้ว โดยมีขนาด ก.×ย.×ส. (60×120×140) เซนติเมตร ดังรูปที่ 1

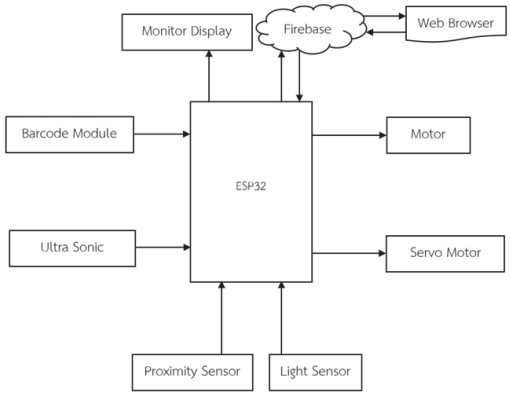


รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ

ใช้วัสดุแผ่นพลาสวูด (วัสดุที่มีความคงทน และราคาถูกกว่าพลาสติกใส) ปิดด้านบนทั้งหมดส่วนด้านข้างเป็นตะแกรงเหล็กที่สามารถมองเห็นขยะรีไซเคิลได้ และออกแบบโครงสร้างภายในเพื่อการคัดแยกขยะ 3 ชนิดดังรูปที่ 1 มีพื้นที่รับขยะขวดขนาด 500 มล. 150 ขวด ลำดับที่ 2 กระป๋อง ขนาด 330 มล. 150 กระป๋อง และขยะอื่นๆ ที่ไม่ตรงเงื่อนไขแสดงในตำแหน่งที่ 1-3 ตามลำดับ โดยมีกลไกการคัดแยกติดตั้งด้านบนของตัวเครื่อง ตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 1

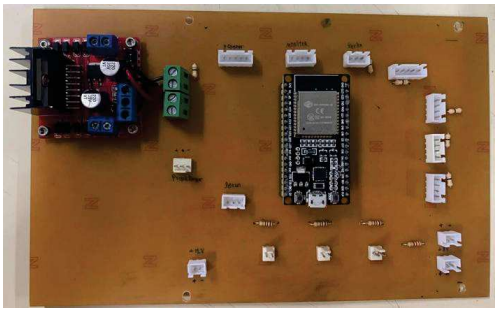
2.2 การออกแบบระบบควบคุมการทำงาน

วงจรควบคุมเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ ประกอบด้วยบอร์ด ESP32 โมดูลอ่านบาร์โค้ด มอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์ มอนิเตอร์ พร็อกซิมิตี้เซ็นเซอร์ โมดูลวัดความเข้มแสง และแสดงข้อมูลผ่านเว็บแอพลิเคชัน มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ

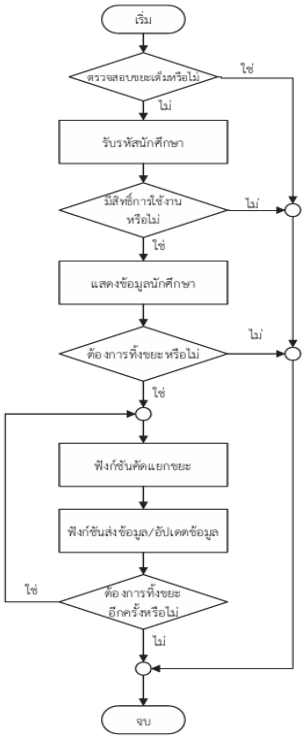
การทำงานของระบบเริ่มจาก บอร์ด ESP32 รับค่าจากเครื่องอ่านบัตรนักศึกษาเพื่อเก็บคะแนนกิจกรรมผู้ทิ้งขยะหลังจากนั้นรับค่าจากเซ็นเซอร์ตรวจจับขวดพลาสติกใส และกระป๋องเพื่อคัดแยกประเภทของขยะ ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์เปิดปิดช่องรับขยะ และมอเตอร์ทำหน้าที่แยกขยะลงถัง ข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมนี้ถูกแสดงผ่านจอแสดงผล โดยข้อมูลจะถูกบันทึกลงฐานข้อมูลที่เชื่อมต่อเว็บแอพลิเคชันซึ่งสามารถตรวจสอบได้ และออกแบบ PCB ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมทั้งหมดลงในบอร์ดควบคุมแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ลงแผ่น PCB

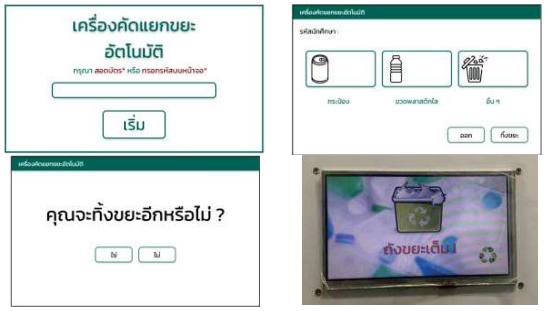
2.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงาน

การทำงานในผังรูปที่ 4 เริ่มจากเช็คการเต็มของขยะหากปกติให้รับรหัสนักศึกษาผ่าน Module Barcode เพื่อตรวจสอบใน Database หากไม่มีข้อมูลจะให้ลงทะเบียนก่อน หากมีระบบจะเริ่มรับขยะ และเข้าสู่ฟังก์ชันคัดแยกขยะ ถ้าถูกต้องระบบจะสะสมคะแนน และเช็คการทิ้งขยะเพิ่มหรือไม่ หากไม่ระบบจบการทำงาน



รูปที่ 4 อัลกอริทึมการทำงานระบบ

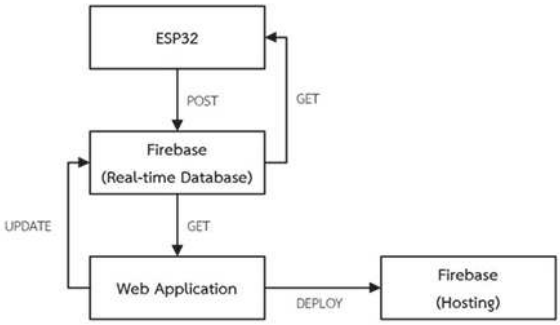
ด้วยความซับซ้อนระบบต้องออกแบบ ส่วนการอินเตอร์เฟสกับผู้ใช้เป็นการออกแบบจอสัมผัสเพื่อการติดต่อผู้ใช้ ซึ่งถูกติดตั้งด้านหน้าของเครื่องถังขยะที่มีการโปรแกรมการทำงานดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

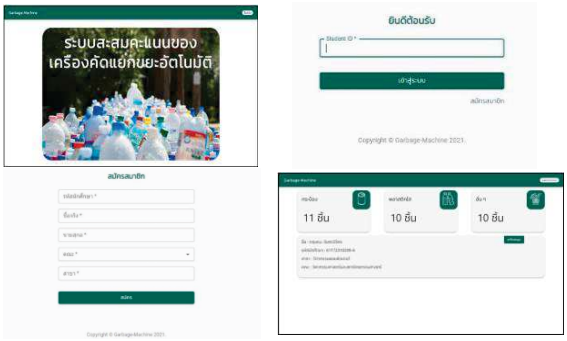
2.4 การออกแบบเว็บแอปพลิเคชันของระบบ

การออกแบบฐานข้อมูลของเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติมีการกำหนด รูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ Hardware ทำงานร่วมกับฐานข้อมูล Firebase และมีการ Update ข้อมูลยัง Web Host เพื่อการใช้งานผ่านเบราว์เซอร์ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเว็บแอปพลิเคชัน

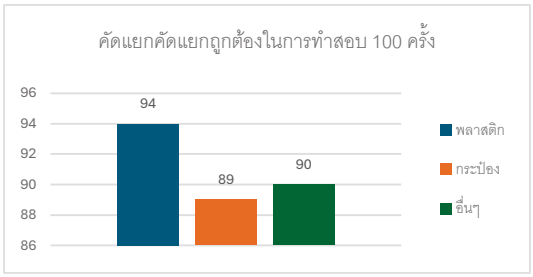
การพัฒนาหน้าจอของเว็บแอปพลิเคชันนั้นพัฒนาโดยเครื่องมืออย่าง React และมี การนำ Material-UI Framework มาช่วยตกแต่งส่วนของคอมโพเนนต์ให้สวยงาม และใช้งานง่ายโดยหน้าจอแบ่งออกเป็นหน้าหลักต่าง ๆ ดังนี้ หน้าแรกของ Website หน้าจอ Login หน้าจอ สมัครสมาชิก และ หน้าจอ Dashboard ตามลำดับดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตัวอย่างการออกแบบ Website

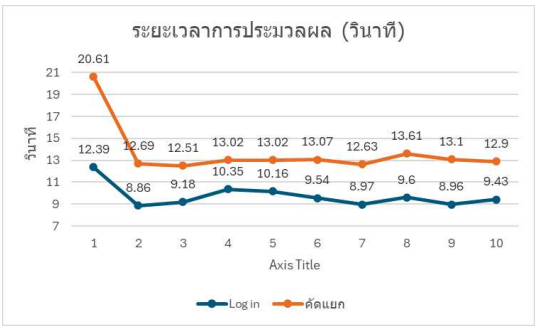
3. ผลการทดสอบ

การทดสอบฟังก์ชันการคัดแยกขยะ โดยทำการทดสอบคัดแยกขยะประเภทละ 100 ครั้ง เพื่อหาความผิดพลาดของการคัดแยกนี้โดยมีการคัดแยกขยะ 2 ประเภท และขยะประเภทอื่นๆที่ไม่อยู่ในหมวดหมู่การรีไซเคิลซึ่งเก็บผลการทดลองดังกราฟในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความเที่ยงตรงการคัดแยกขยะ

ทดสอบความเร็วในการทำงานของเครื่องคัดแยกขยะมีการทดสอบดังต่อนี้ ความเร็วในการเข้าระบบ และความเร็วในการคัดแยก โดยทำการทดสอบ 10 ครั้ง ดังกราฟในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเที่ยงตรงการคัดแยกขยะ

ทดสอบประสิทธิภาพโดยวัดอัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าในสภาวะที่รอการทำงาน ในรูปที่ 10 ด้านซ้ายมือ และสภาวะเครื่องกำลังทำงานคัดแยกขยะในรูปที่ 10 ด้านขวามือ โดยมีกำลังงานไฟฟ้า 11 Watt และ 22 Watt ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความเที่ยงตรงการคัดแยกขยะ

3. สรุป

เครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติ สามารถทำงานได้สมบูรณ์ พบว่าความแม่นยำในการคัดแยกขยะประเภทขวดพลาสติกใส 94 เปอร์เซ็นต์ ความแม่นยำในการคัดแยกประเภทกระป๋องอะลูมิเนียม 88 เปอร์เซ็นต์ ส่วนขยะประเภทอื่น ๆ 90 เปอร์เซ็นต์โดยมีความเร็วเฉลี่ยในการเข้าสู่ระบบของตัวเครื่องอยู่ที่ 9.74 วินาที และความเร็วในการคัดแยกประเภทขยะต่าง ๆ เฉลี่ยอยู่ที่ 13.72 วินาทีสำหรับประสิทธิภาพขณะที่เครื่องไม่ได้ใช้งานมีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 11 Watt เมื่อระบบทำงานจะเพิ่มขึ้นเป็น 22 Watt ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ในระบบงานกิจกรรมนักศึกษา หรืองานในลักษณะคล้ายกัน เช่นระบบจิตอาสาของ กยศ. หรือ การบำเพ็ญประโยชน์ในองค์กรต่างๆของราชการ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรุงเทพเศรษฐกิจ. (2563). ประเทศไทย 2563: สถานการณ์ขยะในไทย. สืบค้นจาก https://www.bangkokbiznews.com/news/detail/863554

[2] กาญจนา หนันทิสิงห์ และคณะผู้จัดทำ. (2552). เครื่องรับซื้อกระป๋องเครื่องดื่มอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.

[3] Krishna Veni G, Srilakshmi P, Uma B., "Automatic Waste (Metal and Non Metal) Separation using IR Sensor," in International Journal for Research in Technological Studies, vol.3, no.5, pp 2348-2358, 2016.

[4] จิตรภานุ วุฒิกรวิภาค และธัญพล โต๊ะชา. (2560). ถังขยะอัจฉริยะ. (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.

[5] คณสรณ์ ผิวบาง, ศรัณยู พรหมยุทธนา, และการตรัตน์ ขำดำ. (2562). เครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติ. ใน วิทยานิพนธ์. มหาวิทยลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[6] อัษฎายุธ น้อยผล และ นพดล มณีรัตน์. (2560). เครื่องคัดแยกโลหะโดยใช้คลื่นอัลตร้าโซนิค. ในวารสารวิศวสารลาดกระบัง, 34(2), 16-22.

[7] ทิพานัน พงษ์สุวรรณ, อนุพงษ์ติตะ และภานุวัตร อุทัยบาล. (2562). ระบบติดตามถังขยะอัจฉริยะ. PULINET Journal, 6(2), 41-50.

[8] ธานิล ม่วงพูล และ วริยา เย็นเปิง (2563). การพัฒนาระบบคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยเทคโนโลยีไอโอที. วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ, 8(2), 7-16.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

Design of a two-way earthquake simulation

ณัฏฐพล แจ้งจงดี[1*] เฉลิม จินาตุน[1] อนุชิต อุไรรัตน์[1] และ สมพล บุญญสุวรรณโณ[1]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
E-mail: nattapon.jan@rmutr.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอ การออกแบบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ที่สามารถควบคุมความเร็วได้ 3 ระดับ คือ 1 Hz, 2 Hz และ 3 Hz สามารถกำหนดระยะของแอมพลิจูดได้ 2 ระยะ คือ ระยะ 20 cm./cycle และ ระยะ 40 cm./cycle ผลจากการทดสอบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง สามารถทำงานที่ 1 Hz เป็นเวลา 2 นาที ต่อด้วย 2 Hz เป็นเวลา 2 นาที ต่อด้วย 3 Hz เป็นเวลา 2 นาที รวมเป็นเวลาทั้งหมด 6 นาทีต่อการทดสอบชิ้นงาน 1 ชิ้น โดยขณะมีการใส่ภาระโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า ระบบยังสามารถควบคุมความเร็วได้ตามความถี่ที่โปรแกรมไว้

คำสำคัญ: ระบบควบคุม แผ่นดินไหว ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents design of a two-way earthquake simulation. The speed control is available at 3 levels 1 Hz, 2 Hz and 3 Hz. Amplitude range can be set in 2 ranges 20 cm. /cycle and 40 cm. /cycle. The results of the two-way earthquake simulation test showed that the system could operate at 1 Hz for 2 minutes, followed by 2 Hz for 2 minutes, followed by 3 Hz for 2 minutes, for a total of 6 minutes per cycle. While the electric motor is loaded, the system can still control the speed according to the programmed frequency.

Keywords: Control system, Earthquake, Microcontroller

1. บทนำ

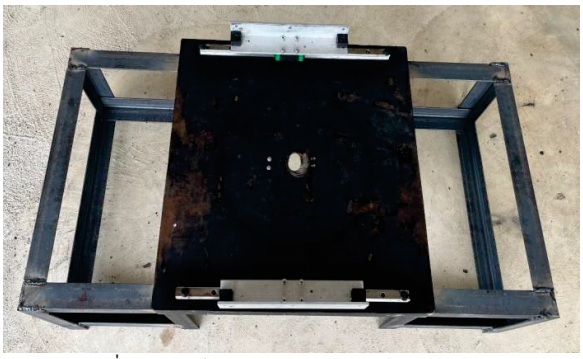
แผ่นดินไหวเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้ทุกที่ทั่วโลก ไม่ว่าจะบนพื้นดิน หรือ พื้นน้ำ การเกิดแผ่นดินไหวมีสาเหตุมาจากการปลดปล่อยพลังงานความเครียดของหินใต้พื้นดินอย่างทันทีทันใด อาจเกิดเป็นรอยแตกหรือรอยเลื่อน แผ่นดินไหวนั้นก่อให้เกิดความเสียหายเป็นอย่างมากทั้งชีวิต และ ทรัพย์สิน แผ่นดินไหวเกิดจากการสั่นสะเทือนของเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนจนเกิดการขาดออกจากกันและกลับสู่รูปเดิม ที่เกิดขึ้นนี้จากผลพวงของการแปรสัณฐานของเปลือกโลก [1] ผลกระทบของแผ่นดินไหวมีทั้งทางตรงและทางอ้อม ด้านทางตรง เช่น พื้นดินแตกแยก ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินถล่ม เกิดคลื่นสินามิ อาคารทรุดตัวพังเสียหาย ถนนถูกตัดขาด ฯลฯ ในส่วนด้านทางอ้อม เช่น เศรษฐกิจฝืดเคือง ระบบขนส่งบางบก ทางน้ำ หรือแม้แต่ทางอากาศ ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ตลอดจนชีวิตและทรัพย์สิน [2] จากข้อมูลของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา พบว่าประเทศไทยสามารถเกิดแผ่นดินไหวได้ ค่อนข้างบ่อยแทบทุกจังหวัดของประเทศ แต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดไม่เกิน 5 ริกเตอร์ แต่ก็จะมีแนวโน้มที่จะมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากการสำรวจแผ่นดินไวในปัจจุบันของประเทศไทย ทำให้ทราบว่าประเทศไม่ได้ปลอดภัยจากการเกิดแผ่นดินไหว เพราะว่าประเทศไทยเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นเปลือกโลกอินเดีย-ออสเตรเลีย และแผ่นมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งในพื้นที่ดังกล่าวประเทศไทยก็ถือว่าค่อนข้างปลอดภัยระดับหนึ่งหากเกิดแผ่นดินไหวก็จะได้ได้รับผลกระทบบ้างเล็กน้อย [3]

ประเทศไทยมีการวางแผนและมาตรฐานการก่อสร้างอาคารต้องสามารถรองรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นที่ดินที่รองรับอาคารในการต้านแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวตามกฎกระทรวงปี พ.ศ.2550 และได้มีงานวิจัยเกิดขึ้นมากมาย เช่น ธนูศักดิ์ อุ่นชาติ และพิทักษ์ชัย ท้าวทอง ได้ศึกษาและออกแบบการเกิดการจำลองแผ่นดินไหวขึ้น เพื่อศึกษาเกี่ยวกับการวัดและการตอบสนองทางพลวัต แบบจำลองนี้สามารถจำลองอาคารจากโต๊ะเขย่า โดยใช้ระบบอัดอากาศเป็นตัวส่งกำลังผ่านกระสูบนิวแมติกส์ โดยควบคุมผ่านโปรแกรมแลปวิว [4] งานวิจัยอีกชิ้นหนึ่งของ ณัฐพล แสนคำมงคล และไพศาล ถนอมใจ ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ และการหาประสิทธิภาพการทำงานของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหว ที่ช่วงความถี่ต่างๆ โดยออกแบบโมเดลในโปรแกรม SAP2000 ที่มีขนาดและมิติที่เหมือนกับแผ่นฐานของโต๊ะเขย่าจำลองแผ่นดินไหว [5]

จากการที่มีมาตรฐานการออกแบบอาคารที่ต้องสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้นั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง 9 ที่ ได้จัดโครงการแข่งขันราชมงคลวิชาการวิศวกรรมระดับชาติ ต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันเป็นครั้งที่ 15 ในการแข่งขันทุกครั้ง จะมีรายการแข่งขันการออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงสั่นสะเทือน ผู้เข้าร่วมการแข่งขันจะออกแบบและสร้างแบบจำลองอาคารสูง เพื่อทดสอบกับเครื่องจำลองแผ่นดินไหว ซึ่งเครื่องจำลองแผ่นดินไหวดังกล่าวมีขนาดใหญ่ และราคาค่อนข้างสูงมาก จึงจำเป็นต้องมีการทำความร่วมมือระหว่างสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อออกแบบและจัดสร้างระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง เพื่อใช้ในการทดสอบการแข่งขัน

2. การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ใช้เหล็กฉากขนาด หน้ากว้าง 5 cm. ยาว 60 cm. ประกอบกันด้วยการเชื่อมเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และใช้เหล็กฉากหน้ากว้าง 5 cm. ยาว 36 cm. เป็นขาของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว มีการเพิ่มช่องด้านซ้ายและด้านขวาเพื่อสำหรับใส่ของถ่วงน้ำหนักขณะทำงาน (ขณะเครื่องทำงานจะเกิดการเคลื่อนที่เล็กน้อย) ด้านบนของเครื่องจะใส่แผ่นแหล็กที่มีความหนา 0.3 mm. กว้าง 60 cm. ยาว 60 cm. เจาะรูกึ่งกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm. ติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในแนวแกนตั้ง ขนาด 500 W 24 V 600 RPM โดยให้ปลายเพลายื่นออกมาที่รูตรงกลาง ติดตั้งแบบหน้าแปลน และชุดเพลาข้อเหวี่ยง เพื่อให้ขับกับแกนเลื่อนจำนวน 2 ชุด แกนเลื่อนดังกล่าวมีขนาดความยาว 50 cm. จำนวน 2 แกนติดตั้งทางด้านหน้าและหลังของระบบจำลองแผ่นดินไหว ในส่วนของตัวที่เคลื่อนที่บนแกนเลื่อนทั้ง 2 แกน ติดตั้งแผ่นพลาสติกอะคิลิคหนา 1 cm. กว้าง 60 cm. ยาว 60 cm. เพื่อใช้เป็นฐานในการยึดแบบโครงสร้างอาคารสูงที่ต้องการทดสอบ ดังรูปที่ 1

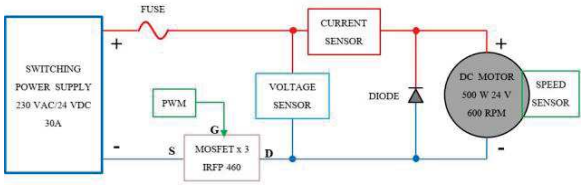


รูปที่ 1 โครงสร้างระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

3. การออกแบบระบบไฟฟ้าและการควบคุม

3.1 การออกแบบระบบไฟฟ้าภาคกำลัง

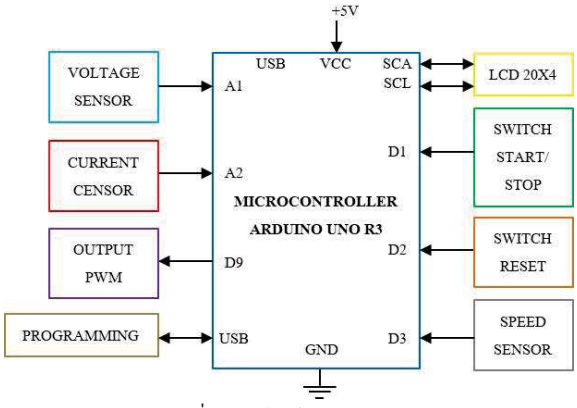
การออกแบบระบบไฟฟ้าภาคกำลัง ของระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 230 V 50 Hz โดยมีอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 24 V 30 A (Switching power supply) ฟิวส์พิกัด 25 A เพื่อเป็นอุปกรณ์ป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพิกัด 500 W 24 V 600 RPM ติดตั้งเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้า, เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และ เซนเซอร์วัดความเร็วรอบด้านไฟลบของมอเตอร์ไฟฟ้า มีการต่ออยู่กับ เพาเวอร์มอสเฟต IRFP 460 จำนวน 3 ตัว ขนานกัน เพื่อรองรับกระแสได้สูงขึ้น พร้อมติดฮีตซิ้งเพื่อระบายความร้อน โดยสามารถควบคุมความเร็วรอบจากสัญญาณ PWM ของขาเกต ที่ถูกสั่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรไฟฟ้าภาคกำลัง

3.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้าภาคควบคุม

การออกแบบวงจรไฟฟ้าภาคควบคุม จะเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Aduino Uno R3 ในการคำนวณและประมวลผลส่วนของด้านอินพุต ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าแบบอนาลอก 0-25 V เป็น 0-5 V ต่อเข้ากับขา A1, เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบอนาลอก 0-30 A เป็น 0-5 V ต่อเข้ากับขา A2, สัญญาณเอาต์พุต PWM จะถูกส่งออกที่ขา D9 เพื่อไปขับขาเกตของ POWER MOSFET, สัญญาณอินพุตจากสวิตช์ START/STOP ต่อเข้ากับขา D1, สัญญาณอินพุตจากสวิตช์ RESET ต่อเข้ากับขา D2, สัญญาณอินพุตจากเซนเซอร์วัดความเร็ว/ความถี่ ต่อเข้ากับขา D3, การแสดงผลผ่านทางจอแอลซีดีขนาด 20 อักขระ 4 บรรทัด ต่อเข้ากับขารับ-ส่งข้อมูล SCA, SCL ใช้ภาษา C สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานรวมถึงการแสดงผล เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า, ค่ากระแสไฟฟ้า, ค่ากำลังไฟฟ้า และความเร็ว/ความถี่ ดังรูปที่ 3



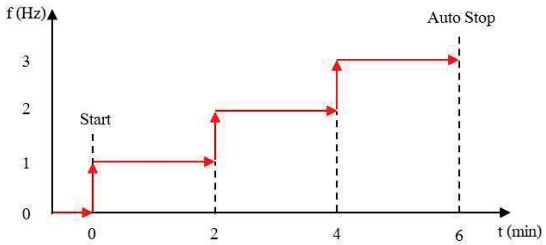
รูปที่ 3 วงจรไฟฟ้าภาคควบคุม



รูปที่ 4 ระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

4. การทดสอบ

การทดสอบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง มีการเขียนโปรแกรมให้สามารถทำงานในแบบอัตโนมัติ สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางคือ การเคลื่อนที่ไปทางซ้าย และการเคลื่อนที่ไปทางขวาสลับกันไป-กลับ สามารถปรับตั้งระยะการเคลื่อนที่ ไป-กลับ ได้ 2 ระยะ คือ ระยะ 20 cm./cycle และ ระยะ 40 cm./cycle



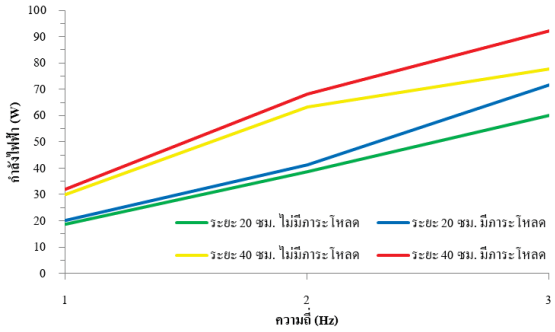
รูปที่ 5 การทำงานของระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

จากรูปที่ 5 เมื่อทำการเปิดระบบไฟฟ้า พร้อมเริ่มการทำงานมอเตอร์ไฟฟ้าจะเริ่มทำงานในความถี่ที่ 1 Hz เป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบ 2 นาที มอเตอร์ไฟฟ้าจะเพิ่มความเร็วขึ้นในความถี่ที่ 2 Hz เป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบ 2 นาที มอเตอร์ไฟฟ้าจะเพิ่มความเร็วขึ้นในความถี่ที่ 3 Hz เป็นเวลา 2 นาที และหยุดระบบอัตโนมัติทั้งหมดภายในเวลา 6 นาที โดยสามารถรีเซ็ตการทำงานหรือหยุดการทำงานได้ทุกช่วงเวลา

ตารางที่ 1 การทดสอบสมรรถนะระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

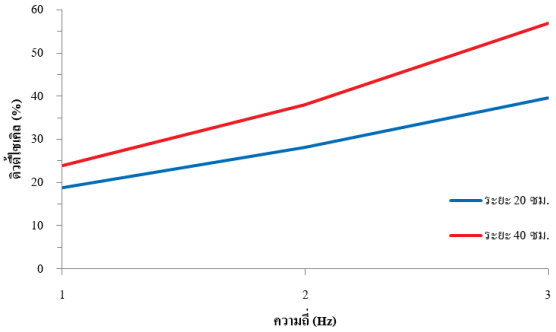
ระยะการเคลื่อนที่ (ไป-กลับ)	ภาระโหลด	ความถี่ (Hz)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	ดิวตี้ไซเคิล (%)
20 cm.	มีภาระโหลด	1	23.53	0.79	18.58	18.82
		2	23.67	1.64	38.81	28.23
		3	23.77	2.53	60.13	39.60
	ไม่มีภาระโหลด	1	23.52	0.86	20.22	18.82
		2	23.65	1.75	41.38	28.23
		3	23.73	3.02	71.66	39.60
40 cm.	มีภาระโหลด	1	23.53	1.28	30.11	23.92
		2	23.67	2.67	63.19	38.03
		3	23.77	3.27	77.72	56.86
	ไม่มีภาระโหลด	1	23.54	1.36	32.01	23.92
		2	23.68	2.88	68.19	38.03
		3	23.79	3.89	92.34	56.86

จากตารางที่ 1 ภาระโหลดในการทดสอบนี้ ใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารทำจากวัสดุไม้มาประกอบเป็นโครงสร้าง เพื่อยึดกับส่วนที่เคลื่อนที่ ยึดด้วยน็อตที่มุมทั้ง 4 มุม โครงสร้างวัสดุไม้ขนาดกว้าง 20 cm. ยาว 20 cm. สูง 90 cm. ด้านบนสุดมีการถ่วงน้ำหนักด้วยแผ่นโลหะ น้ำหนักโดยรวมของชิ้นงานที่ทำการทดสอบประมาณ 10 kg.



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้า กรณีไม่มีภาระโหลด และมีภาระโหลด ที่ความถี่ 1 Hz, 2 Hz และ 3 Hz ของระยะ 20 cm. และระยะ 40 cm. แตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับดิวตี้ไซเคิล กรณีมีภาระโหลด

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการปรับระยะการเคลื่อนที่เป็น 40 cm. ระบบจะทำการปรับเพิ่มค่าดิวตี้ไซเคิลให้อัตโนมัติ เพื่อให้มีการเคลื่อนที่เป็นไปตามความถี่ที่ตั้งไว้

5. สรุป

การออกแบบระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง สามารถเคลื่อนที่แบบสลับกันไป-มาได้ 2 ทิศทางด้วยการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกควบคุมความเร็ว จากสัญญาณ PWM ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ 3 ระดับ คือ 1 Hz, 2 Hz และ 3 Hz สามารถกำหนดระยะของแอมพลิจูดได้ 2 ระยะ คือ ระยะ 20 cm./cycle และ ระยะ 40 cm./cycle ผลทดสอบสามารถทำงานที่ 1 Hz เป็นเวลา 2 นาที, 2 Hz เป็นเวลา 2 นาที และ 3 Hz เป็นเวลา 2 นาที รวมเป็นเวลาทั้งหมด 6 นาที ต่อการทดสอบชิ้นงาน 1 ชิ้น โดยขณะมีการใส่ภาระโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถควบคุมความเร็วได้ตามความถี่ที่โปรแกรมไว้ และระบบจำลองแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง มีการใช้กำลังไฟฟ้าโดยรวมทั้งหมด ไม่ถึง 100 W ซึ่งนับว่าเป็นเครื่องที่มีความประหยัดพลังงานมาก

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์และนักศึกษาสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

เอกสารอ้างอิง

[1] ไพบูลย์ ปัญญาคะโป, “คู่มือการออกแบบอาคาร อาคารสูง อาคารขนาดใหญ่และอาคารต้านแผ่นดินไหว”, กรุงเทพฯ : บริษัทจรัลสนิทการพิมพ์ จำกัด, 2551.

[2] ศูนย์สารสนเทศทรัพยากรธรณี , “การเกิดแผ่นดินไหว (earthquakes)” [ออนไลน์]: http://www.tlcthai.com เข้าดูเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2566.

[3] สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, “หนังสืออุตุนิยมวิทยา” [ออนไลน์]: http://seismology.tmd.go.th เข้าดูเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2566.

[4] ธนูศักดิ์ อุ่นชาติ และ พิทักษ์ชัย ท้าวทอง, “การวัดการตอบสนองทางพลวัตและการจำลองคลื่อแผ่นดินไหวสำหรับแบบจำลองโครงสร้างอาคารบนโต๊ะเขย่า”, ปริญญานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2553.

[5] ณัฐพล แสนคำมงคล และ ไพศาล ถนอมใจ, “การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ และการหาประสิทธิภาพการทำงานของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหว ที่ช่วงความถี่ต่างๆ”, ปริญญานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2553.



ประวัติผู้เขียนบทความ
ณัฏฐพล แจ้งจงดี จบการศึกษา วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มทร.พระนคร วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้ามทร.ธัญบุรี
ปัจจุบัน เป็นหัวหน้าสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มทร.รัตนโกสินทร์ วข.วังไกลกังวล

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

Green Coffee Bean Quality Indicator Kit by Using Artificial Intelligence

ธนวัฒน์ ศรีรักษา[1] กนกพล เพ็ชรมาก[2] ธวัช ชูชิต[2] และ เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย[3*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[3*]สาขาวิชาวิศวกรรมยาง พอลิเมอร์ และปิโตรเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
E-mail: s.singsarothai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟดิบโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อยกระดับความแม่นยำในการประเมินคุณภาพเมล็ดกาแฟ ระบบนี้ทำงานโดยใช้กล้อง USB Webcam ในการเก็บภาพและประมวลผลข้อมูลผ่านแพลตฟอร์ม CiRA CORE ซึ่งเป็นแพลตฟอร์ม AI แบบ Low-Code ในกระบวนการสร้างระบบ AI ได้มีการพัฒนาโมเดลที่สามารถแยกเมล็ดกาแฟเกรด A (ไม่พบข้อบกพร่อง) ออกจากเมล็ดกาแฟที่พบข้อบกพร่องตามมาตรฐานที่ยอมรับได้ ระบบสามารถคำนวณและแสดงผลอัตราส่วนของเมล็ดกาแฟเกรด A แบบเรียลไทม์ได้เป็นอย่างแม่นยำ จากผลการทดลองใช้งานโดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนวรรณะเกษตร อ.สวี จ.ชุมพร แสดงให้เห็นว่าชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟนี้มีความแม่นยำสูงที่สามารถระบุเป็นตัวเลขได้ ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าการประเมินด้วยสายตาของผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มวิสาหกิจฯ และได้รับความพึงพอใจในการใช้งานอยู่ที่ระดับสูงจากเกษตรกรผู้เข้าร่วมทดลองใช้งานจำนวน 20 คน

คำสำคัญ: เมล็ดกาแฟดิบ, ปัญญาประดิษฐ์, CiRA CORE

Abstract

This article presents the design and development of a raw coffee bean quality identification kit that utilizes artificial intelligence (AI) technology to enhance the accuracy of quality assessment. The system operates by using a USB webcam to capture images, which are then processed through CiRA CORE, a low-code AI platform. During development, a model was created to distinguish between grade A coffee beans (those with no defects) and beans with defects that still meet acceptable standards. The system can accurately calculate and display the ratio of grade A beans in real time. Trials conducted with the Wannakaset Community Enterprise Group in Sawi District, Chumphon Province, demonstrated that coffee bean quality indicator has a high accuracy that can be specified numerically, which is more accurate than the visual assessment of experts in the enterprise group. The system also received a high level of satisfaction from the 20 farmers who participated in the trial.

Keywords: green coffee bean, artificial intelligence, CiRA CORE

1. บทนำ

เมล็ดกาแฟ (Green Coffee Bean) หรือที่เรียกทั่วไปว่า กาแฟสาร หรือเมล็ดกาแฟ หมายถึง ผลกาแฟสุก (Coffee Cherry) ที่เอาส่วนของเปลือก (Pericarp) ได้แก่ ผนังผลชั้นนอก (Exocarp) ผนังผลชั้นกลาง (Mesocarp) หรือที่เรียกว่า เนื้อ และผนังผลชั้นใน (Endocarp) หรือที่เรียกว่า กะลา (Parchment) ออกแล้ว โดยจะต้องมีสีตรงตามกระบวนการผลิตของเมล็ดกาแฟ และไม่พบร่องรอยการทำลายเมล็ดกาแฟจากด้วงเมล็ดกาแฟ แต่จะมีข้อบกพร่องของเมล็ดกาแฟที่ยอมรับ ได้แก่ เมล็ดดำ เมล็ดขึ้นรา ชิ้นเมล็ดแตก เมล็ดไม่สมบูรณ์ เมล็ดถูกแมลงทำลาย ผลกาแฟแห้ง และสิ่งแปลกปลอม โดยจะพิจารณาคุณภาพทด้วยการใช้สายตาของผู้ประเมินที่จะต้องผ่านการอบรมมาเท่านั้น [1] ซึ่งการใช้สารตาในการตรวจสอบนั้นอาจเกิดความผิดพลาดได้สูง หากเกษตรกรไม่ได้ผ่านการอบรมมาก่อน และอาจทำให้ถูกตัดราคาโดยพ่อค้าคนกลางได้ง่าย ส่งผลให้รายได้ของเกษตรกรลดลงไปด้วย

เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้เครื่องจักรให้มีความฉลาดเหมือนมนุษย์ โดยศาสตร์ที่เป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยี AI คือ การเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) ซึ่งหมายถึง ศาสตร์ที่ทำให้คอมพิวเตอร์หรือเครื่องจักรสามารถเรียนรู้ที่จะทำความเข้าใจความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ถูกป้อนเข้า (Input) และสร้างผลลัพธ์การตอบสนองต่อข้อมูล (Output) ขึ้นมาได้เองโดยไม่ต้องถูกโปรแกรมหรือได้รับการป้อนคำสั่งเข้าไปใหม่ทุกครั้งที่คอมพิวเตอร์หรือเครื่องจักรได้รับข้อมูลใหม่ [2-5]

CiRA CORE เป็นหนึ่งในแพลตฟอร์มเทคโนโลยี AI ที่นิยมใช้ในการพัฒนาระบบตรวจสอบสิ่งต่างๆ ด้วยภาพ เนื่องจากเป็น Core Technology ที่จะช่วยสร้างอัลกอริทึมหรือแอปพลิเคชันต่างๆ เช่น สร้างให้ระบบจดจำว่าซองจดหมายรูปร่างหน้าตาเป็นแบบนี้ หลังจากเรียนรู้จดจำแล้ว เมื่อนำไปใช้งานจะมีการสั่งงาน อาทิ การสั่งหุ่นยนต์ให้หยิบซองจดหมายออกจากสายพาน และเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้โคดน้อย (Low-Code Platform) เรียนรู้วิธีใช้งานได้ง่ายด้วยโคดบล็อค (Block Code) ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานมาก่อน [6-7]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกนำแพลตฟอร์ม CiRA CORE มาใช้ในการสร้างระบบ AI เพื่อใช้ในการตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟดิบ แทนการใช้สายตาในการตรวจสอบ ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรมีความมั่นใจในผลผลิตของตนและนำไปจำหน่ายในราคาที่สูงขึ้นได้

2. หลักการและทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดกาแฟ

การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดกาแฟที่ผ่านการสีแล้วเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เมล็ดกาแฟโรบัสตาที่มีลักษณะเป็นไปตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561

ลักษณะของเมล็ดกาแฟโรบัสตาที่ดีตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561 เมล็ดกาแฟจะต้องไม่มีกลิ่นผิดปกติ เช่น กลิ่นเหม็นเปรี้ยว กลิ่นหมักบูด หรือกลิ่นแปลกปลอม เช่น กลิ่นปุ๋ย กลิ่นดิน เป็นต้น มีสีตรงตามกระบวนการผลิต (แบบเปียกและแบบแห้ง) มีความชื้นไม่เกิน 12.5% โดยมวล และไม่พบร่องรอยการทำลายจากด้วง แต่มีข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ดังรูปที่ 2 โดยต้องพบในปริมาณที่ไม่เกินเกณฑ์ตามตารางที่ 1



ก) เมล็ดดำ ข) เมล็ดขึ้นรา ค) ชิ้นเมล็ดแตก
ง) เมล็ดไม่สมบูรณ์ จ) ผลกาแฟแห้ง ฉ) สิ่งแปลกปลอม

รูปที่ 2 เมล็ดกาแฟโรบัสตาที่มีข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561

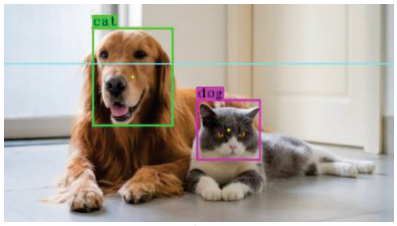
ตารางที่ 1 ปริมาณข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน มกษ. 5700-2561

ข้อบกพร่อง	เกณฑ์การยอมรับ (%โดยมวล)
เมล็ดดำ	2
เมล็ดขึ้นรา	0.5
ชิ้นเมล็ดแตก	2
เมล็ดถูกแมลงทำลาย	4
ผลกาแฟแห้ง	0.5
สิ่งแปลกปลอม	0.5
เมล็ดไม่สมบูรณ์	ไม่มีกำหนดเกณฑ์สูงสุด
ข้อบกพร่องรวม	7

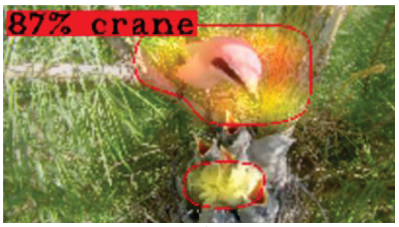
การตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดกาแฟจะใช้สายตาของผู้ประเมินที่ผ่านการอบรมเท่านั้นในการตรวจสอบ ซึ่งผู้ที่ผ่านการอบรมมีจำนวนน้อยมาก ทำให้เกษตรกรส่วนใหญ่เข้าถึงการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่ได้รับมาตรฐานยากมาก ส่งผลให้เกิดความเสื่อมล้ำของราคาขึ้นได้ เนื่องจากเมล็ดกาแฟที่มีคุณภาพผ่านเกณฑ์และสีสม่ำเสมอกันจะมีราคารับซื้อที่ดีที่สุด

2.2 หลักการทำงานของแพลตฟอร์ม CiRA CORE

CiRA CORE เป็นแพลตฟอร์มที่นำเทคโนโลยี AI มาประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น การตรวจจับวัตถุเพื่อคัดแยกวัตถุชนิดเดียวกันที่ลักษณะต่างกัน โดยเทคโนโลยี AI ที่ใช้เป็น Object Detection ที่ใช้เทคโนโลยี AI ในการตรวจจับวัตถุที่กำหนด เช่น คน รถยนต์ อาคาร ที่อยู่ในภาพหรือวิดีโอ พร้อมบอกตำแหน่งของวัตถุได้ และ Classification ที่จำแนกข้อมูลเพื่อให้ได้คำตอบที่เป็นตัวเลือกหรือกลุ่มข้อมูล



ก) ตัวอย่างการแสดงผลเมื่อใช้งาน Object Detection



ข) ตัวอย่างการแสดงผลเมื่อใช้งาน Classification

รูปที่ 3 ตัวอย่างการตรวจสอบวัตถุด้วยแพลตฟอร์ม CiRA CORE [6]

3. การออกแบบ

การออกแบบและสร้างชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์บนแพลตฟอร์ม CiRA CORE มีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. เตรียมข้อมูล (Data Preparation) เช่น การนำเข้าข้อมูลภาพซึ่งประกอบด้วย ชุดฝึกสอน (Training Set) และชุดตรวจสอบ (Validation Set)

2. เลือกโมเดล (Model Selection) สำหรับการฝึกสอน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โมเดลสำเร็จรูปที่มีอยู่ในแพลตฟอร์ม CiRA CORE

3. ฝึกสอนโมเดล (Model Training) โดยใช้ข้อมูลภาพที่เป็นชุดฝึกสอน

4. ประเมินผลโมเดล (Model Evaluation) โดยการทดสอบโมเดลที่ฝึกสอนกับชุดข้อมูลภาพสำหรับตรวจสอบเพื่อพิจารณาค่าความแม่นยำ (Accuracy)

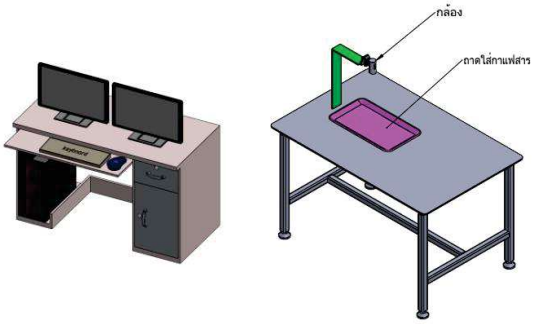
5. ปรับแต่ง (Tuning & Optimization) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หรือเพิ่มจำนวนรูปภาพ และดำเนินการฝึกโมเดลใหม่ หรือฝึกสอนเพิ่มเติม เพื่อให้โมเดลสมบูรณ์ที่สุด

6. ส่งออกโมเดล (Export Model)

7. นำโมเดลไปใช้งานจริง (Deployment)

สำหรับการทดลองใช้งานจริง เนื่องจากงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์บนแพลตฟอร์ม CiRA CORE จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะในการรับภาพจากกล้อง USB Camera แบบเรียลไทม์ เพื่อถ่ายเมล็ดกาแฟและระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) เมื่อกำหนดให้คุณภาพเกรด A มีค่าเป็น 100 % โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่

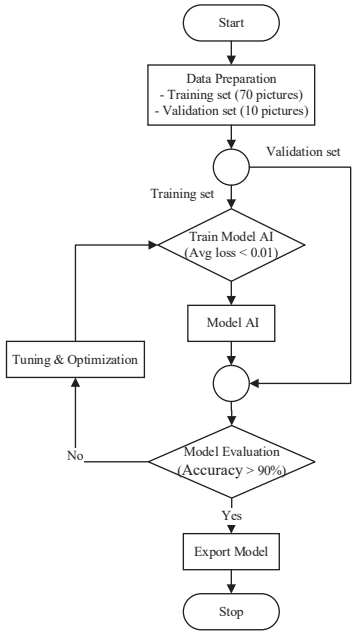
1. การออกแบบและสร้างเครื่องมือ เป็นการออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือที่เป็นระบบภายนอก (Hardware) โดยการเขียนแบบสามมิติจากความต้องการของผู้ใช้งานจริง ซึ่งได้แบบร่างเป็นดังรูปที่ 4



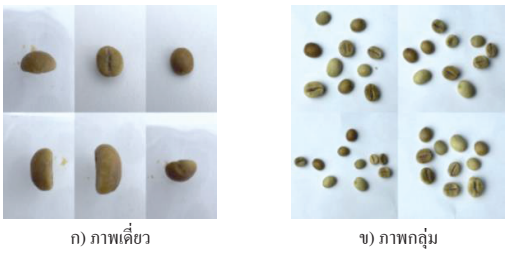
ก) โต๊ะและชุดคอมพิวเตอร์ ข) โต๊ะและชุดถ่ายภาพเมล็ดกาแฟ

รูปที่ 4 แบบร่างระบบภายนอก (Hardware) ของชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

2. การออกแบบและสร้างแบบจำลอง AI สำหรับตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตา ซึ่งกระบวนการออกแบบระบบเป็นดังผังการทำงาน (Flowchart) ในรูปที่ 5 โดยเริ่มจากการเก็บภาพเมล็ดกาแฟคุณภาพเกรด A ทั้งภาพเดี่ยวและภาพกลุ่ม ดังตัวอย่างภาพในรูปที่ 6 ข้อมูลภาพที่ได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดฝึกสอน จำนวน 70 ภาพ และชุดตรวจสอบ จำนวน 10 ภาพ นำภาพเมล็ดกาแฟจากชุดฝึกสอนเข้าสู่กระบวนการฝึกสอนเพื่อสร้างโมเดลสำหรับใช้ตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟด้วยวิธีการตีกรอบรอบเมล็ดกาแฟ และเลือกใช้โมเดล V8-m โดยกำหนดให้ค่า Avg Loss ของแบบจำลอง มีค่าน้อยกว่า 0.01 หลังจากนั้นนำภาพชุดตรวจสอบเข้ามาตรวจสอบโมเดลเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยกำหนดให้ระบบมีความถูกต้องมากกว่า 90 % เมื่อโมเดลเป็นไปตามที่กำหนดแล้วจึงส่งออกโมเดล AI ที่ได้ เพื่อนำโมเดลไปตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟต่อไป



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของระบบ AI สำหรับตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟ



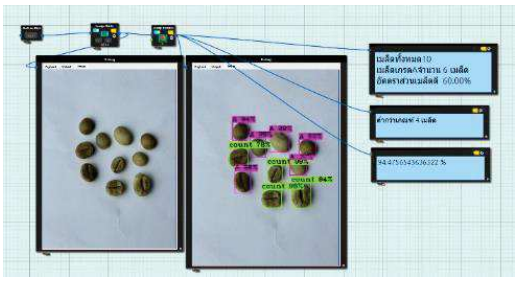
ก) ภาพเดี่ยว ข) ภาพกลุ่ม

รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพเมล็ดกาแฟพันธุ์โรบัสตา

4. ผลการทดลองใช้งาน

การทดลองใช้งานโมเดล AI ในการตรวจสอบและระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสตาที่สร้างขึ้นนำมาเขียนโปรแกรมแบบ Flow-Based Programming (FBP) ผ่านแพลตฟอร์ม CiRA CORE ซึ่งทำงานบนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะร่วมกับกล้อง USB Camera เพื่อให้สามารถตรวจสอบเมล็ดกาแฟแบบเรียลไทม์ โดยจะสั่งการให้นับจำนวนเมล็ดกาแฟตามลักษณะปรากฏ จากนั้นจำแนกเมล็ดกาแฟออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) เมล็ดคุณภาพเกรด A (เมล็ดดีที่ไม่พบข้อบกพร่องใดๆ) และ 2) เมล็ดคุณภาพต่ำกว่าเกณฑ์ (เมล็ดที่พบข้อบกพร่องที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน) และคำนวณผลสัดส่วนของเมล็ดทั้งสองกลุ่ม พร้อมแสดงค่าออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์รวมของเมล็ดกาแฟชุดนี้ดังรูปที่ 7

จากผลการทดลองใช้งานจริง ณ วิสาหกิจชุมชนวรรณะเกษตร อ.สวี จ.ชุมพร โดยเกษตรกรผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ ซึ่งมีผู้เข้าร่วมทดลองใช้งานทั้งหมด จำนวน 20 คน พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจระดับสูงสุดเป็นจำนวนร้อยละ 90 และมีความพึงพอใจ ระดับปานกลาง เป็นจำนวนร้อยละ 10 พร้อมเสนอแนะประเด็นที่ชื่นชอบในชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์นี้ด้วยว่า เป็นระบบที่ใช้งานง่ายและสามารถระบุคุณภาพของเมล็ดกาแฟได้จริง เนื่องจากมีความแม่นยำกว่าการตรวจสอบด้วยสายตาของผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มวิสาหกิจฯ



รูปที่ 7 ตัวอย่างการหน้าจอแสดงผลของชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์

5. สรุป

ชุดระบุคุณภาพเมล็ดกาแฟโรบัสตาโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์นี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนจากการประเมินคุณภาพด้วยสายตา เนื่องจากระบบนี้ใช้ AI ในการประมวลผลผ่านแพลตฟอร์ม CiRA CORE บนคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะร่วมกับกล้อง USB Camera ในตรวจสอบ อีกทั้งระบบนี้ยังได้รับการออกแบบให้สามารถแยกแยะเมล็ดกาแฟเกรด A ออกจากเมล็ดกาแฟที่พบข้อบกพร่องตามมาตรฐานที่ยอมรับได้ พร้อมแสดงผลอัตราส่วนของเมล็ดกาแฟดีแบบเรียลไทม์ได้ ทั้งนี้จากการทดลองใช้งานจริงโดยเกษตรกรจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนวรรณะเกษตร อ.สวี จ.ชุมพร พบว่า เกษตรกรผู้ทดลองใช้งานส่วนใหญ่มีความพึงพอใจในระดับสูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความสะดวกในการใช้งานและความแม่นยำของระบบ

ดังนั้นนวัตกรรมนี้จึงแสดงให้เห็นชัดเจนถึงศักยภาพในการนำเทคโนโลยี AI มาประยุกต์ใช้ในภาคการเกษตรของไทยได้ เพื่อช่วยยกระดับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ช่วยเพิ่มความมั่นใจในคุณภาพของผลผลิต และช่วยให้ผลผลิตสามารถจำหน่ายได้ในราคาที่สูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยจากหน่วยขับเคลื่อนนวัตกรรมเพื่อสังคม ประจำพื้นที่ภาคใต้ ปีงบประมาณ 2567 อุทยานวิทยาศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยทักษิณ

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. (2561). “เมล็ดกาแฟโรบัสตา” มกษ. 5700-2561.

[2] อนวัช เกรียงเกษม, เทพนรินทร์ นาหนองตูม, พงศกร พรรณรัตนศิลป์, ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ และ ชุติมา ไวยสุระสิงห์. (2566). การใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวและติดตามเชิงพื้นที่: การปรับใช้ในฉากทัศน์การแพร่ระบาดของโรคติดต่อโควิด-19. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, 34(3), 39-54.

[3] ขอบภพ ซาเสน, ฐิติเดช สมศรี และ เปรม อิงคเวชชากุล. (2567). การพัฒนาระบบตรวจจับการสวมหมวกนิรภัยโดยใช้เทคโนโลยีการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และโครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ. *วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, 2(3), 1-10.

[4] ศักดิ์ชัย ศรีมากรณ์, ฉิชา นภาพร จงกะสิกิจ และ ปิยธรณ์ เร่งเร็ว. (2567). การพัฒนากระบวนการคัดแยกภาพถ่ายระดับความรุนแรงของแผลกดทับด้วย YOLO และการเรียนรู้เชิงลึก. *วิทยสารบูรณาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรมประยุกต์*, 17(2), 43-56.

[5] วีระ ธันยาภิรักษ์, เจริญ เทพรังสฤษฎ์ และ นิวัฒ เจริญจรรยากุล. (2567). เครื่องนับกระสอบข้าวประมวลผลโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16* (น.698-701). คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม.

[6] บัณฑิต รามศรี. (28 กุมภาพันธ์ 2568). บทเรียน CiRA CORE. ห้องเรียนครูโน้ต. https://sites.google.com/obec.moe.go.th/krunote

[7] CiRA Robotics. (28 กุมภาพันธ์ 2568). คุณสมบัติของ CiRA CORE. https://www.cira-ai.com/features

[8] CiRA Robotics. (2023). CiRA CORE. [ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์]. CiRA Robotics. https://www.cira-ai.com

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนโดยใช้ไอโอทีต้นทุนต่ำ

Development and Application of a Low-Cost IoT-Based Temperature and Humidity Monitoring System for Greenhouse Environments

วรจักร์ เมืองใจ[1*] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] มนตรี เงาเดช[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] ณัฐวัฒน์ พัลวัล[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] กิตตินัน สระสวย[1] ณรงค์ นันทกุศล[1] ภูรชญา วิรัตน์ศิริ[1] พิเชษฐ์ ทานิล[2] และ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
[2]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่
E-mail: nattawat@rmutl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่มีต้นทุนต่ำ ระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และเซ็นเซอร์ BME280 จำนวน 12 จุด ติดตั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ข้อมูลถูกส่งผ่านโพรโตคอล MQTT ไปยังเซิร์ฟเวอร์กลาง และแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแดชบอร์ดออนไลน์ ระบบยังรองรับการอัปเดตเฟิร์มแวร์ระยะไกลผ่าน HTTP OTA ซึ่งช่วยลดภาระในการบำรุงรักษา จากการทดสอบเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน พบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนามีค่าความคาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 1 แสดงถึงความแม่นยำของระบบ เมื่อทำการติดตั้งจริงและเก็บข้อมูลต่อเนื่องเป็นเวลา 30 วัน พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่อุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่า 40°C และความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 30% ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ระบบมีต้นทุนการติดตั้งเพียง 500 บาทต่อจุด และค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบคลาวด์เฉลี่ย 15 บาทต่อจุดต่อเดือน จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรรายย่อย และมีศักยภาพในการต่อยอดสู่ระบบเกษตรอัจฉริยะและการเพาะปลูกแบบแม่นยำ

คำสำคัญ: ระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์, ไอโอที

Abstract

This research presents the development and application of a low-cost Internet of Things (IoT)-based system for monitoring temperature and relative humidity in greenhouse environments. The system was developed using ESP32 microcontrollers and BME280 sensors, which were installed at 12 locations inside and outside the greenhouse. Environmental data were transmitted using the MQTT protocol to a centralized server and visualized in real time through an online dashboard. Remote firmware updates were enabled via HTTP Over-the-Air (OTA), thereby reducing maintenance efforts. To validate the system's accuracy, measurements from the developed devices were compared against a standard thermometer. An average error of less than 1% was observed, indicating a high level of measurement accuracy. Over a 30-day observation period, a consistent correlation was identified between solar irradiance, temperature, and relative humidity. During daytime hours, greenhouse temperatures often exceeded 40°C, while humidity levels dropped below 30%, potentially affecting plant growth. The hardware cost was maintained at only 500 THB per node, and the average cloud service cost was approximately 15 THB per month per node. The proposed system has been demonstrated to be cost-effective, reliable, and scalable, making it highly suitable for small-scale farmers and the advancement of smart and precision agriculture.

Keywords: Temperature and humidity monitoring System, IoT

1. บทนำ

ปัจจุบันการทำเกษตรกรรมในโรงเรือนระบบปิดได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่แปรปรวน รวมถึงลดการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ [1] อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการโรงเรือนยังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะต้นทุนในการติดตั้งและบำรุงรักษาระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมแบบอัตโนมัติ ซึ่งมักมีราคาสูงและเข้าถึงได้ยากสำหรับเกษตรกรรายย่อย [2]

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ได้รับความสนใจอย่างมากในภาคการเกษตร เนื่องจากสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมของโรงเรือนแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพการเพาะปลูกและลดต้นทุนด้านแรงงาน [3] ระบบ IoT ที่สามารถติดตามและประมวลผลข้อมูลสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ระดับแสง และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของพืช [4]

การพัฒนาระบบติดตามข้อมูลสภาพแวดล้อมในโรงเรือนที่มีต้นทุนต่ำจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อตอบสนองความต้องการของเกษตรกรที่มีงบประมาณจำกัด ระบบดังกล่าวสามารถใช้เซ็นเซอร์ราคาถูกที่เชื่อมต่อผ่านเครือข่ายไร้สายเพื่อรวบรวมข้อมูลและแสดงผลผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์หรือแอปพลิเคชันบนมือถือ [5] นอกจากนี้ ระบบ IoT ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการปลูกพืชเฉพาะทาง เช่น กล้วยไม้ ซึ่งต้องการการควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างแม่นยำ [6]

ด้วยการพัฒนาแพลตฟอร์มที่ใช้เทคโนโลยี IoT ในการติดตามข้อมูลสภาพแวดล้อมที่มีต้นทุนต่ำ เกษตรกรสามารถเข้าถึงระบบควบคุมอัจฉริยะได้ง่ายขึ้น ลดการใช้ทรัพยากรที่ไม่จำเป็น และเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] การพัฒนาเทคโนโลยีนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเกษตรในยุคปัจจุบัน และสามารถช่วยสนับสนุนเกษตรกรรายย่อยให้สามารถแข่งขันในตลาดได้อย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีไอโอทีสำหรับการเกษตรอัจฉริยะ

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เป็นองค์ประกอบสำคัญในภาคเกษตรกรรม เป็นเครื่องมือช่วยในการติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมของโรงเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีไอโอทีในโรงเรือนปลูกพืชระบบปิดประกอบด้วยเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่สามารถวัดสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ และคุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ข้อมูลที่รวบรวมได้สามารถนำไปวิเคราะห์และประมวลผลผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์เพื่อใช้ในการบริหารจัดการทรัพยากรและเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะปลูก [3]

2.2 ระบบติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือน

โรงเรือนระบบปิดจำเป็นต้องมีระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างแม่นยำ การพัฒนาแพลตฟอร์มอัจฉริยะที่ใช้ IoT ในการติดตามข้อมูลสิ่งแวดล้อมแบบเรียลไทม์ [1] ระบบสามารถวัดค่าปัจจัยสำคัญ เช่น อุณหภูมิและความชื้น แล้วทำการปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมโดยอัตโนมัติ

2.3 การใช้เซ็นเซอร์และระบบเครือข่ายในโรงเรือนอัจฉริยะ

ระบบ IoT สำหรับโรงเรือนอัจฉริยะประกอบด้วยเซ็นเซอร์หลายประเภทที่สามารถวัดค่าต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ งานวิจัยของ [5] ระบุว่าเซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น เช่น DHT22 และ SHT31 เป็นเซ็นเซอร์ที่ได้รับความนิยมในระบบติดตามสภาพแวดล้อมของโรงเรือน เนื่องจากมีความแม่นยำสูงและสามารถเชื่อมต่อกับระบบประมวลผลแบบไร้สายได้ นอกจากนี้ [6] ยังได้นำเสนอระบบโรงเรือนอัจฉริยะที่สามารถส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งานผ่านเครือข่าย Wi-Fi และ LoRaWAN เพื่อให้สามารถบริหารจัดการโรงเรือนจากระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การพัฒนาแพลตฟอร์มสำหรับจัดการข้อมูลในระบบ IoT

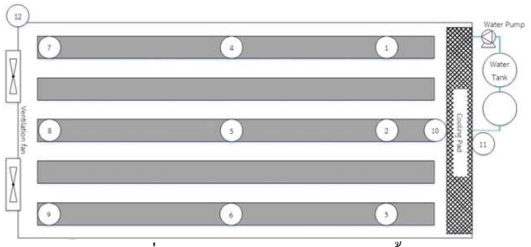
แพลตฟอร์มการจัดการข้อมูลมีบทบาทสำคัญในการทำให้ระบบ IoT ในโรงเรือนสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ระบบติดตามข้อมูลสภาพแวดล้อมในโรงเรือน [7] โดยใช้แพลตฟอร์ม ThingsBoard และ Node-RED ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ได้อย่างสะดวก โดยการนำระบบคลาวด์มาประยุกต์ใช้กับระบบติดตามข้อมูลในโรงเรือนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการใช้เทคโนโลยี IoT ในการติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมของโรงเรือนสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ลดต้นทุน และเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบระบบ IoT

ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ ESP32 เป็นตัวประมวลผลหลักสำหรับการรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นจากเซ็นเซอร์ BME280 ที่ติดตั้งในแต่ละจุดภายในโรงเรือนและนอกโรงเรือนจำนวน 12 จุด ดังรูปที่ 1 ระบบทำงานบนโพรโตคอล MQTT เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Broker และแสดงผลผ่าน Dashboard ออนไลน์ นอกจากนี้ยังรองรับการอัปเดตเฟิร์มแวร์ผ่าน HTTP OTA Update เพื่อให้สามารถอัพเกรดเฟิร์มแวร์จากระยะไกลได้โดยไม่ต้องเชื่อมต่อทางกายภาพกับอุปกรณ์



รูปที่ 1 จุดวัดค่าอุณหภูมิและความชื้น

3.2 การรับส่งข้อมูล

การสื่อสารของระบบใช้โพรโตคอล MQTT โดยอุปกรณ์แต่ละตัวจะทำหน้าที่เป็น Publisher และส่งข้อมูลไปยัง Broker ที่ทำหน้าที่เผยแพร่ข้อมูลไปยัง Subscriber ซึ่งสามารถเป็นเซิร์ฟเวอร์ที่ใช้จัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล หรือเป็น Dashboard สำหรับการแสดงผลแบบเรียลไทม์

3.3 การอัพเกรดเฟิร์มแวร์แบบ OTA

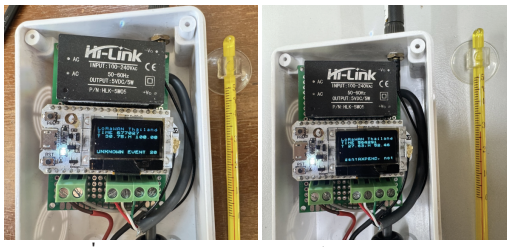
เพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาและปรับปรุงระบบ ESP32 รองรับ HTTP OTA Update ผ่านผู้ใช้งาน โดยคลิกปุ่มอัพเกรดเฟิร์มแวร์

ออนไลน์ ทำให้สามารถอัพเกรดเฟิร์มแวร์ใหม่ไปยังอุปกรณ์ผ่านอินเทอร์เน็ตไปยังเซิฟเวอร์ โดยไม่ต้องเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับคอมพิวเตอร์โดยตรง วิธีการนี้ช่วยลดเวลาและแรงงานในการบำรุงรักษาระบบเซ็นเซอร์ภายในโรงเรือน

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การทดสอบความถูกต้องในการวัดข้อมูล

อุปกรณ์ที่พัฒนาในงานวิจัยได้ ในรูปที่ 2 คณะวิจัยได้มีการทดสอบความถูกต้องและเที่ยงตรงเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ มีผลการทดสอบดังตารางที่ 1 ซึ่งมีการวัดในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จากการทดสอบพบว่าค่าความคาดเคลื่อนในการวัดเฉลี่ยน้อยกว่าร้อยละ 1



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของการวัดค่า

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องในการวัดข้อมูล

เทอร์โมมิเตอร์ (°C)	อุปกรณ์ที่พัฒนา (°C)	ค่าความคลาดเคลื่อน (°C)	ความคลาดเคลื่อน (ร้อยละ)
27.5	27.63	+0.13	0.47
31.00	30.75	-0.25	0.81

4.1 การติดตั้งและทดสอบระบบ

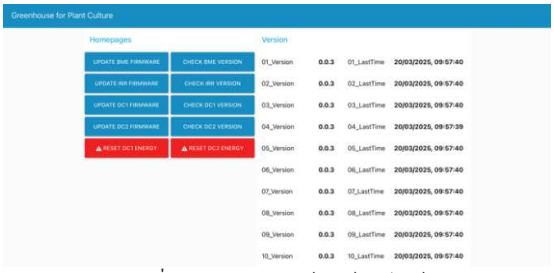
ระบบที่พัฒนาขึ้นได้มีการประกอบ และนำไปติดตั้ง จำนวน 12 จุด ภายในโรงเรือนและนอกโรงเรือนตามแผนผังที่กำหนดไว้ในรูปที่ 3 โดยเซ็นเซอร์สามารถวัดค่า อุณหภูมิและความชื้น ได้อย่างต่อเนื่องและส่งข้อมูลไปยัง MQTT Broker ได้สำเร็จ ข้อมูลที่ได้รับสามารถนำไปแสดงผลผ่าน Dashboard และบันทึกลงฐานข้อมูลได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 3 การติดตั้ง ESP32 และ BME280 จำนวน 12 จุด

4.3 การอัพเกรดเฟิร์มแวร์ผ่าน OTA

ระบบสามารถ อัปเดตเฟิร์มแวร์ของ ESP32 ผ่าน HTTP OTA Update ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผู้ใช้งานหรือผู้ดูแล สามารถกดปุ่มอัพเกรดผ่านเว็บไซต์ที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 4 โดยมีระยะเวลาในการอัพเกรดแต่ละครั้งประมาณ 15 - 30 วินาที ต่ออุปกรณ์ ซึ่งไม่มีปัญหาด้านเครือข่ายหรือข้อผิดพลาดขณะทำการอัพเกรดเฟิร์มแวร์



รูปที่ 4 ระบบอัพเกรดเฟิร์มแวร์ออนไลน์

4.4 ผลการนำไปใช้ติดตามข้อมูลภายในโรงเรือน

จากการนำอุปกรณ์ดังกล่าวไปติดตั้งจริงในโรงเรือนสามารถติดตามข้อมูลทั้งในรูปแบบรายนาที รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน หรือรายปี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าต้องการข้อมูลแบบไหน ซึ่งตัวอย่างผลของข้อมูลที่สามารถติดตามได้แบบรายวัน แสดงดังรูปที่ 5

นอกจากนี้การติดตามข้อมูลย้อนหลังเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่ามีรูปแบบที่เกิดซ้ำอย่างสม่ำเสมอในแต่ละวัน โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน อย่างไรก็ตาม มีบางวันพบค่ารังสีแสงอาทิตย์ลดลงอย่างผิดปกติ ซึ่งอาจเกิดจาก เมฆบดบังหรือฝนตก ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลง และค่าความชื้นเพิ่มสูงขึ้นกว่าปกติ

4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบ

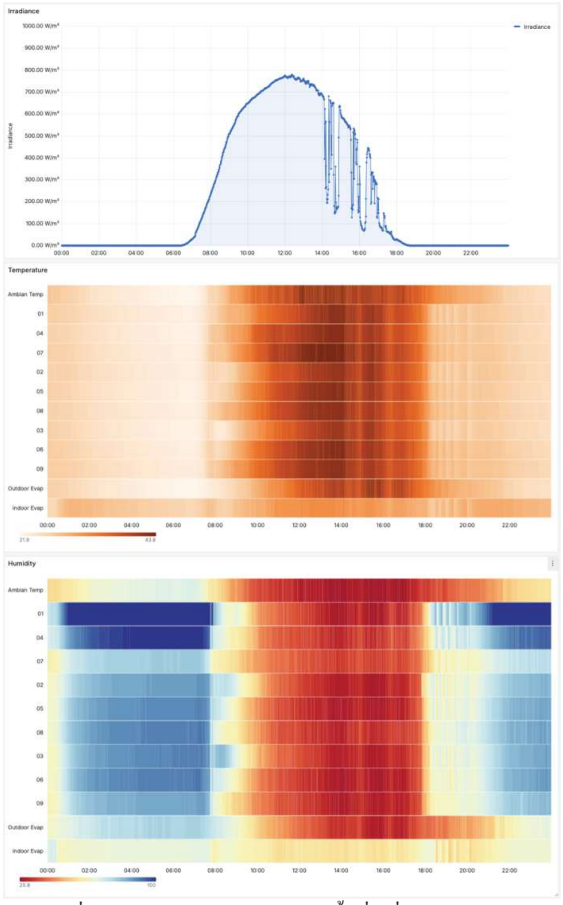
จากการออกแบบและติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน พบว่าสามารถดำเนินการได้ภายใต้งบประมาณที่ประหยัด โดยมีรายละเอียดต้นทุนเบื้องต้นของอุปกรณ์ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายในการพัฒนาระบบ

รายการ	ราคา
ไมโครคอนโทรลเลอร์	200
เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น (BME280)	100
แหล่งจ่ายไฟ สายไฟ และตัวเชื่อมต่อ	200
คลาวด์เซิฟเวอร์ (RAM 1GB, 1vCPU, 25GB SSD)	200 บาท/เดือน

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีต้นทุนการติดตั้งต่อจุดเพียง 500 บาท และมีต้นทุนฝั่งเซิร์ฟเวอร์เฉลี่ยเพียง 15 บาทต่อเดือนต่อจุด นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มจำนวนการติดตั้งได้ ทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งกับการใช้งานใน

ฟาร์มขนาดเล็กถึงขนาดกลาง และสามารถขยายจำนวนจุดวัดได้โดยไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มในสัดส่วนที่สูงมาก ระบบนี้จึงถือเป็นต้นแบบของการนำเทคโนโลยีไอโอทีมาใช้ในภาคเกษตรกรรมแบบต้นทุนต่ำ



รูปที่ 5 ข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนไปใน 1 วัน

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบไอโอทีเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 และเซ็นเซอร์ BME280 รวม 12 จุด ทั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ข้อมูลถูกส่งผ่านโพรโตคอล MQTT ไปยังคลาวด์เซิร์ฟเวอร์ และแสดงผลผ่านแดชบอร์ดแบบเรียลไทม์ พร้อมรองรับการอัปเดตเฟิร์มแวร์ระยะไกลผ่าน HTTP OTA จากการทดสอบการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ระหว่างเทอร์โมมิเตอร์กับอุปกรณ์ที่พัฒนาพบว่ามีค่าความคาดเคลื่อนน้อยกว่า ร้อยละ 1 และจากการเก็บข้อมูลต่อเนื่อง 30 วัน ส่งผลให้เห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจนระหว่างรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C และความชื้นลดต่ำกว่า 30% ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังพบว่าจุดวัดภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอกอย่างต่อเนื่อง ส่วนภายนอกมีความชื้นต่ำกว่าเนื่องจากการระเหยและการถ่ายเทอากาศ โดยที่ต้นทุนของระบบมีค่าใช้จ่ายฮาร์ดแวร์เพียง 500 บาทต่อจุดวัด และต้นทุนการใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์เฉลี่ย 15–17 บาทต่อจุดต่อเดือน แสดงถึงความเหมาะสมกับเกษตรกรรายย่อยที่ต้องการระบบควบคุมสภาพแวดล้อมแบบต้นทุนต่ำ ระบบนี้จึงมีศักยภาพสูงในการนำไปใช้กับการเกษตรอัจฉริยะและการเพาะปลูกแบบแม่นยำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาดที่ให้การสนับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการทดสอบ ทดลอง

เอกสารอ้างอิง

[1] Cai, J., Zeng, D., Zhang, T., & Ma, X. (2019). Design of intelligent greenhouse environment monitoring system based on IoT. Applied Ecology and Environmental Research, 17(4), 8449–8464

[2] Collado, J., Romero, E., & Royo, F. (2021). Low-cost smart greenhouse monitoring based on open-source hardware for educational and research purposes. Electronics, 10(4), 452.

[3] Subahi, M., & Bouazza, A. (2020). An intelligent IoT-based system design for smart agriculture. Proceedings of the 2020 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), 1–6.

[4] Muñoz, D., & Guzmán, J. (2020). A new IoT-based platform for greenhouse crop production. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(5), 453–460.

[5] M. Danita, B. Mathew, N. Shereen, N. Sharon, and J. J. Paul, "IoT Based Automated Greenhouse Monitoring System," 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), pp. 1933–1937, Jun. 2018, doi: 10.1109/iccons.2018.8662911.

[6] Kodali, R. K., Sharma, N., & Lakshmi, B. (2016). IoT based smart greenhouse. Proceedings of the 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), 1–6.

[7] Liao, Y., Lin, T. Y., & Tsai, Y. C. (2017). Implementation of IoT-based greenhouse monitoring system using Node-RED and MQTT protocol. Sensors, 19(8), 1833.

[8] González-Amarillo, M., & Corrales-Muñoz, M. (2018). An IoT-based traceability system for greenhouse crops. International Journal of Computer Applications, 180(30), 1–5.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบควบคุมติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำและสภาวะแวดล้อมอัจฉริยะ สำหรับการเลี้ยงไข่น้ำด้วยเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง

Smart Control and Monitoring System of Water Quality and Environment Quality for Wolffia globosa Using Internet of Things Technology.

ปฏิพล กวานปรัชชา[1] และ เจษฎา สารสุข[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
214 หมู่ที่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000 E-mail: Patiphon.kuan@gmail.com
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
214 หมู่ที่ 12 ตำบลหนองญาติ อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000 E-mail: Jassadat77@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมติดตามคุณภาพน้ำและสภาวะแวดล้อมอัจฉริยะสำหรับการเลี้ยงไข่น้ำด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง ระบบสามารถควบคุมการเปิด-ปิดไฟ การไหลเวียนน้ำ และตรวจวัดค่ากรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ โดยแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟน อุปกรณ์หลัก ประกอบด้วยรางเลี้ยง 3 รางบนชั้นวาง 5 ชั้น ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 Wroom 32 ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 เซนเซอร์วัดค่ากรด-ด่าง E-201-pH เซนเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้า SNP-00042 และเซนเซอร์วัดระดับน้ำ SNP-00060 ผลการวิจัยพบว่าเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ กรด-ด่าง และค่าการนำไฟฟ้า มีความแม่นยำเฉลี่ย 99.09%, 90.78% และ 93.70% ตามลำดับ ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและแสดงผลผ่าน Cloud ของ Netpie บนสมาร์ทโฟนและเว็บไซต์

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง, ไข่ผำ, ระบบควบคุม, หมุนเวียนน้ำ, อัตโนมัติ

Abstract

This research paper presents an intelligent water quality and environmental monitoring system for aquaponics using Internet of Things (IoT) technology. The system controls light scheduling, water circulation, and monitors pH and electrical conductivity through sensors, with smartphone connectivity for displaying results. The main components include three 35×12×100 cm growing troughs on a five-tier 50×120×160 cm rack, controlled by an ESP32 Wroom 32 microcontroller. Sensors used include DS18B20 temperature sensor, E-201-pH sensor, SNP-00042 electrical conductivity sensor, and SNP-00060 water level sensor. Research findings show that the temperature sensor has an average accuracy of 99.09% within the 25-35°C range, while pH and electrical conductivity sensors demonstrate average accuracy of 90.78% and 93.70%, respectively. The water circulation system performs as designed with high efficiency, with all data displayed via Netpie Cloud platform on smartphones and websites.

Keywords: Internet of Things, Wolffia, Control System, Water Circulation, Automatic

1. บทนำ

ในยุคที่ทรัพยากรธรรมชาติมีข้อจำกัดและสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง ระบบควบคุมการเพาะเลี้ยงพืชน้ำเป็นก้าวสำคัญของการเกษตรสมัยใหม่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1] ไข่ผำหรือไข่น้ำ (Wolffia globosa) กำลังได้รับความสนใจในฐานะซุปเปอร์ฟู้ดโภชนาการสูง เติบโตเร็ว และใช้ทรัพยากรน้อย [2] การเพาะเลี้ยงแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะคุณภาพน้ำที่ไม่สม่ำเสมอและมีปัจจัยสำคัญที่ต้องควบคุม ได้แก่ ค่า pH ซึ่งมีผลต่อการดูดซึมธาตุอาหาร [3] และค่า EC ที่แสดงถึงสารอาหารในน้ำ เวลาให้แสง และการหมุนเวียนน้ำ เป็นต้น การพัฒนาระบบเพาะเลี้ยงด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ตอบโจทย์ทั้งด้านความมั่นคงทางอาหาร เศรษฐกิจชุมชน [4] และสิ่งแวดล้อม เทคโนโลยีเซ็นเซอร์และระบบอัตโนมัติเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงผ่านการใช้เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 สำหรับควบคุมอุณหภูมิ เซ็นเซอร์ Analog pH Meter สำหรับควบคุมค่า pH และเซนเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ สำหรับควบคุมค่า EC และรีเลย์การควบคุมการเปิด-ปิดของหลอดไฟ LED [5]

จากผลงานวิจัยของนิตยา เกตุแก้ว [2] ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อผลผลิตไข่น้ำ พบว่าไข่น้ำมีผลผลิตเฉลี่ยสูงสุดที่ระดับความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ และระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน อีกทั้งยังพบว่าถ้าค่ากรด-ด่างของน้ำสูงกว่า 7 ติดต่อกันนาน 2-3 วันจะทำให้การดูดซึมธาตุอาหารผิดปกติไป ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่สูงจะทำให้แพลงก์ตอนพืชในน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แสดงว่าน้ำมีธาตุอาหารพืชมากเกินไป เมื่อตายลงจะสะสมอยู่บริเวณพื้นบ่อ สุดท้ายก็จะลอยขึ้นมาอยู่บริเวณผิวน้ำจะทำให้น้ำเน่าเสีย

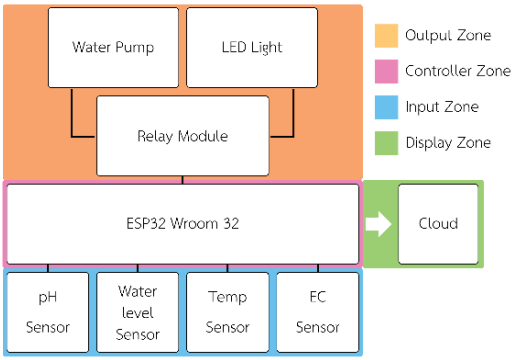
จากงานวิจัยของวิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ [6] การศึกษาค้นคว้าและในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติจะมีการรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ใช้ในการปลูกพืชให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.5 เพราะพืชสามารถนำสารละลายไปใช้ได้ดี และรักษาระดับค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.5-3.0 us/cm เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี

ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบและทดสอบการควบคุมการทำงานของระบบต่าง ๆ แม้การติดตั้งระยะแรกมีต้นทุนสูง แต่ประโยชน์ที่ได้รับคือการลดแรงงาน ประหยัดน้ำและปุ๋ย ประหยัดพื้นที่ในการเพาะเลี้ยง รวมถึงลดความผิดพลาดในการจัดการ ล้วนส่งเสริมให้การเพาะเลี้ยงมีความยั่งยืนในระยะยาว [7] อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบค่าต่าง ๆ และแสดงสถานะการทำงานของระบบได้ผ่านแอปพลิเคชันและคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เน็ตได้ตลอด 24 ชั่วโมง

2. กระบวนการออกแบบงานวิจัย

2.1 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram)

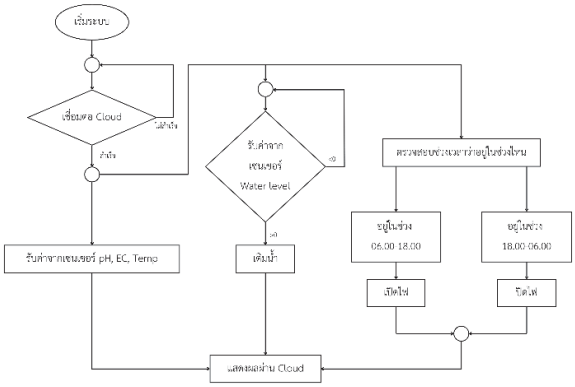
บล็อกไดอะแกรมสามารถแบ่งได้เป็น 4 พื้นที่ ได้แก่ 1) Output zone มีไว้สำหรับรับคำสั่งเปิด-ปิดจาก Relay module ที่สั่งการผ่าน Netpie 2) Display zone มีหน้าที่แสดงผลค่าจากเซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ ที่วัดได้ 3) Input zone เป็นเซนเซอร์ที่มีหน้าที่รับค่าจากเซนเซอร์เพื่อส่งเข้ามาแสดงผลไปยัง Display zone 4) Controller zone เป็นตัวประมวลผลระบบทั้งหมดและส่วนสั่งการของระบบ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรม

2.2 รูปแบบการดำเนินงาน (Flowchart)

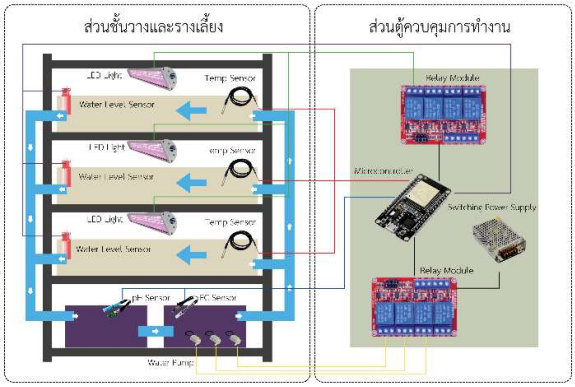
ระบบจะเริ่มทำงานที่บอร์ด ESP32 Wroom 32 จะพยายามเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตและ Cloud ของ Netpie เมื่อสำเร็จจะทำการรับค่าจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ , ค่ากรด-เบส, ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ มาประมวลผลที่บอร์ดและจะทำการตรวจสอบเวลาในขณะนั้น เมื่อเวลาอยู่ในช่วง 06.00-18.00 น. ระบบจะทำการเปิดไฟ LED แต่ถ้าไม่จะปิดไฟ และระบบจะรับค่าจากเซนเซอร์ Water level ในรางเพาะเลี้ยง ถ้าสูงเกินไปจะปิดปั๊มน้ำที่ส่งน้ำไปยังแต่ละราง เมื่ออยู่ในเกณฑ์จะเปิดปั๊มน้ำให้ทำงานต่อ และส่งผลไปยัง Cloud ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการดำเนินงาน

2.3 การออกแบบ (Construction)

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นวางและรางเลี้ยง ประกอบด้วยรางเลี้ยงขนาด 35x12x100 เซนติเมตร จำนวน 3 ราง และชั้นวางเหล็ก 5 ชั้นขนาด 50x120x160 เซนติเมตร, เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ จำนวน 3 ตัว, เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, เซนเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ, เซนเซอร์วัดระดับน้ำจำนวน 3 ตัว, ปั๊มน้ำ 9 วัตต์จำนวน 3 ตัว, และหลอดไฟ LED จำนวน 3 หลอด และส่วนตู้ควบคุมการทำงาน ประกอบไปด้วย Microcontroller ESP32, Relay module และ Switching Power Supply 12V 5A แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แนวคิดการออกแบบ

3. ผลงานวิจัย

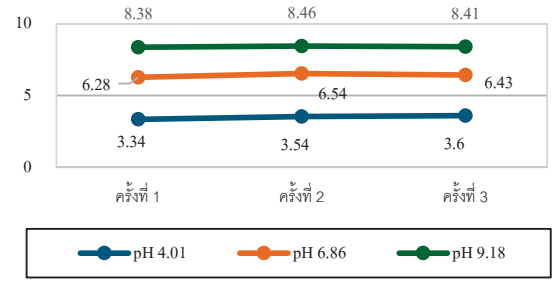
3.1 การทดสอบเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Testing)

ครั้งที่	pH 4.01		pH 6.86		pH 9.18	
	วัดได้	% แม่นยำ	วัดได้	% แม่นยำ	วัดได้	% แม่นยำ
1	3.34	83.29%	6.28	91.55%	8.38	91.28%
2	3.54	88.27%	6.54	95.33%	8.46	92.16%
3	3.60	89.77%	6.43	93.73%	8.41	91.61%
เฉลี่ย	3.49	87.03%	6.42	93.59%	8.42	91.72%

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

การทดสอบเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยการใช้เซนเซอร์ในการวัดค่าสารละลาย ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 4.01 6.86 และ 9.18 ตามลำดับจำนวน 3 ครั้ง โดยทดสอบเพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวนหาค่าความแม่นยำ และหาค่าเฉลี่ย

รูปที่ 4 กราฟผลการทดสอบเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง



การทดสอบเซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ค่า 4.01 วัดได้เฉลี่ย 3.49 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ 87.03% ค่า 6.86 วัดได้เฉลี่ย 6.42 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ 93.59% ค่า 9.18 วัดได้เฉลี่ย 8.42 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ 91.72% ค่าความแม่นยำเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 90.78%

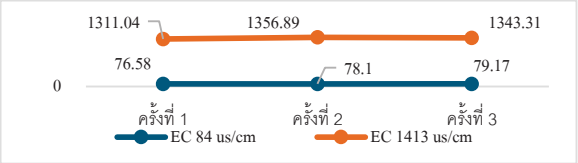
3.2 การทดสอบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (EC Testing)

วัดค่าในสารละลายทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ 84 และ 1413 us/cm ตามลำดับ จำนวน 3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาคำนวนหาความแม่นยำและค่าเฉลี่ย

ครั้งที่	EC 84 us/cm		EC 1413 us/cm	
	วัดได้	% แม่นยำ	วัดได้	% แม่นยำ
1	76.58	91.16%	1311.04	92.78%
2	78.10	92.97%	1356.89	96.03%
3	79.17	94.25%	1343.31	95.06%
เฉลี่ย	77.95	92.79%	1337.08	94.62%

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

รูปที่ 5 กราฟแสดงผลการทดสอบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

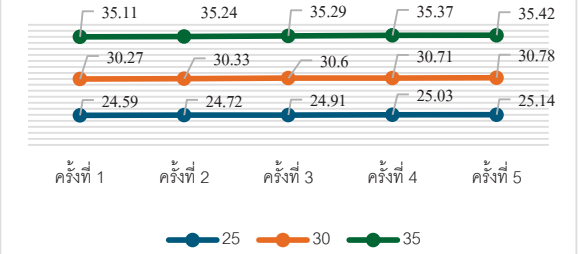


ผลการทดสอบ ที่ค่า 84 us/cm วัดได้เฉลี่ย 77.95 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ 92.79% ค่า 1413 us/cm วัดได้เฉลี่ย 1337.08 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยที่ 94.62% ค่าความแม่นยำเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 93.70%

3.3 การทดสอบระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

ทำการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18D20 ในการวัดค่า 5 ช่วงอุณหภูมิคือ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดช่วงอุณหภูมิละ 5 ครั้ง เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและค่าเฉลี่ย

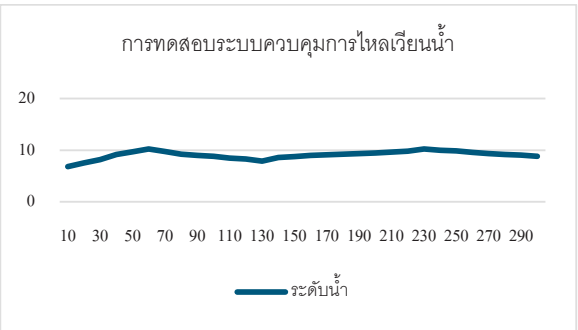
รูปที่ 6 กราฟผลการทดสอบระบบตรวจวัดอุณหภูมิ



ค่าที่ได้จากการทดสอบในอุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียสมีค่าความแม่นยำเฉลี่ย 99.52% 98.57% และ 99.18% ตามลำดับ ดังกราฟผลการทดสอบตามรูปที่ 6 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 99.09%

3.4 การทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำ

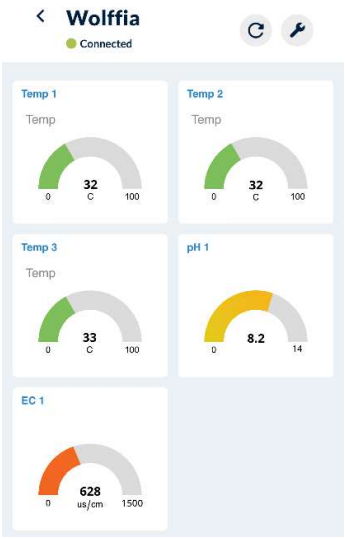
การทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำ โดยตั้งค่าให้รักษาระดับน้ำให้อยู่ในช่วง 8.0-10.0 เซนติเมตร และทำการวัดผลทำงานทุก 10 วินาที ตามกราฟการทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำ



รูปที่ 7 กราฟผลการทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำ

จากการทดสอบระบบควบคุมระดับน้ำ สามารถรักษาระดับน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ Water Level Sensor เพื่อตรวจจับระดับน้ำ ส่งกลับไปยังบอร์ดเพื่อประมวลผล และสั่งการรีเลย์เพื่อควบคุมการเปิดปิดน้ำของปั๊มน้ำของปั๊มน้ำอัตโนมัติ ให้รักษาระดับน้ำตามที่กำหนดไว้ เมื่อระดับน้ำขึ้นสูงเกินกว่าที่กำหนดจะสั่งให้ปิดปั๊มน้ำ เมื่อระดับน้ำลดลงกลับเข้าสู่ภาวะปกติจะสั่งให้ปั๊มน้ำกลับมาทำงานตามปกติ และทำงานในรูปแบบนี้วนลูปไปเรื่อย ๆ

3.5 ระบบ Cloud ของ Netpie



รูปที่ 8 กราฟผลการทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำ

จากรูปที่ 8 แสดงหน้าแดชบอร์ดของ Netpie บนสมาร์ทโฟน [8] ประกอบไปด้วย 1) ส่วนแสดงผลอุณหภูมิ Temp 1 แสดงค่าอุณหภูมิของรางที่ 1 Temp 2 แสดงค่าอุณหภูมิของรางที่ 2 และ Temp 3 แสดงค่าอุณหภูมิของรางที่ 3 2)ส่วนแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่าง pH 1 แสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ และ 3)ส่วนแสดงผลค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ EC 1 แสดงผลค่าการนำไฟฟ้าของน้ำของระบบ

4. สรุปผล

ระบบควบคุมติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำและสภาวะแวดล้อมอัจฉริยะสำหรับการเลี้ยงไข่น้ำด้วยเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง ได้แบ่งการทดสอบระบบออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ การทดสอบเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ที่ 87.03% 93.59% และ 91.72% และเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 90.78% การทดสอบเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำค่าเฉลี่ยที่วัดได้จากสารละลายมีค่าความแม่นยำ 92.79% 94.62% และเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 93.70% การทดสอบระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ค่าเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าความแม่นยำเฉลี่ย 99.52% 98.57% และ 99.18% และเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 99.09% การทดสอบระบบควบคุมการไหลเวียนน้ำสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรักษาระดับน้ำให้อยู่ในช่วง 8.0-10.0 เซนติเมตรได้ และการทำงานบน Cloud ของ Netpie บทสมาร์ทโฟนและคอมพิวเตอร์ผ่านอินเตอร์เน็ตสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถแสดงผลจากเซนเซอร์ได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพ สามารถใช้ในเพาะเลี้ยงไข่น้ำหรือไข่ผำและนำไปประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงพืชน้ำชนิดอื่น ๆ ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนครพนมสำหรับการสนับสนุน ขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ค่อยสนับสนุนและให้ความกรุณาแนะนำ ตรวจตราแก้ไขเนื้อหา ตลอดจนให้กำลังใจในการทำการศึกษาค้นคว้า

เอกสารอ้างอิง

[1] PPTV. (2023, กันยายน 6). ไข่ผำ: ซุปเปอร์ฟู้ดโปรตีนสูง ทางเลือกใหม่ของสายสุขภาพ. PPTVHD36.pptvhd36.com/health/food/6008

[2] นิตยา เกตุแก้ว, และศักดิ์ศรี รักไทย. (2564). การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไข่น้ำภายใต้ระบบควบคุมแสง. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร, 39(3), 89-99.

[3] กันย์สินี พันธ์วนิชดำรง, และสุขุม เร้าใจ. (2551). การศึกษาทดลองเพาะเลี้ยงไข่น้ำ (Wolffia arrhiza (L.) Wimm.) และการนำไปใช้ปรับปรุงคุณภาพสีปลาทอง. ภาควิชาการจัดการประมง, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[4] บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. (2544). คุณค่าทางโภชนาการของไข่ผำและการประยุกต์ใช้ในอาหารสัตว์และมนุษย์. รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.

[5] บริษัท สยามคูโบต้า คอร์ปอเรชั่น จำกัด. (2563). เซ็นเซอร์วัดความชื้นดิน: สืบค้นจาก https://kas.siamkubota.co.th

[6] วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ. (2561). เครื่องปรับค่า pH ในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบอัตโนมัติ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[7] เนต้าฟิม (ประเทศไทย). (2562). ระบบน้ำสำหรับโรงเรือนเพาะปลูก. สืบค้นจาก https://www.netafim.co.th

[8] NECTEC. (2020). NETPIE Tutorials. สืบค้นจาก https://2015.netpie.io/tutorials

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898

Automatic testing machine for circuit breakers in accordance with IEC 60898 standard

พนัสชัย ศรีบำรุง อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์* กันต์ธีร์ สินะวงค์และโสภณวิชญ์ กองมงคล

*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120 โทรศัพท์ 0-2287-9600 ต่อ 2105 Email : Apirach.r@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

เซอร์กิตเบรกเกอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญในการป้องกันระบบไฟฟ้าจากกระแสเกินและไฟฟ้าลัดวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและลดความเสี่ยงจากอัคคีภัย การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงมีความจำเป็น เพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์ทำงานได้อย่างปลอดภัยและสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 60898 งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถประเมินได้ทั้งสมรรถนะทางไฟฟ้าและคุณสมบัติเชิงกลของอุปกรณ์ ช่วยลดความผิดพลาดจากมนุษย์ เพิ่มความแม่นยำในการทดสอบทั้งในกระบวนการผลิตและการตรวจสอบภาคสนาม ระบบทดสอบประกอบด้วยการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 มอเตอร์ปรับวาริแอค และโมดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำการทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60898 ได้อย่างถูกต้อง มีความสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ

คำสำคัญ: เซอร์กิตเบรกเกอร์, มาตรฐาน IEC 60898, วาริแอค
หม้อแปลงลดแรงดัน

Abstract

Circuit breakers are essential devices for protecting electrical systems against overcurrent and short circuits, helping to prevent equipment damage and reduce fire hazards. Performance testing of circuit breakers is crucial to ensure safe and reliable operation in compliance with the IEC 60898 standard. This study presents the design and development of an automatic testing machine for circuit breakers, capable of evaluating both electrical performance and mechanical properties. The system minimizes human errors and enhances testing accuracy for both manufacturing quality control and field inspections. The testing system incorporates an Arduino UNO R3 microcontroller, a motor-driven variac, and a Hall-effect current sensor module. Experimental results demonstrate that the developed prototype can accurately perform tests according to the IEC 60898 standard, offering convenient, fast, and precise operation.

Keywords: Circuit Breaker, IEC 60898 Standard, VARIAC, Step Down Transformer

1. บทนำ

ในระบบไฟฟ้าทั้งภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรม เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) ถือเป็นอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทำหน้าที่ตัดวงจรไฟฟ้าโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดหรือเกิดกระแสลัดวงจร เพื่อป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและลดความเสี่ยงจากอัคคีภัย อย่างไรก็ตาม เพื่อให้มั่นใจว่าเซอร์กิตเบรกเกอร์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยตามข้อกำหนด จำเป็นต้องมีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอและเป็นระบบ ตามมาตรฐาน IEC 60898 ซึ่งได้ข้อกำหนดและวิธีการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์สำหรับใช้งานทั่วไปอย่างครอบคลุม ทั้งด้านสมรรถนะทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกล เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยในระดับสากล ดังนั้น เครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่สามารถดำเนินการทดสอบตามมาตรฐานนี้ได้อย่างครบถ้วน จึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินและรับรองคุณภาพของอุปกรณ์

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายถึงหลักการทำงาน คุณลักษณะสำคัญ และกระบวนการทดสอบของเครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898 ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวก ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และเพิ่มความแม่นยำในการประเมินคุณภาพของเซอร์กิตเบรกเกอร์ในกระบวนการผลิตหรือการตรวจสอบซ้ำในภาคสนาม

2. ทฤษฎี

2.1 เซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898

เซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898 เหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าเกินในบ้านเรือนและอาคารทั่วไปที่มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไม่เกิน 440 โวลต์ ความถี่ 50 หรือ 60 เฮิรตซ์ พิกัดกระแสไม่เกิน 125 แอมแปร์ และพิกัดการตัดกระแสลัดวงจรไม่เกิน 25 กิโลแอมแปร์ จำนวนขั้วอาจมีได้ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ขั้ว พิกัดกระแสใช้งาน ตัวอย่างการเรียกประเภทและพิกัดกระแสใช้งาน เช่น C16 คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภท C พิกัดกระแสใช้งาน 16 แอมแปร์ ซึ่งคุณสมบัติเวลาและค่ากระแสตามมาตรฐาน IEC 60898 ดังตารางที่ 1

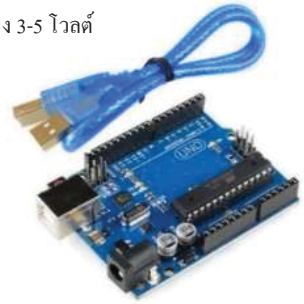
ตารางที่ 1 เกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐาน IEC 60898

การทดสอบ	แบบ	กระแสไฟฟ้าทดสอบ	ภาวะเริ่มต้น	ขีดจำกัดเวลาการทริปหรือเวลาการไม่ทริป	ผลทดสอบที่ได้	หมายเหตุ
1	B, C, D	1.13 I_n	เย็น [1]	$t \geq 1$ h (สำหรับ $I_n \leq 63$ A) $t \geq 2$ h (สำหรับ $I_n > 63$ A)	ไม่ทริป	-
2	B, C, D	1.45 I_n	ทันทีหลังการทดสอบ 1	$t < 1$ h (สำหรับ $I_n \leq 63$ A) $t < 2$ h (สำหรับ $I_n > 63$ A)	ทริป	กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ภายในเวลา 5 s
3	B, C, D	2.55 I_n	เย็น [1]	$1 s < t < 60 s$ (สำหรับ $I_n \leq 32$ A) $1 s < t < 120 s$ (สำหรับ $I_n > 32$ A)	ทริป	
4	B C D	3 I_n 5 I_n 10 I_n	เย็น [1]	$t \geq 0.1$ s	ไม่ทริป	ป้อนกระแสไฟฟ้าโดยการปิดของสวิตช์ช่วย
5	B C D	5 I_n 10 I_n 50 I_n	เย็น [1]	$t < 0.1$ s	ทริป	ป้อนกระแสไฟฟ้าโดยการปิดของสวิตช์ช่วย

หมายเหตุ [1] คำว่า "เย็น" หมายความว่า ไม่มีการป้อนโหลดก่อน ที่อุณหภูมิสอบเทียบอ้างอิง

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 เบอร์ ATmega 328 ดังรูปที่ 1 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลเอวีอา (AVR) เบอร์ ATmega 328 เป็นตัวประมวลผลที่มีขาดิจิตอลอินพุต และขาดิจิตอลเอาต์พุต 14 ขา มีขาแอนะล็อกอินพุต 6 ขา และรองรับเอาต์พุตแบบ Pulse Width Modulation 5 ขา จะมีหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลขนาด 32 กิโลไบต์ (Kilobyte) มีหน่วยความจำแรม (RAM) ขนาด 2 กิโลไบต์ หน่วยความจำถาวร (EEPROM) ขนาด 1 กิโลไบต์ ตัวบอร์ดสามารถใช้ไฟเลี้ยงกระแสตรง 3-5 โวลต์



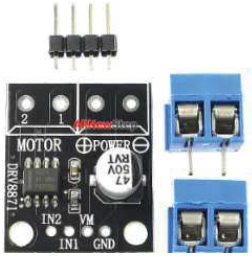
รูปที่ 1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3

2.3 มอเตอร์กระแสตรง และ มอดูลขับมอเตอร์ DRV8871

มอเตอร์กระแสตรง ดังรูปที่ 2 จะทำหน้าที่ ปรับแรงดันที่จะป้อนให้กับหม้อแปลงเพิ่มกระแส โดยขับผ่าน มอดูลขับมอเตอร์ DRV8871 ดังรูปที่ 3 ที่ควบคุมมาจาก Arduino UNO R3 ซึ่งสามารถควบคุมการหมุนได้ทั้ง ตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา ลักษณะของอุปกรณ์



รูปที่ 2 มอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 3 มอดูลขับมอเตอร์ DRV8871

2.4 หม้อแปลงปรับแรงดัน และ หม้อแปลงเพิ่มกระแส

หม้อแปลงปรับแรงดัน ดังรูปที่ 4 ทำหน้าที่ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงเพิ่มกระแส ซึ่งจะถูกปรับผ่านมอเตอร์กระแสตรง แรงดันที่ออกจาก หม้อแปลงปรับแรงดัน จะถูกส่งเข้าหม้อแปลงเพิ่มกระแสพิกัด 600W ที่มีจำนวนรอบ 425 / 26 รอบ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าแรงดันสูงให้กลายเป็นไฟฟ้าที่มีแรงดันต่ำ เพื่อให้จ่ายกระแสได้สูงขึ้น ดังรูปที่ 5 เพื่อวัตถุประสงค์ให้จ่ายกระแสได้สูงขึ้นโดยที่ กินกำลังไฟฟ้าไม่สูง



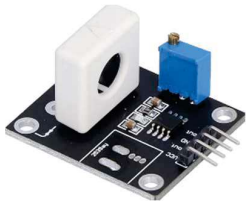
รูปที่ 4 หม้อแปลงปรับแรงดัน



รูปที่ 5 หม้อแปลงเพิ่มกระแส

2.5 มอดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect รุ่น WCS1600

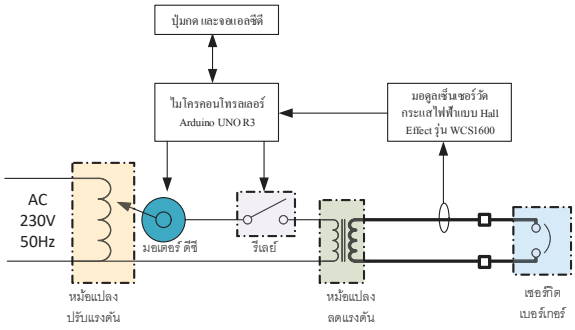
เป็นมอดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ซึ่งสามารถตรวจจับทั้งกระแสไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสไฟฟ้ากระแสสลับได้ เซ็นเซอร์นี้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในระบบไฟฟ้าที่ต้องการวัดกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องสัมผัสกับวงจรไฟฟ้าโดยตรง มอดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect รุ่น WCS1600 รูปที่ 7



รูปที่ 7 โมดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect รุ่น WCS1600

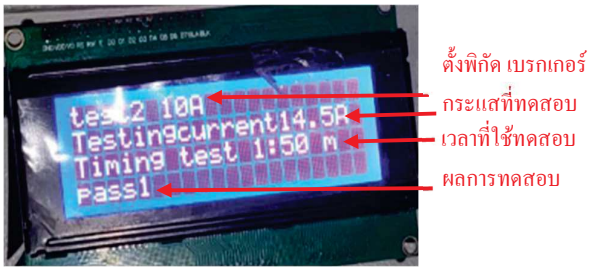
3. การออกแบบและหลังการทำงาน

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมเครื่องทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898

จากรูปที่ 8 ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่เป็นภาคกำลัง ซึ่งประกอบไปด้วยหม้อแปลงปรับแรงดัน ซึ่งจะปรับแรงดันขาออกด้วยมอเตอร์ดีซี แรงดันขาออกจะผ่านโมดูลรีเลย์ เพื่อตัดต่อ แรงดันที่จ่ายให้กับหม้อแปลงเพิ่มกระแส ขาออกของหม้อแปลงเพิ่มกระแสจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีปริมาณต่ำ เพื่อรองรับกระแสได้สูงขึ้น จากนั้นกระแสที่ได้จะเข้าสู่เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต่อแบบลัดวงจรอยู่ เพื่อทำการทดสอบ และส่วนที่ 2 คือ ส่วนควบคุม กระแสที่ไหล่ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์จะถูกวัดด้วย มอดูลเซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าแบบ Hall Effect ซึ่งเอาพุต์ของโมดูลวัดกระแส จะเป็นแรงดัน ที่ถูก ยกระดับขึ้นมา 2.5V แล้วเข้าขาแอนะล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลตาม นอกจากนี้ยังมีส่วนของสวิตซ์ 3 ตัว และคีย์แพด เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของตัวเครื่อง ส่วนโมดูลขับมอเตอร์ DRV8871 จะใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสตรงชนิดเกียร์หนอนให้หมุนไปตามทิศทางที่ต้องการ โดยการทำงานจะเริ่มจากการกดสวิตซ์ S1 เพื่อจ่ายไฟให้กับขาออกของวาริแอค จากนั้นปรับวาริแอคด้วยการกดคีย์แพดสั่งมอเตอร์กระแสตรงชนิดเกียร์หนอนให้หมุนวาริแอค เพื่อให้ได้ค่ากระแสใช้งานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่ต้องการทดสอบจะทดสอบที่ 1.13 และ 1.45 เท่า ส่วนสวิตซ์ S3 ทำหน้าที่ให้วาริแอคไม่จ่ายแรงดันให้กับหม้อแปลงลดแรงดัน และสวิตซ์ S2 ทำหน้าที่เหมือน S1 แต่จะทดสอบที่ 2.55 เท่า ซึ่งทุกการทดสอบ เวลาและสถานะต่างๆจะแสดงบนมอดูลจอแอลซีดี ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 รายละเอียดสถานะที่แสดงบนจอแอลซีดี

4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท B พิกัดกระแสใช้งาน 16 แอมแปร์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท C พิกัดกระแสใช้งาน 10 แอมแปร์ ที่พิกัดกระแสทดสอบ 1.13 เท่าของพิกัดกระแส ผลการทดสอบ เบรกเกอร์ ทั้ง 2 ประเภท ไม่ปลดวงจร ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภท B และ C ที่พิกัดกระแสทดสอบ 1.13 เท่าของพิกัดกระแส

ประเภท	กระแสไฟฟ้าที่ทดสอบ	ภาวะเริ่มต้น	ขีดจำกัดเวลาการทริป	ค่าเวลาการทริป	ผลทดสอบ	ผลการวิเคราะห์
B	1.13x16=18.08 A	เย็น	> 1 ชั่วโมง	ไม่ทริป	ไม่ปลดวงจร	ผ่าน
C	1.13x10=11.3 A	เย็น	> 1 ชั่วโมง	ไม่ทริป	ไม่ปลดวงจร	ผ่าน

4.2 การทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท B พิกัดกระแสใช้งาน 16 แอมแปร์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท C พิกัดกระแสใช้งาน 10 แอมแปร์ ที่พิกัดกระแสทดสอบ 1.45 เท่าของพิกัดกระแส ผลการทดสอบ ปลดวงจร ที่เวลา 2นาที 30วินาที สำหรับ เบรกเกอร์ประเภท B และ ที่เวลา 1นาที 50วินาที สำหรับ เบรกเกอร์ประเภท C ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภท B และ C ที่พิกัดกระแสทดสอบ 1.45 เท่าของพิกัดกระแส

ประเภท	กระแสไฟฟ้าที่ทดสอบ	ภาวะเริ่มต้น	ขีดจำกัดเวลาการทริป	ค่าเวลาการทริป	ผลทดสอบ	ผลการวิเคราะห์
B	1.45x16=23.2 A	ทันที*	< 1 ชั่วโมง	2:30 Min	ปลดวงจร	ผ่าน
C	1.45x10=14.5 A	ทันที*	< 1 ชั่วโมง	1:50 Min	ปลดวงจร	ผ่าน

*ทันทีหลังจากทดสอบที่พิกัด 1.13 เท่า

4.3 การทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท B พิกัดกระแสใช้งาน 16 แอมแปร์ และเซอร์กิตเบรกเกอร์ ประเภท C พิกัดกระแสใช้งาน 10 แอมแปร์ ที่พิกัดกระแสทดสอบ 2.55 เท่าของพิกัดกระแส ผลการทดสอบ ปลดวงจร ที่เวลา 6.2 วินาที สำหรับ เบรกเกอร์ประเภท B และที่เวลา 7วินาที สำหรับ เบรกเกอร์ประเภท C ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์ประเภท B และ C ที่พิกัดกระแสทดสอบ 2.55 เท่าของพิกัดกระแส

ประเภท	กระแสไฟฟ้าที่ทดสอบ	ภาวะเริ่มต้น	ขีดจำกัดเวลาการทริป	ค่าเวลาการทริป	ผลทดสอบ	ผลการวิเคราะห์
B	2.55x16=40.08 A	เย็น	> 1 S & < 60 S	6.2 S	ปลดวงจร	ผ่าน
C	2.55x10=25.5 A	เย็น	> 1 S & < 60 S	7 S	ปลดวงจร	ผ่าน

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบอัตโนมัติตามมาตรฐาน IEC 60898 โดยสามารถตั้งค่ากระแสเพื่อทดสอบ เซอร์กิตเบรกเกอร์ แบบอัตโนมัติและแสดงผลการทดสอบ ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดที่ 80 A ซึ่งจะทดสอบ เซอร์กิตเบรกเกอร์ ที่พิกัดสูงสุด ที่ 32 A จากการทดสอบสรุปได้ว่าจากพิกัดกระแส 16 A Type B และ 10A Type C ผลการทดสอบที่พิกัด 1.13 , 1.45 และ 2.55 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60898 ซึ่งแสดงผลเวลาและสถานะการทดสอบทั้งหมดผ่านแสดงบนหน้าจอแอลซีดี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติของเซอร์กิตเบรกเกอร์ตามมาตรฐาน IEC 60898 สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามโปรแกรมที่ตั้งไว้

เอกสารอ้างอิง

[1] International Electrotechnical Commission IEC. 2017. IEC 60898-1 Circuit-breakers for overcurrent for household and similar installations [online] Available : https://webstore.iec.ch/publication/21972#additionalinfo (30 September 2024).

[2] ปิยะ ศุภวราสุวัฒน์. 2559. ไมโครคอนโทรลเลอร์. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[3] Texas Instruments. 2016. DRV8871 3.6-A Brushed DC Motor Driver With Internal Current Sense (PWM Control). [online] Available : https://www.alldatasheet.com/datasheet- pdf/view/799728/TI1/DRV8871.html (30 September 2024).

[4] อรุณรัตน์ วงษา และเอกชัย เทพสุริยะ. 2552. “การควบคุมความเร็วรอบและทิศการหมุนของมอเตอร์กระแสตรง.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] Perfect. 2563. หม้อแปลงปรับค่าแรงดัน VARIAC. [online] Available : https://www.perfectthai.net/product-category/variable-transformer (18 October 2023)

[6] ช่างไฟดอทคอม. 2021. หม้อแปลงไฟฟ้า step down. [online] Available : https://www.changfi.com/fix/2021/08/11/step-down (11 December 2023).

[7] สมาคมช่างเหมาไฟฟ้าและเครื่องกลไทย. 2559. คู่มือการติดตั้งแผงสวิตช์ไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : โชติอนันต์ ศรีเอชั่น.

[8] Winson. 2020. WCS 1600. [online] Available : https://www.datasheetq.com/en/pdf-view/WCS1600-WINSON (1 August 2024).

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที

Development of a DC Energy Measurement and Data Transmission System via Industrial Protocols Using Internet of Things (IoT)

วรจักร์ เมืองใจ[1*] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] มนตรี เงาเดช[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] ณัฐวัฒน์ พัลวัล[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] กิตตินัน สระสวย[1] ณรงค์ นันทกุศล[1] พิเชษฐ์ ทานิล[2] และ จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

[2]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่

E-mail: nattawat@rmutl.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถรองรับโพรโตคอลอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า โดยมีค่าความผิดพลาดจากการเทียบเคียง จำนวน 5 ครั้งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าไม่เกินร้อยละ 1.5 และสามารถส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอลมาตรฐาน ได้แก่ MQTT Modbus RTU Modbus TCP/IP และ LoRa ได้แบบเวลาจริง อุปกรณ์ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างที่แยกวงจรกำลังออกจากวงจรควบคุม เพื่อเพิ่มความปลอดภัย ลดผลกระทบจากแรงดันไฟฟ้าสูง และยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบ โดยระบบวัดแรงดันใช้เทคนิคการแบ่งแรงดันผ่านตัวต้านทาน และการวัดกระแสใช้ตัวต้านทานชั้นร่วมกับตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลและส่งค่าที่วัดได้ผ่านเครือข่ายสื่อสาร นอกจากนี้ ระบบยังสามารถตั้งค่าผ่านเว็บเซิฟเวอร์ในตัวอุปกรณ์ได้โดยตรงจากเว็บเบราว์เซอร์ และสามารถเลือกโหมดการสื่อสารได้อย่างยืดหยุ่น จากการทดสอบพบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งด้านการวัดค่าและการสื่อสาร

คำสำคัญ: อุกกรณ์วัดไฟฟ้ากระแสตรง, ไอโอที, โพรโตคอลอุตสาหกรรม

Abstract

This research presents the development of a DC energy measurement and data transmission device that is designed to support industrial communication protocols using Internet of Things (IoT) technology. The device developed is capable of measuring voltage, current, power, and energy, with a maximum error margin of 1.5% when compared to a standard reference meter. Real-time data transmission is enabled via standard protocols, including MQTT, Modbus RTU, Modbus TCP/IP, and LoRa. The hardware of the device is structured with a clear separation between the power circuit and the control circuit, in order to enhance safety, reduce the impact of high voltage, and extend the lifespan of internal electronic components. Voltage measurement is implemented using a resistor-based voltage divider technique, while current is measured through a shunt resistor connected to a high-resolution analog-to-digital converter. The analog signals are digitized and processed by a microcontroller, which is also responsible for data transmission over the selected communication network. Furthermore, device configuration is enabled through a built-in web server, which can be accessed directly via a standard web browser, allowing communication modes to be selected flexibly. Based on the testing results, continuous and reliable operation was observed in both measurement and communication functions.

Keywords: DC Meter, Internet of Things(IoT), Industrial Protocol

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมทั่วโลก โดยเฉพาะระบบพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในหลายภาคส่วน เช่น ระบบผลิตพลังงานหมุนเวียน ยานยนต์ไฟฟ้า หรือระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ ทั้งนี้เนื่องจากระบบไฟฟ้ากระแสตรงมีข้อได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ความเสถียรในการจ่ายไฟฟ้า และความสามารถในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะในระบบที่มีการบูรณาการแหล่งพลังงานหมุนเวียนและการจัดเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นโครงสร้างสำคัญของการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานแห่งอนาคต [1]

หนึ่งในปัญหาหลักที่พบคือ การวัดพลังงานในระบบ DC-grid ที่ยังขาดมาตรฐานและความแม่นยำ ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมและบริหาร

จัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือนยังต้องการ ระบบตรวจวัดพลังงานที่สามารถทำงานเข้ากับระบบไอโอที เพื่อให้สามารถรวบรวม วิเคราะห์ และส่งข้อมูลการใช้พลังงานไปยังผู้ใช้หรือผู้ให้บริการได้แบบเวลาจริง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถสื่อสารข้อมูลได้แบบเวลาจริง และมีการสื่อสารรองรับที่หลากหลาย ได้แก่ MQTT Modbus RTU Modbus TCP/IP และ LoRa ในตัวของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงนี้ สำหรับนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ ที่มีโพรโตคอลที่รองรับได้ ทำให้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบไอโอทีได้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการพลังงาน ลดต้นทุนค่าไฟฟ้า

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลักการของ DC Metering มีพื้นฐานจากการใช้ตัววัดพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอาศัยหลักการของ Ohm's Law (V = IR) และการวัดค่ากระแสผ่านเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น Hall-effect Sensors หรือ Shunt Resistors เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจวัด [2] นอกจากนี้ การพัฒนา Smart DC Meter ได้มีการนำเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย เช่น LoRa Zigbee NB-IoT และ 5G มาใช้ในการรับส่งข้อมูลพลังงานแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลการใช้พลังงานจากระยะไกลได้ผ่าน Cloud Computing และ Web-Based Applications [3]

ระบบ IoT-Enabled Smart Metering ได้ถูกนำมาใช้ในโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ และการจัดการพลังงานภายในอาคารพาณิชย์และภาคอุตสาหกรรม ซึ่งช่วยให้การควบคุมโหลดพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับเทคนิคการวัดพลังงานที่แม่นยำขึ้น นักวิจัยบางกลุ่มได้เสนอการใช้ DC/DC Isolated Power Converter เพื่อช่วยเพิ่มความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในระบบวัดพลังงาน การพัฒนา IoT-Based Smart Energy Metering System ยังช่วยให้ผู้บริโภคสามารถตรวจสอบข้อมูลพลังงานแบบเรียลไทม์และนำไปใช้ในการวางแผนด้านพลังงานได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในบริบทของเมืองอัจฉริยะและอุตสาหกรรมพลังงานทดแทน [4]

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีการแบ่งโครงสร้างระบบออกเป็น วงจรกำลังและวงจรควบคุม เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากแรงดันไฟฟ้าสูงที่อาจเกินขีดจำกัดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวัดและประมวลผลข้อมูล

3.1 การออกแบบวงจรการทำงานของอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง

การวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ในช่วง 0 – 1000 V โดยอาศัยเทคนิคการแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทาน (Voltage Divider) เนื่องจากสามารถลดแรงดันไฟฟ้าได้ตามสัดส่วนของค่าความต้านทาน และมีความแม่นยำในการวัดสูง โดยเลือกใช้ตัวต้านทานจำนวน 6 ตัว ประกอบด้วย R1-R6 โดยจะวัดแรงดันตกคร่อมที่ R6 เพื่อให้แรงดันอินพุตสามารถลดระดับลงสู่ช่วงที่เหมาะสมสำหรับการใช้วิธีอ่านค่าแบบ ADC โดยใช้ รุ่น ADS1115 ซึ่งมีช่วงการวัดอยู่ที่ 0-5V ดังสมการที่ 1

$$V_{out} = V_i \times \frac{R_6}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \quad (1)$$

โดยที่

V_i	คือ แรงดันไฟฟ้าอินพุต (0-1000V)
V_{out}	คือ แรงดันที่ตัวต้านทาน R_6 (0-5V)
R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 และ R_6	คือ ค่าตัวต้านทานในวงจร

ในการออกแบบระบบวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยนี้ ใช้ ตัวต้านทานชั้น (Shunt Resistor) อ่านค่าแบบ ADC โดยใช้ รุ่น ADS1115 โดยที่ตัวต้านทานชั้นเป็นอุปกรณ์สำคัญในการวัดกระแส เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สร้างแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตามกฎของโอห์ม (V=IR) โดยที่ค่าความต้านทานต้องต่ำมาก เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น และต้องเลือกให้เหมาะสมกับช่วงกระแสสูงสุดที่ต้องการวัด ดังสมการที่ 2

$$V_{shunt} = \mathrm{I}_{max} \times R_{shunt} \quad (2)$$

โดยที่

V_{shunt}	คือ แรงดันตกคร่อมที่ตัวต้านทานชั้น
I_{max}	คือ กระแสสูงสุดที่ต้องการวัด
R_{shunt}	คือ ค่าความต้านทานของตัวต้านทานชั้น

กำลังไฟฟ้า (P) หมายถึงอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ 3

$$P = V \times I \quad (3)$$

โดยที่

P	คือกำลังไฟฟ้า (วัตต์, W)
V	คือแรงดันไฟฟ้า (โวลต์, V)
I	คือกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์, A)

จากสมการที่ 3 การใช้งานจริง การวัดกำลังไฟฟ้ากระทำโดยการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าผ่านเซ็นเซอร์ที่มีความ

แม่นยำสูง แล้วนำค่าที่วัดได้มาคำนวณผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ได้แบบเรียลไทม์ โดยที่ค่าพลังงานไฟฟ้า (E) มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

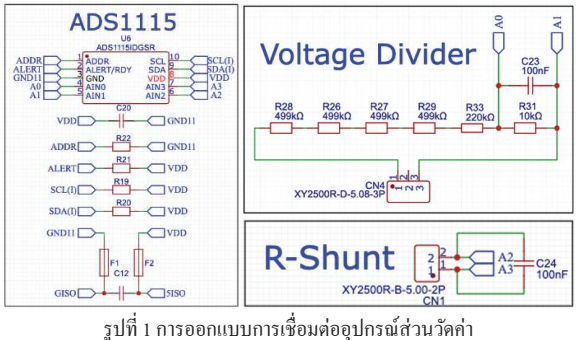
$$E = P \times t \tag{4}$$

โดยที่

E	คือ พลังงานไฟฟ้า (Joule หรือ kWh)
P	คือ กำลังไฟฟ้า (Watt, W)
t	คือ ช่วงเวลาที่พลังงานถูกใช้ (วินาที)

3.2 การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวัดค่าและการส่งค่าผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรม

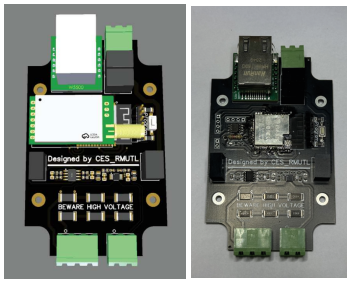
งานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 เชื่อมต่อกับส่วนวงจรกำลังและอ่านค่าด้วยวงจรควบคุมซึ่งจะทำการอ่านค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจาก ADS1115 เมื่ออ่านค่าได้แล้ว จะคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าโดยคำนวณจากสมการที่ 3 และ 4 เมื่อประมวลผลแล้วได้ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าครบแล้ว จะสามารถส่งค่าเหล่านี้ผ่านโพรโตคอลการสื่อสารแบบมีสายหรือแบบไร้สายได้ โดยมีโพรโตคอลที่รองรับได้คือ MQTT Modbus RTU Modbus TCP/IP และ LoRa นอกจากนี้ ยังมีระบบปรับเฟิร์มแวร์ให้เป็นปัจจุบันผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบ HTTP OTA Update ได้ มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในส่วนการวัดค่า ที่ใช้วงจรแบ่งแรงดัน และวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานชั้น เชื่อมต่อกับ ads1115 ในการวัดค่ากระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 1 อีกทั้งยังมีการออกแบบให้สามารถสามารถตั้งค่าได้ผ่านเว็บเซิฟเวอร์บนเบราว์เซอร์ได้ ซึ่งจะสามารถตั้งค่าการเชื่อมต่อไวไฟ การเลือกให้ส่งค่าผ่าน MQTT การเลือกให้ส่งค่าผ่าน Modbus RTU การเลือกให้ส่งค่าผ่าน Modbus TCP/IP และการเลือกให้ส่งค่าผ่าน LoRa ซึ่งทั้งหมดสามารถเลือกผ่านเว็บเบราว์เซอร์ดังกล่าวให้สามารถส่งข้อมูลพร้อมกัน หรือเลือกอย่างใดอย่างหนึ่งได้



รูปที่ 1 การออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ส่วนวัดค่า

4. ผลการดำเนินงาน

จากการออกแบบวงจรและการทำงานของระบบ อุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีไอโอที มีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงฯ

4.1 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของการวัดค่า

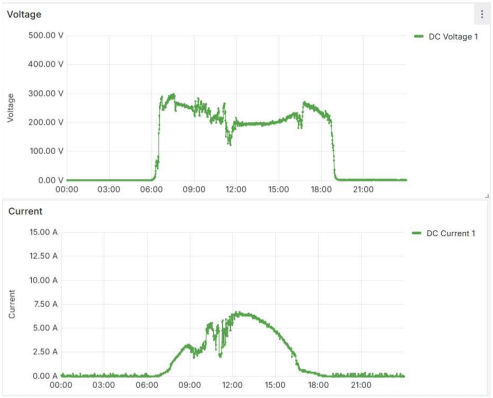
การเปรียบเทียบความถูกต้องของอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง จะใช้มิเตอร์วัดไฟฟ้ารุ่น Fluke289 ในการเปรียบเทียบค่าจากโหลดที่เปลี่ยนไป โดยมีการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า จำนวน 5 ครั้ง มีผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบค่าระหว่างอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงกับมิเตอร์วัดไฟฟ้ารุ่น Fluke289

ค่าที่วัด	ค่าที่ได้จากอุปกรณ์ฯ	ค่าที่ได้จากมิเตอร์วัดไฟฟ้ารุ่น Fluke289	ค่าความผิดพลาด (%)
แรงดันไฟฟ้า	191.04	194.00	1.52
กระแสไฟฟ้า	3.01	3.00	0.33
กำลังไฟฟ้า	575.03	582.00	1.20

4.2 ผลการสื่อสารข้อมูลผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรม

จากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวพบว่า สามารถสื่อสารข้อมูลผ่านโพรโตคอลการสื่อสาร MQTT Modbus RTU Modbus TCP/IP และ LoRa ได้ มีตัวอย่างการรับส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอล MQTT และมีผลการทดสอบการแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ในรูปแบบ dashboard ดังรูปที่ 3 ที่เก็บข้อมูลใน 1 วัน เก็บทุก ๆ 1 นาที ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลที่อุปกรณ์ดังกล่าววัดค่าได้ มีการส่งผ่านโพรโตคอล MQTT และนำมาแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีการสูญหายของข้อมูล



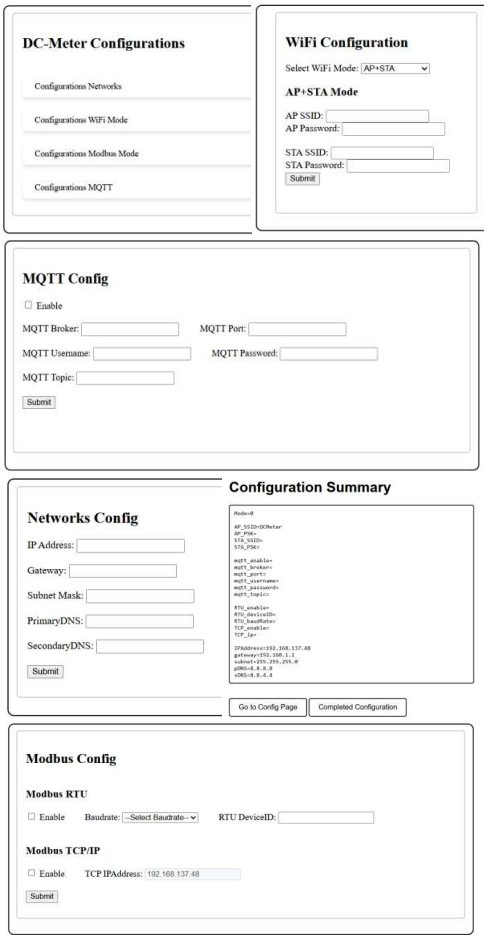
รูปที่ 3 การส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรมและแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ในรูปแบบ dashboard



รูปที่ 3 การส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอลอุตสาหกรรมและแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ในรูปแบบ dashboard (ต่อ)

4.3 ผลการออกแบบหน้าเว็บเซิฟเวอร์

จากการออกแบบหน้าเว็บเซิฟเวอร์ให้มีการตั้งค่าส่วนต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ 4 ระบบสามารถตั้งค่าโดยผู้ใช้ในส่วนการตั้งค่า Modbus และระบบสามารถทำงานได้โดยไม่มีความผิดปกติของโปรแกรม



รูปที่ 4 การตั้งค่าผ่านเว็บเบราว์เซอร์

5. สรุป

งานวิจัยนี้มีการพัฒนาอุปกรณ์วัดและส่งข้อมูลพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่รองรับการเชื่อมต่อกับโพรโตคอลอุตสาหกรรมผ่านเทคโนโลยีไอโอที โดยมุ่งเน้นการวัดค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า ด้วยความแม่นยำที่สามารถเทียบเคียงกับมิเตอร์มาตรฐาน (Fluke 289) ได้ จากการเทียบเคียง จำนวน 5 ครั้งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่วัดได้มีค่าไม่เกินร้อยละ 1.5 ซึ่งระบบได้รับการออกแบบให้แยกวงจรกำลังออกจากวงจรควบคุมอย่างเป็นอิสระ เพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดจากแรงดันสูง และช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบ โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์อาศัยการออกแบบวงจรวัดแรงดันด้วยเทคนิคการแบ่งแรงดันผ่านตัวต้านทานหลายตัว เพื่อให้สามารถวัดแรงดันได้ในช่วง 0–1000V และการวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทานชั้น ที่เชื่อมต่อกับตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลความละเอียดสูง รุ่น ADS1115 ซึ่งเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ESP32 สำหรับประมวลผลและคำนวณค่าพลังงานแบบเวลาจริง ทั้งนี้ระบบสามารถส่งข้อมูลผ่านโพรโตคอลมาตรฐาน เช่น MQTT Modbus RTU Modbus TCP/IP และ LoRa อีกทั้งสามารถเลือกหรือสลับโหมดการสื่อสารได้ผ่านหน้าเว็บเซิฟเวอร์ที่ภายในอุปกรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Justo, J. J., Mwasilu, F., Lee, J., & Jung, J.-W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 387–405. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.067

[2] Jadhav, A. R., Kiran M. P. R., S., & Pachamuthu, R. (2021). Development of a Novel IoT-Enabled Power- Monitoring Architecture With Real-Time Data Visualization for Use in Domestic and Industrial Scenarios. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 70, 1–14. https://doi.org/10.1109/tim.2020.3028437

[3] Tanyingyong, V., Olsson, R., Cho, J., Hidell, M., & Sjodin, P. (2016). IoT-Grid: IoT Communication for Smart DC Grids. 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). https://doi.org/10.1109/glocom.2016.7841917

[4] Haque, M. B., Choudhury, C. F., & Hess, S. (2019). Modelling residential location choices with implicit availability of alternatives. Journal of Transport and Land Use, 12(1). https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1450

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล

Power Measurement and Power Factor Correction System in a Three-Phase Electrical System with Data Recording

ดนัย ทองธวัช[1*] กมลฉิตย์ ภู่สร[2] พันกร เส็งคอนไพร[1] ยศชดิพ บุญโกย[1] และสรายุทธ ปล้องเงิน[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
E-mail: Danai_th@rmutto.ac.th*
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: Wanida.pu@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยระบบที่พัฒนาสามารถบันทึกข้อมูลและแสดงค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ผ่านจอแสดงผล รวมถึงสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ใน 4 ระดับ ทั้งในโหมดควบคุมด้วยมือและอัตโนมัติ โดยบันทึกข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุงลงใน Google Sheet ในการทดสอบระบบ ได้กำหนดโหลดทดลอง 4 กรณี โดยใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าต่อขนานเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ผลการทดลองพบว่า ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหลังการปรับปรุงเพิ่มขึ้นให้อยู่ในช่วงมาตรฐานที่ 0.85–0.95 ตามทฤษฎี ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งสามารถบันทึกและแสดงผลข้อมูลได้แบบเรียลไทม์

คำสำคัญ: ระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า, การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า, การบันทึกและแสดงผลข้อมูล

Abstract

This research aims to design and develop a power measurement and power factor correction system for a three-phase electrical system. The developed system is capable of recording data and displaying various electrical power parameters via a display screen. Additionally, it can perform power factor correction at four levels, both in manual and automatic control modes, with data before and after correction being recorded to Google Sheets. During the system testing phase, four different load scenarios were defined. Power factor correction was carried out using shunt-connected capacitors. The experimental results indicated that, after correction, the power factor improved to meet the standard range of 0.85–0.95, as expected from theoretical predictions. This study demonstrates that the developed system can effectively enhance the power factor in electrical systems, while also providing real-time data recording and visualization capabilities.

Keywords: Power Measurement System, Power Factor Correction, Data Logging and Display

1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและภาคพาณิชย์ การควบคุมและจัดการพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาเกี่ยวกับ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ซึ่งหากมีค่าต่ำ จะส่งผลให้เกิดกำลังรีแอคทีฟในระบบ นำไปสู่การสูญเสียพลังงาน ความร้อนที่เพิ่มขึ้นในสายส่ง และต้นทุนค่าไฟฟ้าที่สูงขึ้น ความสามารถในการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าอย่างแม่นยำและต่อเนื่อง จึงมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นระบบ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบสำหรับตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าสามเฟส พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ และดำเนินการปรับปรุงตัวประกอบกำลังแบบเรียลไทม์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการประมวลผล และการควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบระบบดังกล่าวสามารถช่วยลดภาระของผู้ปฏิบัติงานในด้านการติดตามพลังงาน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวมได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าคือกระบวนการลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อให้กำลังไฟฟ้าปรากฏมีค่าลดลงและเข้าใกล้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมากขึ้น โดยทั่วไป โหลดไฟฟ้าส่วนใหญ่มักประกอบด้วยองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำร่วมกับความต้านทาน ทำให้กระแสไฟฟ้า

มีเฟสล้าหลังแรงดัน ส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟในระบบ ซึ่งในภาพรวมแล้ว อาคาร บ้านพักอาศัย และโรงงานอุตสาหกรรมมักใช้โหลดที่มีลักษณะดังกล่าว ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบโดยรวมต่ำ การไฟฟ้าจึงมีการเรียกเก็บค่าปรับจากผู้ใช้ไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำ โดยเฉพาะในกรณีที่โหลดมีลักษณะเป็นรีแอคทีฟชนิดล้าหลัง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้โหลดที่มีองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำสูง [1]

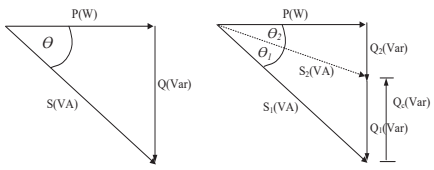
การแก้ไขค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทำได้โดยการติดตั้งตัวเก็บประจุเชื่อมต่อแบบขนานกับโหลดหรือแหล่งจ่ายไฟ เพื่อลดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของตัวเหนี่ยวนำ โดยตัวเก็บประจุจะสร้างกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่มีเฟสตรงข้ามกับตัวเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดการหักล้างกัน ส่งผลให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยรวมลดลง และทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบลดลงจากเดิม ซึ่งจะช่วยลดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบจากค่าเดิม (I_1) ลงเหลือค่าที่ต่ำกว่า (I_2) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าดีขึ้น ลดการสูญเสียพลังงานในสายส่ง และช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ข้อดีของการใช้คาปาซิเตอร์ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังนั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีการอื่น เช่น การสูญเสียในตัวคาปาซิเตอร์น้อย มีราคาถูก เมื่อเทียบกับการติดตั้งซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ ทำให้อุปกรณ์ไม่มีการเคลื่อนไหวหรือหมุน ทำให้การบำรุงรักษาต่ำ มีการติดตั้งง่ายไม่ซับซ้อน เพราะมีน้ำหนักเบา [2-3]

สามารถหาค่าตัวเก็บประจุ ดังต่อไปนี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าพื้นฐานของการแก้ตัวประกอบกำลังมีดังนี้

$$Q = L2H\ P = J_5\ FP = J_6; \quad (1)$$

เมื่อ 3 = กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย Reactive power (VAR)
P= J_5 = มุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าก่อนปรับปรุง
P= J_6 = มุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหลังปรับปรุง
2 = กำลังไฟฟ้า (W)

ผลของการปรับปรุงตัวประกอบกำลังสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์กำลังไฟฟ้าดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เวกเตอร์กำลังไฟฟ้าและการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

2.2 Google Sheet

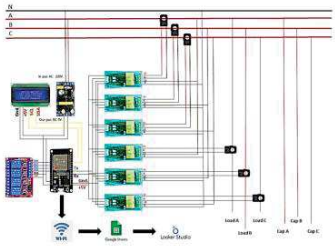
Google Sheet เป็นโปรแกรมประยุกต์ประเภทสเปรดชีต (Spreadsheet Application) ที่พัฒนาโดยบริษัท Google ซึ่งให้บริการผ่านระบบคลาวด์ (Cloud Computing) โดยผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงและจัดการข้อมูลได้จากทุกที่ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม Google Sheet รองรับการประมวลผลข้อมูลในรูปแบบตาราง การใช้สูตรคำนวณ การจัดรูปแบบข้อมูล การสร้างกราฟ และการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น จึงเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ทั้งในด้านการศึกษา ธุรกิจ และงานวิจัย ลักษณะเด่นของ Google Sheet คือความสามารถในการทำงานร่วมกันแบบเรียลไทม์ (Real-Time Collaboration) ซึ่งเอื้อให้ผู้ใช้หลายคนสามารถเข้าถึงและแก้ไขเอกสารเดียวกันได้พร้อมกัน โดยมีระบบจัดการสิทธิ์การเข้าถึงที่สามารถกำหนดได้ทั้งในระดับการอ่าน แก้ไข หรือแสดงความคิดเห็น นอกจากนี้ยังมีระบบบันทึกการเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติ และสามารถเรียกดูประวัติการแก้ไขย้อนหลังได้อย่างสะดวก ความสามารถเหล่านี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานกลุ่มและการบริหารจัดการข้อมูลในยุคดิจิทัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ **[4]**



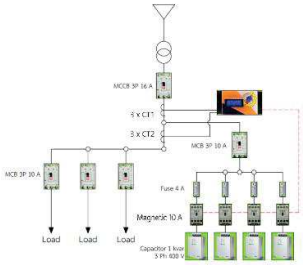
รูปที่ 2 แอพพลิเคชั่น Google Sheet

3 การออกแบบ

การทำงานเบื้องต้นของชิ้นงานเริ่มต้นจากบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ ESP32 WIFI เป็นตัวรับข้อมูลจาก PZEM 004T ซึ่งจะเป็นโมดูลวัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของแต่ละเฟส โดยจะใช้โมดูลทั้งหมด 6 ชุด เพื่อวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส โดยจะมีอุปกรณ์ที่ วัดกระแสไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์วัดกระแส เป็นตัวคล้องสายเพื่อวัดค่า ชุดที่วัดค่าสายเมนทำหน้าที่บันทึกค่ากำลังทางไฟฟ้าต่างๆเก็บไว้ใน Google sheet ชุดที่ 2 ใช้วัดค่าในส่วนของสายป้อนที่จ่ายให้กับโหลดทำหน้าที่วัดค่าตัวประกอบกำลังเพื่อนำมาควบคุมคอนแทคเตอร์ เพื่อปรับค่าให้ดีขึ้น และส่งต่อข้อมูลมาให้ บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์และแสดงผลผ่านจอแสดงผล เพื่อรอสั่งงานไปที่ชุดระบบควบคุมตัวเก็บประจุ แบบอัตโนมัติ 4 ลำดับ เพื่อปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงตามที่กำหนด ให้หลังจากที่ปรับปรุงแล้วให้มีค่าใกล้เคียง 0.95 lagging โดยการสั่งให้แม็กเนติกคอนแทคเตอร์ ทำงาน เพื่อขนานตัวเก็บประจุเข้ากับวงจร และแสดงผลค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ผ่านจอแสดงผล และมีการบันทึกข้อมูล

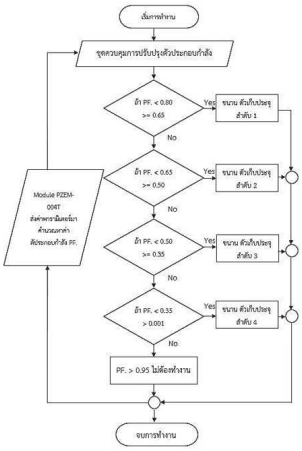


รูปที่ 3 ชุดควบคุมและตรวจวัดตัวประกอบกำลังแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4 แผนผังการติดตั้งคาปาซิเตอร์

แผนผังแสดงกระบวนการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (PF) โดยใช้ Module PZEM-004T ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าและคำนวณค่าตัวประกอบกำลัง เมื่อเริ่มทำงาน ระบบจะตรวจสอบค่าตัวประกอบกำลังและเปรียบเทียบกับเกณฑ์ที่กำหนด หาก PF อยู่ระหว่าง 0.65 ถึง 0.80 ระบบจะสั่งงานให้ ตัวเก็บประจุระดับที่ 1 ทำงาน หาก PF ต่ำกว่า 0.65 แต่มากกว่า 0.50 จะเปิดใช้งาน ตัวเก็บประจุระดับที่ 2 ในกรณีที่ PF ต่ำกว่า 0.50 แต่มากกว่า 0.35 ระบบจะสั่งงาน ตัวเก็บประจุระดับที่ 3 และหาก PF ต่ำกว่า 0.35 ระบบจะเปิดใช้งาน ตัวเก็บประจุระดับที่ 4 อย่างไรก็ตาม หากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเกิน 0.95 ระบบจะไม่ต้องทำงาน และกระบวนการจะสิ้นสุดลง

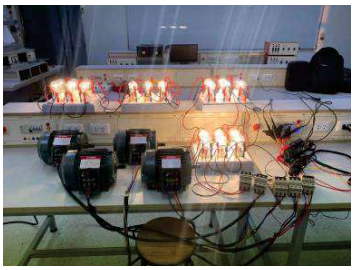


รูปที่ 5 แผนผังการทำงานระบบตรวจวัด และปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

4. ผลการทดลอง

การทดสอบการทำงานของระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล ซึ่งจะจ่ายโหลดทางไฟฟ้า ให้กับหลอดหลอดอินแคนเดสเซนต์ ร่วมกับมอเตอร์ 3 เฟส เพื่อให้ได้พิกัดโหลด และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ โดยทำการทดสอบ 4 กรณี ได้แก่

1. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 2,117 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.78 Lagging
2. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,972 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.64 Lagging
3. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,792 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.48 Lagging
4. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,395 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.33 Lagging



รูปที่ 6 โหลดทดสอบ

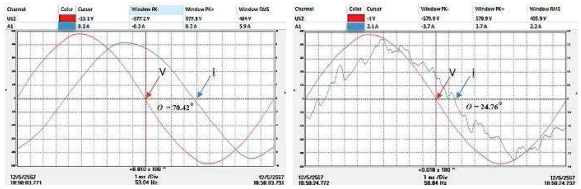
ผลจากการทดลองระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล โดยมีจากโหลดทางไฟฟ้าทั้ง 4 กรณีได้ผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

	PF. 0.79		PF. 0.64		PF. 0.48		PF. 0.33	
ค่าทางไฟฟ้า	ก่อน ปรับปรุง PF.	หลัง ปรับปรุง PF.	ก่อน ปรับปรุง PF.	หลัง ปรับปรุง PF.	ก่อน ปรับปรุง PF.	หลัง ปรับปรุง PF.	ก่อน ปรับปรุง PF.	หลัง ปรับปรุง PF.
กระแส (A)	3.8 A	3.3 A	4.5 A	3.2 A	5.3 A	2.9 A	5.9 A	2.3 A
แรงดัน (V)	402.3 V	402.5 V	396.77 V	397.2 V	401 V	401.3 V	405.4 V	407.3 V
กำลังไฟฟ้าจริง (W)	2,117 W	2,122 W	1,972 W	1,988 W	1,792 W	1,816 W	1,395 W	1,441 W
กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (VAR)	1,651 VAR	903 VAR	2,367 VAR	880 VAR	3,245 VAR	930 VAR	3,943 VAR	734 VAR
กำลังไฟฟ้าเสมือน (VA)	2,685 VA	2,306 VA	3,081 VA	2,174 VA	3,707 VA	2,040 VA	4,183 VA	1,618 VA
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.79 lagging	0.92 lagging	0.64 lagging	0.91 lagging	0.48 lagging	0.89 lagging	0.33 lagging	0.89 lagging
ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD)	1.50%	2.80%	0.70%	5.30%	1.20%	8.30%	1.50%	13.70%

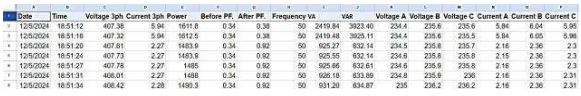
จากการทดลองปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ให้มีค่าใกล้เคียง 0.95 lagging โดยแบ่งการปรับปรุงออกเป็น 4 ลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังได้ดีขึ้น และระบบสามารถทำงานได้อย่างครบถ้วน แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เนื่องจากการไฟฟ้า

กำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังต้องไม่ต่ำกว่า 0.85 lagging ทั้งนี้ ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นหลังการปรับปรุง เกิดจากการขนานตัวเก็บประจุในแต่ละลำดับ โดยยิ่งมีการขนานตัวเก็บประจุมากขึ้น ความเพี้ยนของฮาร์มอนิกก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 7 รูปคลื่นก่อน และหลังปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

เมื่อระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล จะส่งข้อมูลผ่านไมโครคอนโทรเลอร์ ESP32 WIFI เพื่อบันทึกค่าลงในแอพพลิเคชั่น Google Sheet



Date	Time	Voltage 3ph	Current 3ph	Power	Before PF.	After PF.	Frequency Hz	VA	VAR	Voltage A	Voltage B	Voltage C	Current A	Current B	Current C
12/5/2024	18:51:12	407.38	5.94	1611.8	0.34	0.38	50	2419.84	3923.40	234.4	235.6	235.6	5.84	6.04	5.95
12/5/2024	18:51:16	407.32	5.94	1612.5	0.34	0.38	50	2419.48	3925.11	234.4	235.6	235.5	5.84	6.05	5.96
12/5/2024	18:51:20	407.61	2.27	1483.9	0.34	0.92	50	925.27	832.14	234.5	235.8	235.7	2.16	2.36	2.3
12/5/2024	18:51:24	407.73	2.27	1483.9	0.34	0.92	50	925.55	832.14	234.6	235.8	235.8	2.15	2.36	2.3
12/5/2024	18:51:27	407.78	2.27	1485	0.34	0.92	50	925.66	832.61	234.6	235.9	235.8	2.16	2.36	2.3
12/5/2024	18:51:31	408.01	2.27	1488	0.34	0.92	50	926.18	833.89	234.8	235.9	236	2.16	2.36	2.31
12/5/2024	18:51:34	408.42	2.28	1490.3	0.34	0.92	50	931.20	834.87	235	236.2	236.2	2.16	2.36	2.31

รูปที่ 8 ตารางบันทึกข้อมูล

เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนการวัดค่าทางไฟฟ้าระหว่างชุดควบคุมการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง กับ อุปกรณ์วัดค่าพลังงาน Chauvin Arnoux CA 8331 Power Quality พบว่าค่าที่ได้จากระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าแตกต่างจากเครื่องมือวัดมาตรฐานอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 2 เปรียบค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด

การทดสอบ	อุปกรณ์วัดค่าพลังงานไฟฟ้า CHAUVIN ARNOUX CA8331		ชุดควบคุมการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง		ความผิดพลาด
	ก่อนปรับปรุง (PF.)	หลังปรับปรุง (PF.)	ก่อนปรับปรุง (PF.)	หลังปรับปรุง (PF.)	
1	0.78	0.92	0.79	0.95	3.26 %
2	0.64	0.92	0.64	0.94	2.13 %
3	0.48	0.92	0.49	0.92	0.00 %
4	0.48	0.92	0.49	0.92	0.00 %

5. สรุปผล

จากการทดลองปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ด้วยระบบตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้าและปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการบันทึกข้อมูล โดยมีการใช้ตัวอย่างโหลด 4 กรณี ได้แก่

1. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 2,117 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.78 Lagging
2. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,972 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.64 Lagging
3. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,792 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.48 Lagging
4. พิกัดโหลดกำลังไฟฟ้า 1,395 W และค่าตัวประกอบกำลัง 0.33 Lagging

โดยใช้คาปาซิเตอร์ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียง 0.95 ได้ และจากการเปรียบเทียบผลการวัดค่าตัวประกอบกำลังระหว่างระบบตรวจวัด และเครื่องวัดมาตรฐานมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 1.35 % อีกทั้งผลจากการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายังทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดลดลง เนื่องจากคาปาซิเตอร์ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับโหลด

เอกสารอ้างอิง

[1] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2563). ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยการใช้ไฟฟ้าและบริการ พ.ศ.2562.

[2] เฉลียว เกตุแก้ว. (2556). การออกแบบชุดการเรียนรู้การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุวรรณภูมิ.

[3] สุรเชษฐ์ มิตสานนท์ และกันตภณ โล่นพันธ์. (2020). การแก้ไขตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบสูบน้ำบาดาลไฟฟ้า. Rajabhat J. Sci. Humanit. Soc. Sci. 21(2): 480-490.

[4] ชนิดา ยุบลไสย์, วิศวะ กุลนะ และคมกฤษณ์ ชูเรือง. (2022). ระบบการวัดและบันทึกค่า pH ของดิน โดย ใช้ Internet of Things (IoT). วารสารวิจัยและพัฒนาอนุภูมิภาคลุ่มน้ำโขง, 1(1), 1-7.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

Hybrid Power Generation System using Solar and Wind Energy

ณัฐวุฒิ สมพงษ์[1*] จีระพงศ์ ศรีวิชัย[1] อรรคชัย ภูผานิล[1] และ อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา[2]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
E-mail: natthawut.sm@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม เพื่อจ่ายพลังงานให้กับโหลดแสงสว่างขนาด 45W เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W จำนวน 2 แผง ร่วมกับกังหันลมแนวแกนตั้งขนาด 180W จำนวน 1 ตัว โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ขนาด 12V 45Ah นอกจากนี้ยังมีการใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อแสดงค่าผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วลม เป็นต้น จากการทดลองพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานได้เฉลี่ยวันละ 5-6 ชั่วโมง ในช่วงเวลากลางวัน ส่วนกังหันลมแนวแกนตั้งช่วยผลิตพลังงานเพิ่มเติมในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงแดด ทำให้สามารถสำรองพลังงานให้เพียงพอกับความต้องการของโหลดได้ ดังนั้น กังหันลมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยเสริมการผลิตไฟฟ้าให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ: พลังงานไฟฟ้าแบบผสม, พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานลม

Abstract

This article presents the utilization of renewable energy from solar and wind energy to generate electricity for powering a 45W lighting load over a 6-hour period. The system incorporates two 40W solar cells and a small vertical-axis wind turbine with a capacity of 180W. The generated electricity is stored in a 12V, 45Ah battery. The LabVIEW program is used to display values obtained from both the wind turbine and solar cells, such as voltage, current, and wind speed. Typically, solar panels operate for an average of 5 - 6 hours per day and can create electricity exclusively during daylight hours. The experimental results indicate that the proposed small vertical-axis wind turbine generates electricity during periods when the solar cells are unable to produce power. In order to obtain sufficient energy to meet the demand, the wind turbine is therefore another viable alternative for generating electricity for the load.

Keywords: hybrid power generator, solar energy, wind energy

1. บทนำ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิต ตลอดจนเป็นกำลังหลักในการขับเคลื่อนกิจกรรมทางเศรษฐกิจ จึงเป็นสาเหตุให้ประเทศไทยมีอัตราการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลจากการไฟฟ้านครหลวงในปี พ.ศ.2567 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้ามากถึง 49,782.50 ล้านหน่วยต่อปี และในสถานการณ์ปัจจุบันการใช้พลังงานในประเทศมีความต้องการเพิ่มมากอย่างต่อเนื่อง และพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานที่มาจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งล้วนเป็นพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้แล้วหมดไป ภายในอนาคตมีแนวโน้มว่าจะขาดแคลนไป จึงจำเป็นต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นที่เป็นพลังงานหมุนเวียนมาใช้ทดแทน [1-2]

พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเป็นทางเลือกของพลังงานทดแทนที่สามารถนำมาใช้ได้ เพราะเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่นสามารถนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์และไม่มีวันหมดไป งานวิจัยนี้จึงออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมเพื่อทดสอบใช้งานกับหลอดไฟแสงสว่าง ซึ่งมีกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยมีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นต้นกำเนิดพลังงาน และกระบวนการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานลม โดยมีกังหันลมเป็นต้นกำเนิดพลังงาน [3] พร้อมทั้งแสดงค่าพลังงานที่ผลิตขึ้น โดยใช้ NI myRIO เป็นตัวรับสัญญาณจากเซนเซอร์และเชื่อมกับโปรแกรม LabVIEW [4]

2. การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

การดำเนินงานจะกล่าวถึงขั้นตอนต่างๆ โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ไปจนถึงการติดตั้งชุดทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1 การออกแบบระบบกังหันลม

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินภาระทางไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้กับหลอดไฟแสงสว่างขนาด 9W 12V จำนวน 5 หลอด เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้น

ภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดต่อวัน = W x n x hr (1)

= 9 x 5 x 6 = 0.27 kWh

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกขนาดของกังหันลม

การประเมินและคัดเลือกขนาดกังหันลมให้มีความเหมาะสม โดยคิดจากค่า CF (Capacity Factor) จากงานวิจัยการศึกษาศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้าในเขตภาคกลางของประเทศไทยมีค่าประมาณ 5.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าจากกังหันลมได้ประมาณ 15% พัดต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงเวลา 10 - 19 นาฬิกาทุกวัน (มีลมประมาณ 10 ชั่วโมงต่อวัน) [5] ดังนั้น

ขนาดกังหันลม = ภาระทางไฟฟ้า / (CF x ระยะเวลาที่ลมพัด) (2)

= 0.27 kWh / (0.15 x 10 h) = 180 W

เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 180W

2.2 การออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อนำมาใช้สร้างพลังงานไฟฟ้าให้กับหลอดไฟแสงสว่างสามารถคำนวณได้ดังนี้ [6]

$$P_{PV} = \frac{EL \times O_z}{PSH \times L_{tr} \times L_{cable} \times L_{batt}} \quad (3)$$

$$= \frac{(9 \times 5 \times 6) \times 1.1}{5 \times 0.95 \times 1 \times 0.8} = 78.16 \text{ W}$$

เลือกใช้ขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 40W 2 แผ่นต่อขนานกัน

เมื่อ P_{PV} คือ กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (W)

EL คือ ภาระทางไฟฟ้าทั้งวันต่อวัน (Wh)

O_z คือ Oversize factor หรือพื้นที่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มมหาสมุทรแปซิฟิกที่มีแสงตกกระทบโดยประมาณ 10%

PSH คือ ค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์ (5 ชั่วโมงต่อวัน)

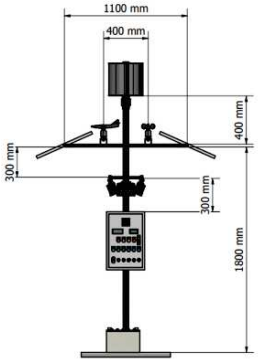
L_{tr} คือ ความคลาดเคลื่อนจากผู้ผลิต (%)

L_{cable} คือ ความคลาดเคลื่อนจากการสูญเสียในสายส่ง (%)

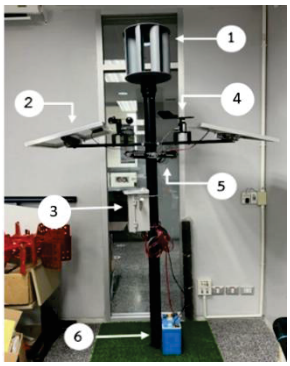
L_{batt} คือ ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ (%)

2.3 การติดตั้งชุดทดลองระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

ขนาดชุดทดลอง ส่วนประกอบต่างๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม และอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ดังนี้



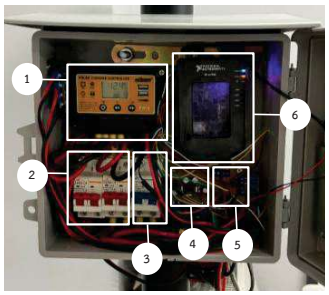
รูปที่ 1 ขนาดชุดทดลองระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

จากรูปที่ 2 มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1) กังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาด 180W 1 ตัว
2) เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W จำนวน 2 แผ่น
3) กล่องควบคุม
4) เซนเซอร์วัดความเร็วลมรูปแบบถ้วย
5) หลอดไฟ LED ขนาด 9W 12V จำนวน 5 หลอด
6) แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12V 45Ah



รูปที่ 3 อุปกรณ์ภายในกล่องควบคุม

จากรูปที่ 3 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1) Solar Charger Controller ควบคุมแรงดัน 18V เป็น 12V

2) DC Circuit Breaker ขนาด 10A ของเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2

3) DC Circuit Breaker ขนาด 16A ของกังหันลม

4) วงจร Boost Converter

5) โมดูลเซนเซอร์วัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์แผ่นที่ 1 และแผ่นที่ 2

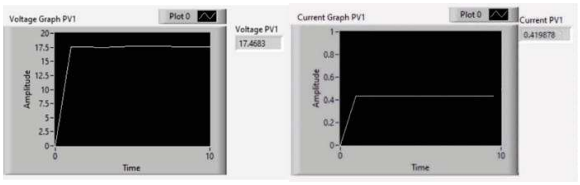
6) NI myRIO รับค่าจากเซนเซอร์และประมวลผลผ่านโปรแกรม LabVIEW

3. การทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากเนื้อหาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ การออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแตกต่างกันไปตามปริมาณแสงแดดและแรงของลม สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW แสดงดังรูปที่ 4



ก) แรงดันไฟฟ้า ข) กระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรม LabVIEW

การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เก็บข้อมูลการรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ระหว่างวันที่ 4 เมษายน 2567 ถึง 8 เมษายน 2567 ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 14.00 น. ของทุกวัน โดยผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม LabVIEW แสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการสอบเทียบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า

วัน/เดือน/ปี	Voltage (V)		
	LabVIEW	Meter	ค่าความผิดพลาด (%)
4 เม.ย. 2566	15.982	15.980	0.013
5 เม.ย. 2566	17.567	17.560	0.040
6 เม.ย. 2566	14.148	14.150	0.014
7 เม.ย. 2566	19.435	19.440	0.026
8 เม.ย. 2566	18.263	18.300	0.202

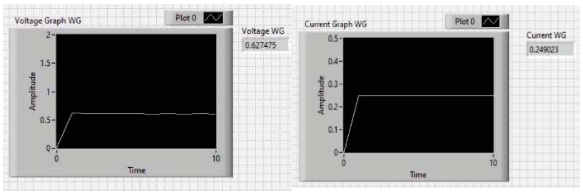
ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบวัดค่ากระแสไฟฟ้า

วัน/เดือน/ปี	Current (A)		
	LabVIEW	Meter	ค่าความผิดพลาด (%)
4 เม.ย. 2566	0.254	0.250	1.600
5 เม.ย. 2566	0.457	0.460	0.652
6 เม.ย. 2566	0.194	0.190	2.105
7 เม.ย. 2566	0.509	0.510	0.196
8 เม.ย. 2566	0.351	0.350	0.286

ในการทดลองได้ติดตั้งแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในตำแหน่งที่ได้รับแสงอาทิตย์ ณ จุดเดียวกันทุกวัน ส่งผลให้ค่าพลังงานที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าอยู่ที่ 18V ซึ่งถูกควบคุมและปรับลดโดยอุปกรณ์ Solar Charger Controller ให้เหลือประมาณ 12V ซึ่งเพียงพอต่อการจ่ายพลังงานให้กับโหลด

3.2 ผลการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลม

รูปแบบความสัมพันธ์แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลม แสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW แสดงดังรูปที่ 5



ก) แรงดันไฟฟ้า ข) กระแสไฟฟ้า

รูปที่ 5 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมในโปรแกรม LabVIEW

การทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมออกแบบโดยใช้พัดลมเป็นแหล่งกำเนิดของแรงลม จากนั้นปรับระยะห่างระหว่างพัดลมกับกังหันลมที่ระยะ 100 ซม. และ 150 ซม. พร้อมทั้งกำหนดความเร็วของพัดลม 3 ระดับ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปสอบเทียบและวิเคราะห์ผ่านโปรแกรม LabVIEW ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4

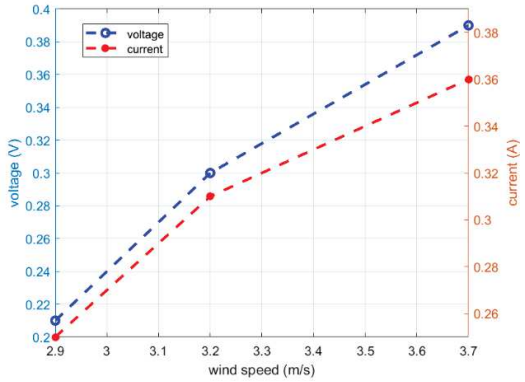
ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมที่ระยะ 100 ซม.

ระดับความเร็วของพัดลม	ความเร็วลม (m/s)		Voltage (V)		Current (A)	
	LabVIEW	Anemometer	LabVIEW	Meter	LabVIEW	Meter
1	2.900	2.900	0.218	0.210	0.249	0.250
2	3.150	3.200	0.304	0.300	0.311	0.310
3	3.750	3.700	0.392	0.390	0.353	0.360

ตารางที่ 4 แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของกังหันลมที่ระยะ 150 ซม.

ระดับความเร็วของพัดลม	ความเร็วลม (m/s)		Voltage (V)		Current (A)	
	LabVIEW	Anemometer	LabVIEW	Meter	LabVIEW	Meter
1	2.600	2.650	0.184	0.180	0.192	0.190
2	2.950	3.000	0.287	0.290	0.275	0.270
3	3.550	3.500	0.358	0.360	0.354	0.350

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่า เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น จะทำให้การผลิตไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย พิจารณาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นตามความเร็วลม ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ากับความเร็วลมที่ระยะห่าง 100 ซม.

นอกจากนี้ เมื่อทดสอบกังหันลมที่ความเร็วลมสูงสุดประมาณ 3.7 เมตรต่อวินาที ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากมอเตอร์มีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.4V และแม้ว่าจะผ่านการเพิ่มแรงดันด้วยวงจร Boost Convertor แล้ว แต่แรงดันที่ได้ยังไม่เพียงพอสำหรับการจ่ายพลังงานให้กับโหลดขนาด 12V ได้ สาเหตุหลักเกิดจากกังหันลมมีความเร็วรอบในการหมุนต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้า ประกอบกับโหลดที่ใช้มีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงกว่าความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของระบบในสภาวะลมดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ตามความต้องการ

4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทราบหลักการทำงาน แนวทางการออกแบบ และการสร้างชุดทดลองของระบบดังกล่าว รวมถึงการยืนยันผลการทดลองผ่านซอฟต์แวร์ เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วลม โดยผลการทดลองของระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมพบว่า การผลิตพลังงานไฟฟ้ารวมกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอต่อการใช้งานของหลอดไฟในระยะเวลา 6 ชั่วโมงตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ แม้ว่ากังหันลมจะช่วยผลิตพลังงานได้บางส่วน แต่ยังสามารถเสริมการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีแสงแดดน้อย เช่น ฤดูฝนและฤดูหนาวของประเทศไทย ซึ่งมีความเร็วลมสูงกว่าปกติ ทั้งนี้ควรจัดเก็บข้อมูลผลการทดสอบในฤดูดังกล่าวเพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์ว่าพลังงานแบบใดให้ประสิทธิภาพมากที่สุด เพื่อออกแบบระบบที่สามารถเลือกแหล่งผลิตพลังงานที่เหมาะสม (Hybrid Controller) ตามเงื่อนไขในขณะนั้น หรือวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ในแต่ละฤดู เพื่อนำไปวางแผนลดต้นทุนและประยุกต์ใช้เพิ่มเติมในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนครและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 1 ไฟฟ้าและพลังงานลม.

[2] วิชิต มาลาเวช. (2556). ชุดสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ, 16(3), 29-38.

[3] P. Khemmook and S. Thongsuk, “Development and Efficiency of Portable Wind Speed and Solar Radiation”, vol. 1, no. 1, 2022, doi: https://doi.org/10.55674/snrujiti.v1i1.246570.

[4] M. L. Doumbia et al., “LabVIEW Modelling and Simulation of a Hydrogen Based Photovoltaic/Wind Energy System”, 2009, doi: 10.1109/ELECTROMOTION.2009.5259114.

[5] ธนัญชัย ลีภักดิ์ปรีดา และคณะ. (2556). การศึกษาศักยภาพพลังงานลมสำหรับการผลิตไฟฟ้าในเขตภาคกลางของประเทศไทย.

[6] พิมลมาศ วรรณคณา. (2560). การออกแบบและพัฒนาระบบออฟกริด. หน่วยวิจัยเฉพาะทางสภาปัตยกรรมเพื่อชีวิตและสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบห้องคลีนรูมสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงวัน ชนิด Black Fly

Design of a Cleanroom for Rearing Black Fly Larvae

อภิสิทธิ์ บุตรนนท์[1*] ,ยุติ ฉัตรวรานนท์[1], กฤษดา แสนสิมน[1], ภัทรพงศ์ จันทรประสาท[1],สมมาตร ทองคำ[2],ธนพงษ์ กรรณแก้ว[2],อุทัย อึ้งเจริญ[2], สนธยา ขำเดช[3]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

[3]สาขาวิชา วิศวกรรมซ่อมบำรุงรักษาอากาศยาน มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

E-mail: y.chatwaranon@gmail.com*

บทคัดย่อ

เอกสารนี้เกี่ยวกับการออกแบบห้องคลีนรูมสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงวันชนิด *Black Soldier Fly* (BSF) โดยเน้นไปที่การควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของหนอน การวิจัยนี้ครอบคลุมถึงการเลือกใช้วัสดุ อุณหภูมิ ความชื้น ระบบระบายอากาศ และมาตรฐานความสะอาดที่จำเป็นสำหรับห้องคลีนรูมเพื่อให้สามารถผลิตหนอน BSF ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบนี้จะเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเลี้ยงแมลงที่สามารถนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรมการผลิตโปรตีนทางเลือกในอนาคต

คำสำคัญ: *Black Soldier Fly* (BSF),การเจริญเติบโตของหนอน,ห้องคลีนรูม

Abstract

This document focuses on the design of a cleanroom for rearing Black Soldier Fly (BSF) larvae, emphasizing environmental control to optimize their growth. The research covers the selection of materials, temperature, humidity, ventilation system, and cleanliness standards necessary for maintaining an effective cleanroom environment. The findings from this design serve as a guideline for developing insect farming systems applicable to commercial and industrial alternative protein production in the future.

Keywords: Black Soldier Fly (BSF), larval growth, cleanroom.

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

โรคเบาหวานเกิดจากพฤติกรรมการรับประทานอาหาร หรือบางส่วนเกิดจากพันธุกรรมแต่ส่วนใหญ่เกิดจากการรับประทานอาหารและทำให้เส้นเลือดอุดตันและส่งผลต่อการหมุนเวียนของเลือดโดยเฉพาะในบริเวณเท้าส่วนมากผู้ป่วยมักไม่ทราบอาการเมื่อเป็นแผลบริเวณเท้าเกิดจากเส้นประสาทไม่ตอบสนอง สิ่งที่ตามมาแผลมีอาการติดเชื้อและหากการรักษาไม่ถูกวิธีจะทำให้ผู้ป่วยมีการตัดขาหรืออาจทำให้เสียชีวิต ผู้ป่วยโรคเบาหวานเมื่อเกิดแผลบริเวณเท้าจะเห็นได้ว่าบริเวณเท้าจะมีแผลขนาดใหญ่เกิดจากเนื้อที่ตายคุณหมอจะต้องทำการตัดเนื้อที่ตายออกทำให้เกิดแผลขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่จะพบเห็นตามโรงพยาบาลชนบทหรือโรงพยาบาลต่างจังหวัด วิธีการรักษาโรคเบาหวานนั้นทางคุณหมอจะมีการตรวจเส้นเลือดที่ส่งไปยังแผลบริเวณเท้าโดยฉีดสีเผื่อตรวจสอบเส้นเลือดที่อุดตันและทำการขยายเส้นเลือดที่อุดตันเรียกว่าการทำบอลลูน (Percvtaneous Cororary Intervention : PCI) และเมื่อทำบอลลูนสำเร็จจะทำการรักษาแผลบริเวณเท้าโดยในขั้นตอนนี้ จะนำหนอนแมลงวัน (Black Fly) มาช่วยในการรักษาแผลที่มีเนื้อตายขนาดเล็ก ดังนั้นการนำหนอนมารักษากับผู้ป่วย สิ่งที่มีความสำคัญคือความสะอาดของตัวหนอนที่ใช้สำหรับการรักษาโดยผู้วิจัยจึงได้คิดค้นตู้ฟักไข่แมลงวัน (Black Fly) แบบปลอดเชื้อด้วยระบบคลีนรูม

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรคเบาหวานคืออะไร

โรคเบาหวาน (Diabetes Mellitus, DM) เป็นภาวะความผิดปกติของการเผาผลาญของร่างกาย (Metabolism) ทำให้เกิดน้ำตาลสูงขึ้นเกิดขึ้นจากการเผาผลาญของ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งมีผลจากการขาดอินซูลินเป็นฮอร์โมนที่สร้างจากเบตาเซลล์ของตับอ่อนทำหน้าที่ควบคุมน้ำตาลในเลือด หากปล่อยโรคไว้นานจะทำให้มีผลเสียต่ออวัยวะต่างๆนั้นคือ ตา ไต เส้นประสาทหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งเป็นอวัยวะที่สำคัญ

2.2 แผลที่เกิดจากโรคเบาหวาน

บาดแผลที่เกิดจากโรคเบาหวานจะเป็นบาดแผลเรื้อรังที่พบได้บ่อยที่สุดจากผู้ป่วยทั้งนี้แผลโรคเบาหวานจะมีไขมันที่ไม่ย่อยสลายทำให้ไปจับกับเส้นเลือดจะส่งผลให้เส้นเลือดตีบและแข็งตัวทำให้เกิดการอุดตันในที่สุดและส่งผลให้แผลหายยากเพราะไม่มีเลือดไปหล่อเลี้ยง ส่วนใหญ่แผลที่เกิดจากโรคเบาหวานมักที่จะเกิดบริเวณเท้า

2.3 วงจรชีวิตหนอนแมลงวัน (Black fly)

วงจรชีวิตหนอนแมลงวัน (Black fly) เริ่มจากตัวเมียวางไข่เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ประมาณ 2,000 - 3,000 ฟองในบริเวณแหล่งเพาะพันธุ์ซากศพหรือซากเน่าเสียของสัตว์กระดูกสันหลังหรือในบริเวณที่มีความชื้นภายใน 18 - 24 ชั่วโมง ตัวอ่อนจะฟักออกจากไข่เป็นตัวอ่อนระยะที่ 1 ซึ่งมีขนาดประมาณ 1-2 มิลลิเมตร เป็นระยะที่ต้องการกินอาหาร ซึ่งถือว่าเป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการรักษาแผลติดเชื้อ ตัวอ่อนระยะนี้จะกินอาหารพร้อมทั้งมีการลอกคราบและเพิ่มขนาดขึ้นเป็นระยะเวลาประมาณ 4-5 วัน จนกระทั่งตัวอ่อนมีขนาดประมาณ 8 – 10 มิลลิเมตร ตัวอ่อนจะไม่กินอาหารโดยเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่แห้งเพื่อเข้าสู่ระยะดักแด้และเจริญเป็นตัวเต็มวัยต่อไป

2.4 การนำหนอนมาใช้ในการรักษาโรค

ตัวอ่อนของหนอนแมลงวัน (Black fly) ที่มาใช้ในการรักษาบาดแผลซึ่งต้องปลอดเชื้อและมีความสะอาดมากต่อผู้ป่วยและในการรักษาจำนวนตัวอ่อนต่อการรักษาขึ้นอยู่กับลักษณะบาดแผล ได้แก่ ความยาว ความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลาง ความลึก และปริมาณเนื้อเยื่อที่ตาย โดยนิยมใช้ตัวอ่อนที่ปลอดเชื้อซึ่งมีอายุ 1–3 วัน จำนวน 5-10 ตัว ต่อขนาดบาดแผล 1 ตารางเซนติเมตร โดยการรักษาหนึ่งครั้งใช้ เวลา 2-3 วัน 1 สัปดาห์มีการรักษาได้ไม่เกิน 2-3 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าการรักษาบาดแผลแต่ละบาดแผลจะต้องเลือกจำนวนหรือขนาดของถุงตัวอ่อนให้เหมาะสมต่อขนาดบาดแผล

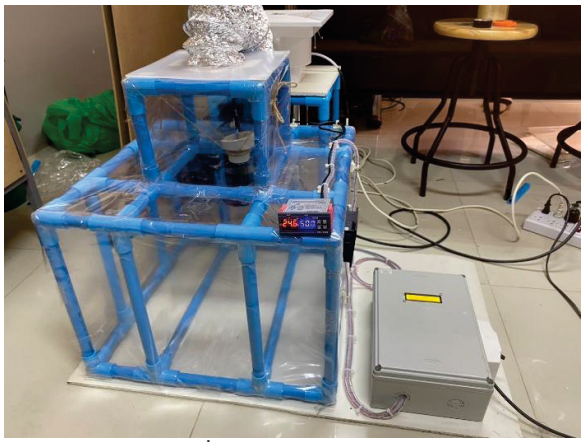
2.5 ห้องคลีนรูมคืออะไร

ห้องคลีนรูม (Clean Room) คือห้องที่ปลอดเชื้อหมายถึงห้องที่มีการควบคุมมวลสารอากาศในห้องให้มีอากาศน้อยที่สุดและมีการปิดมิดชิดเพื่อไม่ให้อากาศภายนอกเข้ามาได้และเพื่อให้มีความสะอาดเป็นไปตามระดับมาตฐานความสะอาดและมีการควบคุมสภาวะสิ่งแวดล้อมภายในห้องอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความแตกต่างของความดันตามที่ต้องการและทั้งนี้ห้องคลีนรูมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามหลักใช้งานคือ 1.ห้องคลีนรูมที่ต้องระมัดระวังเรื่องฝุ่น (Industrial Clean Room : ICR) ห้องคลีนรูมประเภทนี้มักจะใช้ในงานการผลิตอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ Microchip เครื่องใช้ไฟฟ้า คอมพิวเตอร์สมาร์ทโฟน เพราะหากมีฝุ่นมาเกาะชิ้นส่วนแผงวงจรอาจทำให้อุปกรณ์นั้นเสียหายได้ โดยทั้งนั้นแล้วห้องคลีมรูมประเภทนี้มักใช้กับอุสาหกรรมการผลิตอุปรกรณ์เกี่ยวกับงานอิเล็กทรอนิกส์โดยส่วนใหญ่ 2.ห้องคลีนรูมที่ต้องระมัดระวังเรื่องเชื้อโรค (Biological Cleanroom : BCR) คือ ห้องปลอดเชื้อโรคห้องคลีนรูมประเภทนี้จะใช้งานในอุสาหกรรมการผลิตยาห้องปฏิบัติการทางด้านชีววิทยา เพื่อควบคุมปริมาณเชื้อแบคทีเรีย ความดันอากาศในห้องจะต้องสูงเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกจากห้องข้างเคียงไกลเข้าสู่ห้องสะอาดเป็นต้น ห้องปลอดเชื้อที่ใช้กับห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับเชื้อโรคไวรัสโดยความดันอากาศห้องจะต้องต่ำกว่าห้องข้างเคียง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายเชื้อที่จะเข้ามาปนเปื้อนได้

2.6 แผ่นกรองอากาศ

ฟิลเตอร์แอร์ หรือ แผ่นกรองอากาศ (Air filter) คือ อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยสิ่งที่เป็นใยที่แยกสาร เช่น ฝุ่น รา และ แบคทีเรีย จาก อากาศ เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่อยู่ในเครื่องปรับอากาศ มีลักษณะเป็นแผ่นตะแกรงพลาสติก ติดอยู่บริเวณใต้ฝาหน้าของแอร์ พอเปิดฝาหน้าออกก็จะเจอกับแผ่นฟิลเตอร์แอร์ทันที เมื่อแอร์สูบอากาศภายนอกเข้าไปในเครื่อง ฟิลเตอร์จะทำหน้าที่ดักจับฝุ่นละอองในอากาศไม่ให้เข้าไปถึงคอยล์เย็นได้ ทำให้แอร์ทำงานได้เป็นปกติ และอากาศที่แอร์เป่าออกมาก็จะสะอาดปราศจากฝุ่น อุปกรณ์กรองอากาศใช้ในสถานที่ที่คุณภาพของอากาศเป็นสิ่งสำคัญโดยเฉพาะในระบบการระบายอากาศภายในอาคาร

3. ขั้นตอนการทำ



รูปที่ 1 โครงสร้างห้องคลีนรูม

จากรูปที่ 1 โครงสร้างห้องคลีนรูมมีขนาด กว้าง 50 m ยาว 50 m สูง 40 m และทำมาจากท่อ PVC หุ้มด้วยแผ่นพลาสติกใสขนาด 1.5 mm และด้านใน มีเซนเซอร์วัดฝุ่น PM2.5 dust sensor, เซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นใช้ STC 3028 ส่วนให้ความร้อนใช้หลอด Infrared ขนาด 100 w และใช้พัดลมที่ติดตั้งแผ่นกรองอากาศ เพื่อใช้ดูดอากาศภายนอกเข้าในห้องคลีนรูม โดยมีพัดลมที่ติดตั้งแผ่นกรองอากาศจำนวน 2 ตัว ที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาอย่างละตัว เพื่อใช้สำหรับระบายอากาศภายในห้องคลีนรูม

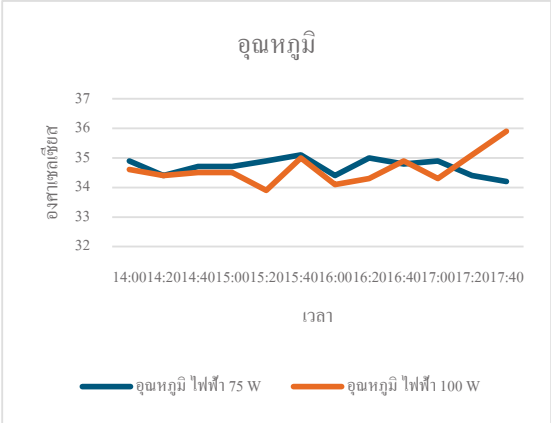


รูปที่ 2 กล่องควบคุม

จากรูปที่ 2 กล่องควบคุมในโครงงานนี้ มีการควบคุมไฟฟ้าที่ได้จากไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นกระแสตรงผ่าน พาวเวอร์ซัพพลาย ที่มีหน้าที่แปลงไฟฟ้าเป็นกระแสตรง ที่มีขนาด 12V และมีโมดูลตัวเพิ่ม และ ลด แรงดัน โดยจะแปลงเป็น 24V ที่ใช้กับเซนเซอร์ STC 3028 และ 5V ใช้กับเซนเซอร์วัดฝุ่น PM2.5 dust sensor และบอร์ดควบคุม ส่วนไฟฟ้า 12 V ใช้กับพัดลม อีกทั้งมีจอ LCD I2C แสดงค่าฝุ่นละอองในห้องคลีนรูม

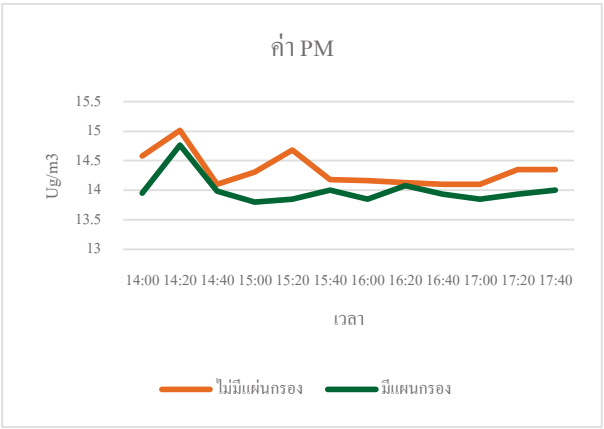
4. สรุปผลการทดลอง

ผลในการทดสอบนั้น จะเป็นการทดสอบ 2 วิธี คือ ตัวที่มีแผ่นกรองกับไม่มีแผ่นกรองอากาศ ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูล ทุกๆ 20 นาที อีกทั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเลี้ยงหนอนแมลงวัน ต้องอยู่ที่ 30 – 40 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 35 – 36 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 กราฟแสดงอุณหภูมิในห้องคลีนรูม

จากรูปที่ 3 เป็นการแสดงอุณหภูมิในห้องคลีนรูม ที่อุณหภูมิจะอยู่ที่ 34 – 36 องศาเซลเซียส โดยวัดจากเซนเซอร์ STC 3028



รูปที่ 4. กราแสดงค่า PM

จากรูปที่ 4 แสดงค่า PM ในห้องคลีนรูป ที่มีแผ่นกรองกับไม่มีแผ่นกรอง แผ่นกรองที่มาจากท่อลมมีความหนาอยู่ที่ 2 มม. จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อติดตั้งแผ่นกรองอากาศ ค่าฝุ่นละอองมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ใช้แผ่นกรอง

การอภิปรายผลการวิจัย

สำหรับในการเลี้ยงหนอนด้วยห้องคลีนรูม ในทางการแพทย์นั้นถือได้ว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการรักษาอย่างมาก ด้วยการเลี้ยงในห้องที่มีการควบคุมความสะอาดและมีการควบคุมเชื้อโรคได้นั้น ทำให้ผู้ป่วยมีความมั่นใจในการรักษามากขึ้น อีกทั้งลดการติดเชื้อ สำหรับหนอนที่ใช้สำหรับในการรักษานั้น ต้องเป็นหนอนที่ออกจากไข่ และทิ้งไว้ในแผล 3 วันถึงจะนำออกได้ แต่สำหรับการเรียนแบบธรรมชาตินั้นเหมาะสำหรับการนำไปประกอบอาหาร ด้วยตุนทุนที่ถูกว่า อีกทั้ง การเรียนแบบธรรมชาตินั้นไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและเชื้อโรคที่มากับ

อากาศได้ ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการนำไปรักษา ต้องมีการผ่านขบวนการฆ่าเชื้อ ทำให้มีต้นทุนที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Leukhampeng, P. Sanpoung and K. Somsai, "Application of D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation and Power Oscillation Damping," 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2021, pp. 810-815, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454805.

[2] P. Youplao, A. Takita, H. Nasbey, S. Mitatha and Y. Fujii, "An Optical Heterodyne Technique for Dynamic Eddy-Current Damping Force Evaluation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-11, 2021, Art no. 6005011, doi: 10.1109/TIM.2021.3059112.

[3] A. E. Arumona et al., "Microfluidic Flow Rate Sensor Using Electron Cloud Plasma Transport Within Silicon Microring Circuits," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 24, pp. 27268-27274, 15 Dec.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3124368.

[4] จีระพงศ์ ศรีวิชัย. (2559). การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 26(3), 375–383.

[5] นครินทร์ ศรีปัญญา และ เอกวิทย์ หายักวงษ์. (2561). การจำลองระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 5 กิ่ง ขับปั๊มน้ำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจำนวน 2 ตัว. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10* (น.327-330). สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

พัฒนาเครื่องบ่มคอนกรีตแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ STC-3028 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบของนักศึกษาวิศวกรรมโยธา

Development of temperature-controlled concrete curing machine with STC-3028 sensor to increase the testing efficiency of civil engineering students

อภิสิทธิ์ บุตรนนท์[1*] ,พัชรพล ไม่เที่ยง[1] ,ยุติ ฉัตรวรานนท์[1], สุรวุฒิ ยิ้มฤทธิ์[1] ,มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม[2] , พัชรา วงค์ทอง[2], อนุสรณ์ ผ่องประภา [3]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
E-mail: y.chatwaranon@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการการพัฒนาเครื่องบ่มคอนกรีตแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ STC-3028 สำหรับการควบคุมตู้บ่มคอนกรีตแบบเย็น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนการสอนและผลการทดลองแบบอย่างง่าย เพื่อนำไปใช้ในวิชาการเรียนการสอน เป้าหมายในการจัดสร้างตู้นี้เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการจัดซื้ออุปกรณ์ในการบ่มคอนกรีตด้วยความเย็น ซึ่งจะช่วยให้นักศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธานั้นสามารถนำชุดอุปกรณ์นี้ไปใช้ในการทดสอบงานคอนกรีตได้ อีกทั้งเป็นการนำความรู้ระหว่างวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้าและวิศวกรรมเครื่องกล การประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอน โดยในชุดการทดลองนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ STC-3028 ที่สามารถปรับอุณหภูมิและความชื้นได้ สำหรับในการบ่อคอนกรีตด้วยความเย็น โดยในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบในการควบคุมอุณหภูมิที่อยู่ 17 – 20 องศาเซลเซียส ด้วยการทดสอบสอบประสิทธิภาพการทำงาน ตลอด 10 วัน ผลการทดสอบนั้นเครื่องนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 17 – 20 องศาเซลเซียส ตลอด 24 ชั่วโมง และสามารถนำไปใช้ในการบ่อคอนกรีตได้สำหรับนักศึกษา สาขาโยธา มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี เพื่อนำไปทดสอบความแข็งแรง

คำสำคัญ: คอนกรีต,เซนเซอร์ STC-3028 อุณหภูมิ,วิศวกรรมโยธา,บ่อคอนกรีต

Abstract

In this research, the development of a temperature-controlled concrete curing machine with STC-3028 sensor for controlling a cold concrete curing cabinet is to increase the efficiency of teaching and learning and the results of simple experiments for use in teaching. The goal of creating this cabinet is to reduce the cost of purchasing cold concrete curing equipment, which will allow students in the civil engineering department to use this set of equipment to test concrete works. It is also the application of knowledge between civil engineering, electrical engineering, and mechanical engineering in teaching and learning. In this experimental set, the temperature is controlled by the STC-3028 sensor, which can adjust the temperature and humidity for cold concrete curing. In this test, the temperature control is 17-20 degrees Celsius by testing the efficiency of the work for 10 days. The test results show that this machine can control the temperature in the range of 17-20 degrees Celsius for 24 hours and can be used in concrete curing for civil engineering students of Bangkokthonburi University to test the strength.

Keywords: Concrete Sensor STC-3028 Temperature Civil Engineering Concrete Tank

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ที่มาของงานวิจัยนี้เป็นการเห็นความสำคัญของการเรียนการสอนของนักศึกษาในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่นักศึกษานั้นต้องมีการทดสอบงานคอนกรีต เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่างๆ ซึ่งในวิธีการนั้นคือ วิธีการบ่ม คอนกรีต หรือ มอต้า ที่จะมีการผสมวัตถุดิบและทำการบ่มในระยะเวลา 7 , 14 และ 28 วัน เพื่อทดสอบความแข็งแรงต่างๆ ซึ่งวิธีการนั้น จะมีปัญหาเรื่อง ขาดชุดการบ่ม และวิธีการบ่มต่างๆ ทำให้

นักศึกษานั้นจะต้องใช้เวลาในการรอ ด้วยเครื่องมือการบ่ม หรือ มีการบ่มตามปกติของอุณหภูมิห้อง สิ่งที่ตามมานั้นคือ ความไม่คงที่ของอุปกรณ์ในแต่ละวัน หรือ การควบคุมที่ถูกต้อง ทำให้ผลที่ได้นั้น มีความผิดพลาดตามมา และ ด้วยจำนวนนักศึกษาที่มีจำนวนมาก ทำให้การทดสอบนั้นต้องใช้เวลาเพิ่ม และเครื่องมือที่มีราคาแพง

ดังนั้นด้วยปัญหานี้จึงได้มีการนำเทคโนโลยีที่สามารถหาซื้อได้ง่าย และสามารถนำมาประกอบเพื่อเป็นการลดต้นทุน อีกทั้งสามารถนำไปใช้งานได้จริงและไม่มีความยุ่งยากในการใช้งาน ซึ่งในงานนี้ได้เห็นความสำคัญต่อการนำไปใช้งาน เพื่อให้สามารถประกอบได้ง่ายและราคาที่ถูก อีกทั้งสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย ซึ่งนำไปใช้งานได้ทันที โดยมีการจ่ายไฟ และทำการติดตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ

โดยในงานทดสอบนี้ได้ทำการทดสอบตู้บ่มคอนกรีตด้วยความเย็นที่มีขนาดตู้ กว้าง 60.50 เซนติเมตร ยาว 45.5 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร ควบคุมด้วยเซนเซอร์ STC – 3028 และสามารถบำรุงรักษาได้ เพื่อให้นักศึกษาและอาจารย์ ได้นำไปใช้ในการเรียนการสอนและเป็นต้นแบบในการนำไปพัฒนา เครื่องมือที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตได้ โดยในการทดสอบนี้จะเป็นการควบคุมที่ 17 – 20 องศาเซลเซียส และทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 10 วัน ในการควบคุมและนำคอนกรีตที่ได้ไปทำการทดสอบแรงอัด เพื่อหาค่าความแข็งแรง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอนกรีต (Concrete)

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างทั่วโลก เนื่องจากมีความแข็งแรง ทนทาน และสามารถขึ้นรูปเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เป็นวัสดุที่สามารถปรับใช้ได้ในหลายๆ สถานการณ์ ทั้งในงานโครงสร้างพื้นฐานและงานสถาปัตยกรรมต่างๆ โดยคอนกรีตมีประกอบด้วยหลักดังนี้

1. ปูนซีเมนต์ (Cement) ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน เมื่อผสมน้ำแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้แข็งตัวและยึดเกาะวัสดุอื่นๆ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. น้ำ (Water) ทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการแข็งตัว และเพิ่มความสามารถในการทำงานของคอนกรีต
3. วัสดุผสม (Aggregates) เป็น หินและทราย ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงและความทนทานให้กับคอนกรีต
4. สารเคมีเสริม (Admixtures) เป็น สารเคมีที่เติมลงไปในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ เช่น การเร่งการแข็งตัว การเพิ่มความทนทานต่อสภาพอากาศ หรือการลดการหดตัวปูนซีเมนต์

2.2 การบ่มคอนกรีต (Concrete Curing)

การบ่มคอนกรีต เป็น วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดชั่นของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยการรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำ น้ำส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระเหยออก ส่งผลต่อการพัฒนาคุณสมบัติกำลังและความคงทน ช่วยลดการหดตัวของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตมีความทนทานและป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต

โดยการบ่มคอนกรีต แบ่งออกตามลักษณะการบ่มได้ 4 ลักษณะ ดังนี้

2.2.1 การบ่มโดยการเพิ่มความชื้นให้คอนกรีต การบ่มลักษณะนี้จะเพิ่มความชื้นให้กับผิวคอนกรีตโดยตรง เพื่อทดแทนการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารทำได้ดังนี้

1. การขังหรือหล่อน้ำ เป็นการทำนบกั้นน้ำไม่ให้น้ำไหลออก มักจะใช้กับงานทางระดับ เช่น พื้น หรือถนน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำนบกั้นน้ำ อาจจะเป็นดินเหนียว หรืออิฐก็ได้

2. การฉีดน้ำหรือรดน้ำ เป็นการฉีดน้ำให้ผิวคอนกรีตเปียกอยู่เสมอวิธีนี้ใช้ได้กับงานคอนกรีต ทั้งในแนวดิ่ง แนวระดับ หรือแนวเอียง

3. การคลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น เป็นการนำวัสดุมาคลุมผิวคอนกรีต อาจจะใช้ ผ้าใบ กระสอบ หรือวัสดุอื่นที่อมน้ำ เป็นวิธีที่ใช้กันมาก เพราะสะดวก ประหยัด และสามารถใช้ได้กับงานทั้งแนวระดับ แนวดิ่ง และแนวเอียง

โดยน้ำที่ใช้บ่ม ควรมีคุณภาพสอดคล้องตามมาตรฐาน ไม่มีสารเจือปนที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต หรือทำให้ผิวคอนกรีตเปลี่ยนสี และหลีกเลี่ยงการใช้น้ำบ่มคอนกรีตที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าคอนกรีตเกิน 10°C เพราะจะทำให้ผิวคอนกรีตเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด และเกิดการแตกร้าวได้ (Thermal Shock)

2.2.2 การบ่มโดยการป้องกันการเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต วิธีการนี้ใช้การผนึกผิวของคอนกรีต เพื่อป้องกันมิให้ความชื้นจากคอนกรีตระเหยออกจากเนื้อคอนกรีต การบ่มลักษณะนี้สามารถทำได้ดังนี้

1. การบ่มในแบบหล่อ แบบหล่อไม้ที่เปียก และแบบหล่อเหล็ก สามารถป้องกันการสูญเสียความชื้นได้ดี วิธีนี้จัดได้ว่าง่ายที่สุด เพียงแค่ทิ้งแบบหล่อให้อยู่กับคอนกรีตที่หล่อไว้ให้นานที่สุดเท่าที่จะทำได้ และคอยดูแลให้ผิวด้านบนคอนกรีตมีน้ำอยู่ โดยน้ำนั้นสามารถไหลซึมลงมาระหว่างแบบหล่อกับคอนกรีตได้

2. การใช้กระดาษกันน้ำซึม เป็นการใช้กระดาษกันน้ำซึมปิดทับผิวคอนกรีตให้สนิท เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน วิธีนี้มักนิยมใช้กับงานคอนกรีตแนวระดับ กระดาษกันน้ำซึมนี้ เป็นกระดาษเหนียวสองชั้นยึด

ติดกันด้วยยางมะตอย และเสริมความเหนียวด้วยใยแก้ว มีคุณสมบัติในการยืดหดตัวไม่มากนักเวลาที่เปียกและ

3. การใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม วิธีการนี้จะเหมือนกับการใช้กระดาษกันน้ำ แต่แผ่นผ้าพลาสติกจะเบากว่ามาก จึงสะดวกในการใช้มากกว่า สามารถใช้กับงานโครงสร้างทุกชนิด

4. การใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต เป็นการพ่นสารเคมีลงบนผิวคอนกรีตซึ่งสารเคมีที่พ่นนี้จะกลายเป็นเยื่อบางๆ คลุมผิวคอนกรีตป้องกันการระเหยออกของน้ำในคอนกรีตได้ การบ่มวิธีนี้ทั้งสะดวกและรวดเร็วแต่ค่าใช้จ่ายจะสูง จึงมักใช้กับงานที่บ่มด้วยวิธีอื่นได้ลำบาก

2.2.3. การบ่มด้วยการเร่งกำลัง เป็นการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำโดยให้ความชื้น และความร้อน กับคอนกรีตที่หล่อเสร็จใหม่ๆ วิธีนี้จะทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นโดยรวดเร็วช่วยลดการหดตัว และเพิ่มความด้านทานต่อสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อคอนกรีต การบ่มคอนกรีตด้วยวิธีนี้สามารถทำได้สองวิธี คือการบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันต่ำ และการบ่มด้วยไอน้ำที่มีความดันสูง การบ่มด้วยการเร่งกำลัง นิยมใช้กันในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตสำเร็จรูป

2.2.4 การบ่มด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นการบ่มที่ใช้กระแสไฟฟ้าใช้เฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะทำให้คอนกรีต เป็นสื่อนำไฟฟ้าใช้เหล็กเสริมเป็นตัวนำความร้อน เพื่อให้กระแสไฟฟ้าห่อหุ้มคอนกรีต

2.3 เซนเซอร์อุณหภูมิ (Temperature Sensor)



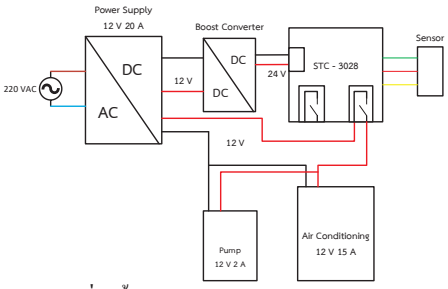
รูปที่ 1 เซนเซอร์ STC – 3028

เซนเซอร์อุณหภูมิ เป็น เซนเซอร์วัดหรือตรวจจับระดับอุณหภูมิในบริเวณที่ต้องการ ใช้สังเกตความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่กำหนดไว้กับอุณหภูมิจริงในปัจจุบัน เป็นอุปกรณ์สำคัญในส่วนอินพุท (Input) เพื่อควบคุมกระบวนการทำความร้อนและเย็นทางอุตสาหกรรมหรือภายในห้องปฏิบัติการ

คณะผู้จัดทำเลือกใช้ STC – 3028 เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น มาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิและตัดต่อการทำงานของเครื่องทำความเย็น

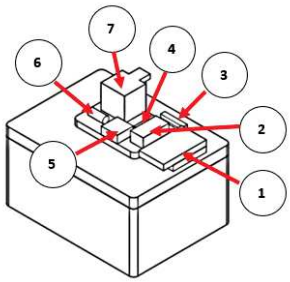
3. ขั้นตอนการทำ

3.1 การออกแบบวงจรควบคุม



รูปที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบวงจรการทำงาน

จากรูปที่ 2 เป็นการออกแบบวงจรการทำงานของอุปกรณ์ โดยนำ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 VAC เป็น แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 VDC 20 A ที่นำไปใช้กับ เซนเซอร์ STC-3028 ผ่านวงจรแปลงผันแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 24 VDC ที่นำมาใช้กับการควบคุมการตัดต่อการทำงานของเครื่องทำความเย็น 12 VDC 15 A และ ปั๊มน้ำ 12 V 2 A



รูปที่ 3 การออกแบบชุดควบคุม

จากรูปที่ 3 เป็นการออกแบบชิ้นงานของเครื่องบ่มคอนกรีต โดย ก. เป็นภาพด้านหน้า ข . เป็นภาพด้านข้าง มีขนาดกว้าง 60.50 เซนติเมตร ยาว 45.5 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร ค. เป็นการออกแบบการจัดวางอุปกรณ์เป็นภาพ 3 มิติ โดย

หมายเลข 1 คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ต่างๆ

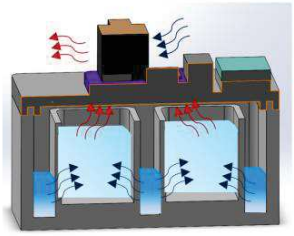
หมายเลข 2 คือ เบรกเกอร์ ทำหน้าที่ตัดการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆและป้องกันความเสียหาย

หมายเลข 3 คือ เทอร์มินอลบล็อก ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์

หมายเลข 4 คือวงจรแปลงผันแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าจ่าย 12 VDC เป็น 24 VDC

หมายเลข 5 คือ STC – 3028 ตรวจจับอุณหภูมิและควบคุมการทำงานของ ปั๊มน้ำ และเครื่องทำความเย็น

หมายเลข 6 และ 7 ตามลำดับ โดยปั๊มน้ำมีหน้าที่ปั๊มน้ำให้หมุนเวียนเพื่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างภายนอกและภายในผ่านทางเครื่องทำความเย็น ส่วน ง.เป็นตัวอย่างในการแลกเปลี่ยนอากาศภายในเครื่องบ่นคอนกรีต ซึ่งมีหลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ ผ่านปั๊มน้ำจะปั๊มน้ำมาผ่านคอยย์ทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นเพื่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยการบ่มคอนกรีตจะเป็นการบ่มแบบขังน้ำ โดยอุณหภูมิที่ได้จากการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิจะแพร่ความเย็นไปยังน้ำที่ใช้บ่มคอนกรีต ซึ่งจะเป็นการดูดอากาศร้อนออกจากตู้บ่มและรักษาอุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีต



รูปที่ 4 หลักการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4 หลักการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ ซึ่งวิธีการนี้ ความเย็นจะแทนที่ด้วยอุณหภูมิที่มีความแตกต่าง ซึ่งจะเป็นการไล่ความร้อนและแทนที่ด้วยความเย็น

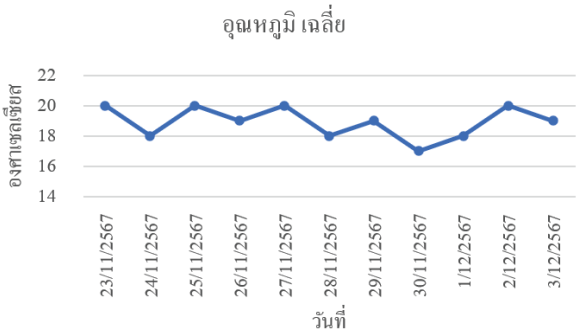


รูปที่ 5 ชุดควบคุม

จากรูปที่ 5 ชุดควบคุมนี้จะอยู่ด้านบนของกล่อง ซึ่งจะประกอบด้วย ชุดพาวเวอร์ ที่จะเป็นแหล่งจ่าย ชุดควบคุมความเย็นโดยใช้ STC – 3028 และ ตัวทำความเย็นโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 12 V โดยในงานวิจัยนี้สามารถปรับ อุณหภูมิละความชื้นพร้อมกับสามารถดูได้ทันที่ด้วย STC-3028

4. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาเครื่องบ่มคอนกรีตแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์ STC-3028 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทดสอบของนักศึกษาวิศวกรรมโยธา ตัวชุดทดสอบนั้น ขนาดกล่องมีขนาดกว้าง 60.50 เซนติเมตร ยาว 45.5 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร ซึ่งภายในกล่องนั้นจะทดสอบการวางคอนกรีต กว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร ได้จำนวน 2 ก้อน และอุปกรณ์ด้านบนทำเป็นชุดทำความเย็นที่มีเครื่องปรับความเย็นและปั๊มน้ำที่มีหน้าที่นำความเย็นเข้าสู่กล่อง ซึ่งการทดสอบตัวอุปกรณ์สามารถทำงานได้โดยควบคุมอยู่ที่ 17- 20 และทำการทดสอบตั้งแต่ วันที่ 23 พฤศจิกายน 2567 ถึง 3 ธันวาคม 2567 ทดสอบ 10



รูปที่ 6 ผลการทดสอบ

จากรูปที่ 6 ผลการทดสอบ ในการควบคุมอุณหภูมิในชุดทดลอง จำนวน 10 โดยค่าเฉลี่ยแต่ละวันจะไม่ต่ำกว่า 17- 20 องศาเซลเซียส โดยตัวชุดควบคุมจะใช้ เซนเซอร์ STC – 3028 ที่สามารถปรับอุณหภูมิ ได้ตามที่ต้องการซึ่งจะทำให้สะดวกและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย

เมื่อเปรียบเทียบราคา เครื่องบ่มคอนกรีตที่จะอยู่ในราคา 10,000 – 15,000 บาทต่อตู้นั้น ซึ่งในงานนี้เครื่องจะอยู่ที่ 2,200 บาท ทำให้ราคาประหยัดได้มากกว่าและสามารถนำไปใช้งานได้ เพื่อให้นักเรียนนักศึกษาได้ทดสอบในการบ่อคอนกรีตสำหรับในการทดสอบความแข็งแรง

5. กิตติกรรมประกาศ

ในโครงงานผู้จัดทำขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี และ ท่านอธิการบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุน และให้ใช้พื้นที่สำหรับในการทดสอบและจัดทำโครงงานนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ปนัดดา กสิกจวิวัฒนา และ กฤษณะ จันทรโชติ .ระยะเสาที่เหมาสมของการบ่อตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตในห้องปฏิบัติจากการออกแบบโดยวิธีซูเปอร์เพฟ. วารสาวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2564 : 47 – 60

[2] พรพิมล ฉายแสง และ คณะ. ระบบตรวจสอบคุณภาพการบ่มคอนกรีตในช่วงอายุต้นแบบไม่ทำลายด้วยอัตราส่วนของกำลังงานการสะท้อนในย่านความถี่ไมโครเวฟ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2566. 208 – 122

[3] ปรีชา สะแลแม.สัมประสิทธิ์กำลังอัดของคอนกรีตตามลักษระการบ่ม งานภนนผิวจราจรแบบคอนกรีต. Princess of Naradhiwas University Journal (PNUJR). 2552. 42- 50

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถังด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง

A System for Locating and Measuring Trash in Bins with an Internet of Things

พัทธพล วิโรจธีระกุล[1*] และ ดวงอาทิตย์ ศรีมูล[2]
[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์มหาบัณฑิต วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
E-mail: phatthaphon.v59@rsu.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดการขยะที่เพิ่มมากขึ้นทุกวันขาดประสิทธิภาพเนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบปริมาณขยะแบบเรียลไทม์ ส่งผลให้เกิดการจัดเก็บขยะที่ไม่เหมาะสม เช่น การเก็บขยะในจุดที่ยังไม่เต็มหรือละเลยจุดที่ขยะล้น บทความนี้นำเสนอระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถังด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง ระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) อุปกรณ์สำหรับติดตั้งกับถังขยะเพื่อระบบพิกัดตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถัง ใช้บอร์ด ESP-WROOM-32 ควบคุมการทำงาน ใช้โมดูล GPS GYNEO6MV2 สำหรับระบุพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของถังขยะ และใช้โมดูล Ultrasonic HCSR04 เพื่อวัดระยะทางจากเซนเซอร์ถึงผิวขยะ (2) แอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนที่พัฒนาบนแพลตฟอร์ม Blynk สำหรับแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์ พร้อมเชื่อมต่อกับ Google Maps API เพื่อแสดงตำแหน่งถังขยะและระดับขยะ ผลการทดสอบระบบในพื้นที่มหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี พบว่าค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งอยู่ที่ 5.32 เมตร และการวัดระดับขยะมีค่าคลาดเคลื่อน 0.40 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: ระบบระบุตำแหน่ง, วัดปริมาณขยะในถัง, อินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง, อีเอสพี-32, แพลตฟอร์ม Blynk (บลิงค์)

Abstract

The growing inefficiency in waste management due to the inability to monitor waste levels in real-time has led to suboptimal waste collection practices, such as collecting from bins that are not yet full or overlooking overflowing bins. This article presents an Internet of Things (IoT)-based system for real-time waste bin positioning and volume measurement. The system consists of two main components: (1) A hardware device attached to waste bins, utilizing an ESP-WROOM-32 microcontroller for processing, a GY-NEO6MV2 GPS module for geographic coordinate determination, and an HC-SR04 ultrasonic sensor to measure the distance from the sensor to the waste surface; and (2) A smartphone application developed on the Blynk platform for real-time data visualization, integrated with Google Maps API to display bin locations and fill levels. System testing at Rangsit University, Pathum Thani Province, revealed an average positioning error of 5.32 meters and a waste level measurement error of 0.40 centimeters, demonstrating the system's significant potential to enhance waste management efficiency.

Keywords: Locating system, measuring trash in bins, Internet of Things, ESP-32, Blynk platform

1. บทนำ

ขยะ หมายถึง วัตถุหรือสิ่งของที่หมดความจำเป็นในการใช้งาน ถูกทิ้งหรือไม่ต้องการอีกต่อไป ซึ่งสามารถอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ โดยอาจมีหรือไม่มีสารพิษเจือปน ทั้งนี้ ขยะสามารถจำแนกได้หลากหลายประเภท เช่น ขยะอินทรีย์ ขยะรีไซเคิล ขยะทั่วไป และขยะอันตราย จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ [1] พบว่าในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีขยะเกิดขึ้น 26.95 ล้านตัน หรือเฉลี่ยวันละ 73,836 ตัน โดยมีการกระจายตัวของขยะตามภูมิภาคต่าง ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนประชากรตามทะเบียนราษฎรของกรมการปกครอง ประจำปี พ.ศ. 2566 ซึ่งมีจำนวนประชากรประมาณ 66 ล้านคน พบว่าอัตราการเกิดขยะเฉลี่ยอยู่ที่ 1.12 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2565 คิดเป็นร้อยละ 4.86

การจัดการขยะที่ไม่มีประสิทธิภาพก่อให้เกิดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นปัญหามลพิษทางน้ำ การเสื่อมสภาพของดิน กลิ่นรบกวน รวมถึงการเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของสัตว์พาหะนำโรค เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว การดำเนินการจัดเก็บขยะอย่างรวดเร็วและเป็นระบบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะการนำเทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น ระบบระบุตำแหน่งและปริมาณขยะ มาใช้ในการสนับสนุนการวางแผนการเก็บขยะ สามารถช่วยยกระดับประสิทธิภาพของการจัดการขยะในระดับท้องถิ่น และและจำกัดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [2]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการกับขยะและระบบอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่งมีดังต่อไปนี้

บทความ [3] ได้ศึกษาและวิจัยการพัฒนาต้นแบบระบบถังขยะไอโอที และระบบจัดเก็บข้อมูลการทิ้งขยะแบบออนไลน์ของนักเรียนในโรงเรียนระดับประถมศึกษา โดยได้ออกแบบถังขยะสำหรับทิ้งขยะ 4 ประเภท ได้แก่ ขยะรีไซเคิล ขยะอินทรีย์ ขยะอันตราย และขยะทั่วไป ติดตั้งระบบเซนเซอร์เพื่อเปิดเสียงแนะนำการทิ้งขยะ และเก็บข้อมูลปริมาณขยะแยกตามประเภทของถังขยะ และช่วงเวลาการทิ้งขยะแต่ละวัน แสดงผลแบบ Dashboard ผ่าน Cloud Server แบบ Real Time ข้อมูลที่ได้มาจะถูกนำไปวิเคราะห์แยกตามประเภทขยะและความถี่ในการทิ้งขยะ เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ทางสถิติ

บทความ [4] ได้ศึกษาและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบจัดการถังขยะเพื่อพัฒนาระบบจัดการถังขยะด้วยเว็บแอปพลิเคชันและโมบายแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารจัดการถังขยะและช่วยให้การบริหารจัดการขยะได้มีระบบและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการตรวจสอบปริมาณของขยะ และสถานะของถังขยะตามพิกัด แบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 2 ประเภท คือ ผู้ดูแลระบบ และผู้ใช้ทั่วไป มี แอปพลิเคชัน Blynk แสดงข้อมูลแบบ Real Time ฮาร์ดแวร์ของระบบ ได้แก่ Node MCU, Ultrasonic Sensor และ IR Sensor ที่ส่งข้อมูลไปแสดงผลที่เว็บแอปพลิเคชัน

บทความ [5] ได้ศึกษาและพัฒนาถังขยะอัตโนมัติระบบไอโอที เพื่อสร้างถังขยะให้มีความทันสมัย โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดระยะด้วยคลื่นอัลตราโซนิก ร่วมกับ NodeMCU ESP8266 และ Arduino UNO R3 สำหรับประมวลผล โดยระบบสามารถเปิดฝาถังอัตโนมัติเมื่อมีการเคลื่อนไหวใกล้ถัง และตรวจสอบปริมาณขยะภายในด้วยเซนเซอร์อีกชุด พร้อมแจ้งเตือนไปยังสมาร์ทโฟนผ่าน Line Notify ผลการทดสอบพบว่าระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

บทความ [6] ได้ศึกษาและพัฒนาชุดเตาเผาขยะติดเชื้อโควิด-19 ที่ควบคุมด้วยระบบอัจฉริยะ (IoT) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบ พร้อมศึกษาการใช้งานจริงในพื้นที่เทศบาลนครศรีธรรมราช กลุ่มตัวอย่าง 10 คน ได้ให้ข้อมูลผ่านแบบสอบถามและการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าระบบเตาเผาที่พัฒนาขึ้นได้รับความพึงพอใจในระดับที่น่าพอใจ

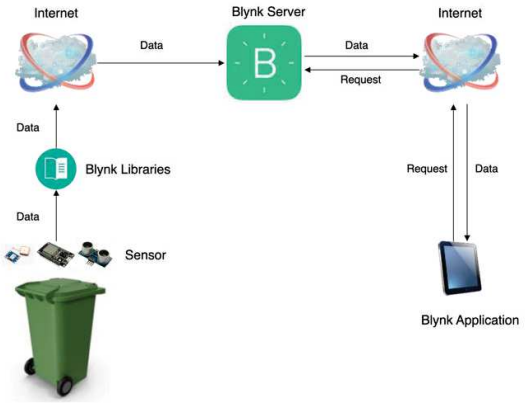
บทความ [7] ได้ศึกษาและพัฒนาระบบคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยเทคโนโลยีไอโอที โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบ ทดสอบประสิทธิภาพ และศึกษาการยอมรับจากผู้ใช้งาน เครื่องมือวิจัยประกอบด้วยตัวระบบ แบบประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ และแบบสอบถามผู้ใช้ โดยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่าระบบได้รับการประเมินว่ามีประสิทธิภาพและได้รับความพึงพอใจในระดับที่น่าพอใจ

จากการศึกษางานวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งและปริมาณขยะด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง โดยมุ่งเน้นการพัฒนาชุดอุปกรณ์สำหรับติดตั้งที่ถังขยะ ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับตรวจวัดปริมาณขยะ และบอร์ดควบคุม ESP-WROOM-32 สำหรับประมวลผลและส่งข้อมูล ทั้งค่าพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของถังขยะและระดับปริมาณขยะ ไปยังแอปพลิเคชันที่แสดงผลผ่านระบบแผนที่แบบเรียลไทม์ เพื่อให้หน่วยงานที่รับผิดชอบสามารถวางแผนการจัดเก็บขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดปัญหาการล้นของถังขยะ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2. การออกแบบและผลการทดสอบระบบ

2.1 การออกแบบระบบ

การออกแบบระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถังด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง มีโครงข่ายการเชื่อมต่อของระบบดังรูปที่ 1 จากรูป ถังขยะทางฝั่งซ้ายจะมีอุปกรณ์ระบุพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และวัดปริมาณขยะในถัง อุปกรณ์ที่ติดตั้งเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เซนเซอร์ Ultrasonic HCSR04 ที่ติดตั้งไว้มีหน้าที่วัดระยะจากเซนเซอร์ถึงผิวของขยะภายในถังโมดูล GPS GYNEO6MV2 จะบอกพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ในรูปแบบของค่าละติจูดและลองจิจูด ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสองจะถูกส่งข้อมูลผ่านไลบรารี Blynk ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไปยังเซิร์ฟเวอร์ของ Blynk ผู้ใช้สามารถเรียกดูข้อมูลปริมาณขยะและตำแหน่งของถังขยะแบบเรียลไทม์ (Real-Time) ผ่านแพลตฟอร์ม Blynk ได้ทั้งในรูปแบบของแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือหรือผ่านเว็บบราวเซอร์

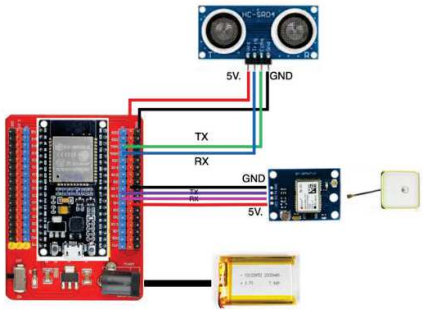


รูปที่ 1 โครงข่ายการเชื่อมต่อระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถัง

2.2 อุปกรณ์สำหรับติดตั้งกับถังขยะและหน้าจอใช้งาน

อุปกรณ์สำหรับติดตั้งกับถังขยะแสดงดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยบอร์ด Node MCU ESP-WROOM-32 ที่วางอยู่บนบอร์ดขยายขาเพื่อเพิ่ม

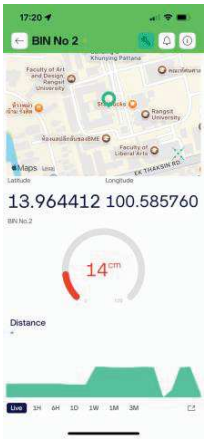
ความสามารถในการต่อโมดูลต่าง ๆ จากนั้นนำเซนเซอร์ Ultrasonic HCSR04 และ GPS module NEO6MV2 ต่อเข้ากับบอร์ดขยายขา ใช้แบตเตอรีลิเธียมไอออนเป็นแหล่งพลังงานให้กับบอร์ด Node MCU ESP-WROOM-32 อุปกรณ์ทั้งหมดบรรจุอยู่ภายในกล่องพลาสติกเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น และเพื่อให้สะดวกในการนำไปติดตั้งกับถังขยะดังรูปที่ 3 หน้าจอแสดงผลของผู้ใช้งานแสดงดังรูปที่ 4 โดยจะแสดงตำแหน่งถังขยะบนแผนที่ พิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ในรูปแบบของค่าละติจูดและลองจิจูด และแสดงผลปริมาณขยะในรูปของระยะทางจากเซนเซอร์ถึงผิวขยะหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) เมื่อระยะ 100 เซนติเมตร หมายถึง ถังขยะว่างเปล่า และ 0 เซนติเมตร หมายถึง ขยะเต็ม จากรูปที่ 4 เป็นถังขยะหมายเลข 2



รูปที่ 2 การเชื่อมต่อส่วนประกอบด้านที่ติดกับถังขยะ



รูปที่ 3 การประกอบอุปกรณ์ลงในกล่องเพื่อนำไปติดตั้งกับถังขยะ



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงตำแหน่งถังขยะบนแผนที่ พิกัดละติจูดและลองจิจูด และปริมาณขยะในถัง

2.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง และความแม่นยำในการวัดระยะภายในถังขยะ โดยการทดสอบได้เชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครือข่าย Wi-Fi ใกล้เคียง ทำการเก็บค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดทุกชั่วโมงตั้งแต่เวลา 09:00 น. ถึง 18:00 น. ทุก 1 ชั่วโมง จากถังขยะจำนวน 2 ถัง รวม 2 รอบการวัด แล้วคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากตำแหน่งจริง พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.32 เมตร

ส่วนความแม่นยำของการวัดระยะภายในถังขยะ เปรียบเทียบค่าที่ได้จากเซนเซอร์กับค่าที่วัดจริง โดยคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.40 เซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบความแม่นยำของการระบุตำแหน่งและระยะในถัง

รอบที่	เวลา	ถังขยะหมายเลข 1				ถังขยะหมายเลข 2			
		พิกัดจากระบบ		ตำแหน่งคลาดเคลื่อน (m)	ระยะใกล้เคียงคลาดเคลื่อน (cm)	พิกัดจากระบบ		ตำแหน่งคลาดเคลื่อน (m)	ระยะใกล้เคียงคลาดเคลื่อน (cm)
		ละติจูด	ลองจิจูด			ละติจูด	ลองจิจูด		
1	9:00	13.96437	100.5858	1.09	0	13.96441	100.5858	6.37	0
	10:00	13.96437	100.5858	1.09	1	13.96441	100.5858	7.73	2
	11:00	13.96437	100.5858	6.46	0	13.96441	100.5858	2.19	1
	12:00	13.96437	100.5858	6.46	0	13.96441	100.5858	6.74	1
	13:00	13.96437	100.5858	6.46	1	13.96441	100.5858	6.74	0
	14:00	13.96437	100.5858	6.46	0	13.96441	100.5858	7.17	0
	15:00	13.96437	100.5858	7.17	0	13.96441	100.5858	6.46	0
	16:00	13.96437	100.5858	7.73	0	13.96441	100.5858	6.74	0
	17:00	13.96437	100.5858	6.46	2	13.96441	100.5858	4.38	1
	18:00	13.96437	100.5858	3.28	1	13.96441	100.5858	6.37	0
2	9:00	13.96437	100.5858	6.74	0	13.96441	100.5858	6.46	0
	10:00	13.96437	100.5858	7.17	0	13.96441	100.5858	6.37	0
	11:00	13.96437	100.5858	1.09	0	13.96441	100.5858	3.28	1
	12:00	13.96437	100.5858	6.74	1	13.96441	100.5858	0	0
	13:00	13.96437	100.5858	6.46	1	13.96441	100.5858	6.46	0
	14:00	13.96437	100.5858	6.37	1	13.96441	100.5858	2.19	0
	15:00	13.96437	100.5858	1.09	0	13.96441	100.5858	7.17	0
	16:00	13.96437	100.5858	1.09	0	13.96441	100.5858	2.19	1
	17:00	13.96437	100.5858	7.73	2	13.96441	100.5858	6.46	0
	18:00	13.96437	100.5858	6.74	0	13.96441	100.5858	7.17	0
เฉลี่ย				5.2	0.5	เฉลี่ย		5.43	0.35

3. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอระบบระบุตำแหน่งและวัดปริมาณขยะในถังด้วยอินเตอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและศึกษาผลการใช้งานของระบบ ระบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) อุปกรณ์สำหรับติดตั้งกับถังขยะเพื่อบอกตำแหน่งและปริมาณขยะ ซึ่งใช้ Node MCU ESP-WROOM-32 สำหรับควบคุมการทำงานทั้งหมด โมดูล GPS GY-NEO6MV2 สำหรับระบุตำแหน่ง โมดูล Ultrasonic HCSR04 สำหรับตรวจสอบปริมาณขยะ และมีแบตเตอรีลิเธียมโพลิเมอร์สำหรับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ ส่วนที่ 2) ใช้แอปพลิเคชัน Blynk สำหรับเป็นหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยแอปพลิเคชันสามารถแสดงตำแหน่งของถังขยะที่ติดตั้งอุปกรณ์เป็นพิกัดละติจูดและลองจิจูดบนแผนที่ได้ และแสดงที่ว่างในถังขยะได้ การทดสอบการทำงานให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยฉบับนี้มีจุดเด่นที่แตกต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายประเด็นสำคัญ ได้แก่ การระบุตำแหน่งถังขยะแบบ Real-time ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามตำแหน่งของถังขยะได้อย่างแม่นยำและทันเวลา การเลือกใช้บอร์ด ESP-WROOM-32 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสามารถเชื่อมต่อ Wi-Fi ได้ทันที การแสดงข้อมูลตำแหน่งและปริมาณขยะผ่านแพลตฟอร์ม Blynk อย่างครบถ้วนทั้งในรูปแบบของแผนที่ และตัวเลขปริมาณ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวางแผนการจัดเก็บขยะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยรังสิตที่สนับสนุนทุนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมควบคุมมลพิษ. (2568). ข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศ. สืบค้นจาก https://thaimsw.pcd.go.th/report_country.php?year=2566, เมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2568.

[2] ชุติธารรัฐ อุดมะสิริเสนี และ ณิชดนีย์ ธัญพรหิรัณย์. (2564). การพัฒนาต้นแบบระบบถังขยะไอโอทีและระบบจัดเก็บข้อมูลการทิ้งขยะแบบออนไลน์ของนักเรียนในโรงเรียนระดับประถมศึกษา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ*, 7(1), 54-62.

[3] ศราวุธ ศุกกรี. (2567). การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบจัดการถังขยะ. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 16(23), 51-65.

[4] พิพัฒน์ ดุรงค์ดำรงชัย. (2565). ถังขยะอัตโนมัติระบบไอโอที. *วารสารวิจัยและนวัตกรรมการอาชีวศึกษา*, 6(1), 31-42.

[5] พัชรินทร์ อินทมาส และคณะ. (2565). การพัฒนาชุดเตาเผาสำหรับขยะติดเชื้อโควิด-19 ควบคุมด้วยระบบอัจฉริยะ (IoT). *วารสารวิชาการสถาบันการอาชีวศึกษาภาคใต้ 1*, 7(1), 108-117.

[6] ธานิล ม่วงพูล และวริยา เย็นเปีง. (2565). การพัฒนาระบบคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยเทคโนโลยีไอโอที. *วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ*, 8(2), 7-16.



ประวัติผู้เขียนบทความ
ชื่อ สกุล นายพัทธพล วิโรจธีระกุล
วัน เดือน ปีเกิด 5 กันยายน 2541
สถานที่ทำงาน โรงซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าสายสีชมพู
ตำแหน่งงาน วิศวกรซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
ประวัติการศึกษา
1. มหาวิทยาลัยรังสิต
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ปริญญา
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีระบบราง
2. มหาวิทยาลัยรังสิต
วิทยาลัยวิศวกรรมมหาบัณฑิตวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

โซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนสำหรับจ่ายโหลดปั๊มน้ำ แสดงผลในแอปพลิเคชันผ่านสมาร์ทโฟน

Two-Axis Solar Cell Tracker for Water Pump Load with Smartphone Application Interface

ตฤณภพ บุญเส็ง[1] นิยวดี ศรีสุวรรณ[1] วิกร วงษ์เสถียร[1] สุวัฒน์ สกลุชาติ[1] วารุณี ศรีสงคราม[2] และวราภรณ์ ลือใจ[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี
E-mail: waraporn.l@rmutsb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับการปรับมุมแผงโซลาร์เซลล์แบบ 2 แกนเพื่อให้สามารถหมุนหรือเคลื่อนที่ตามทิศทางของแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน โดยระบบนี้จะช่วยให้แผงโซลาร์เซลล์สามารถรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุด ซึ่งการปรับมุมของแผงโซลาร์เซลล์ให้ตรงกับแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องตลอดวัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบในทุกช่วงเวลาใน 1 วัน โดยมี 2 กรณีศึกษา คือ การทดสอบแบบมุมคงที่ 15 องศาหันทางทิศตะวันออกและการทดสอบแผงโซลาร์เซลล์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์หันทางทิศตะวันออก จากผลการทดลองพบว่าการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ตั้งแต่เวลา 9.00-17.00 น. เป็นระยะเวลาประมาณ 8 ชั่วโมง โดยชุดของโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงตามแสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้าต่อวันมากกว่าแบบมุมคงที่ และพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 13.04 ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อเทียบการทำงานของปั๊มน้ำจะมีค่ามากกว่าถึงร้อยละ 21.28 เมื่อเทียบกับการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์แบบมุมคงที่ที่ 15 องศา นอกจากนี้ยังสามารถแสดงผลของมุมในแนวแกน X และ Y ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ในแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านสมาร์ทโฟนและเก็บผลผ่าน Google Sheet

คำสำคัญ: โซลาร์เซลล์, การหมุนตามแสงอาทิตย์, แอปพลิเคชัน

Abstract

This article presents the adjustment of a two-axis solar panel system, enabling it to rotate or move according to the direction of sunlight throughout the day. This system ensures that the solar panels receive the maximum amount of sunlight. By continuously adjusting the tilt angle of the panels to align with the sun, the system improves the efficiency of electricity generation. The system was tested from 6:00 AM to 6:00 PM in two scenarios: one with a fixed tilt angle of 15 degrees facing east, and the other with a solar panel system that tracks the movement of the sun, also facing east. The results indicated that the tracking system, operating from 9:00 AM to 5:00 PM for approximately 8 hours, produced more daily electrical power, an average increase of 13.04% compared to the fixed tilt system. Furthermore, when comparing the performance of a water pump, the tracking solar panel system generated 21.28% more energy than the fixed 15-degree setup. In addition, the tilt angles along both the X and Y axes, as well as real-time data on voltage, current, power, and energy are displayed on the Blynk application via smartphones, with data stored in Google Sheets.

Keywords: solar cell, solar tracker, application

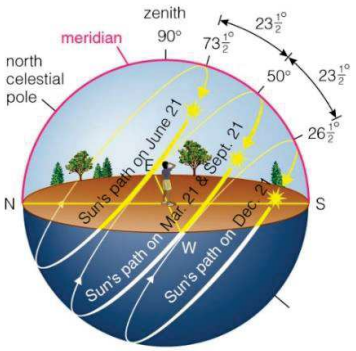
1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานหมุนเวียนในรูปแบบที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น คือ การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ผ่านเทคโนโลยีของแผงโซลาร์เซลล์ [1] แนวคิดการพัฒนาระบบโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์ โดยการออกแบบระบบการติดตามแสงอาทิตย์แบบแกนเดียวอัตโนมัติ [2] โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมเซนเซอร์แบบ Light Dependent Resistor (LDR) [3] เพื่อตรวจจับความเข้มของแสงอาทิตย์จากนั้นส่งสัญญาณไปยัง Arduino Nano โดยใช้มอเตอร์ควบคุมเพื่อให้แผงโซลาร์เซลล์หันหน้าไปตามความเข้มของแสงอาทิตย์สูงสุดตามช่วงเวลานั้น ๆ [4] ซึ่งจะเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บพลังงาน

แสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวัน โดยให้แผงโซลาร์เซลล์สามารถหมุนตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ช่วยให้สามารถรับแสงได้สูงสุดตั้งแต่เช้าจรดเย็น ซึ่งช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ โดยจะมีระบบปั๊มน้ำที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานจากโซลาร์เซลล์ เพื่อให้สามารถใช้ในงานเกษตรหรือพื้นที่ที่ต้องการน้ำ เช่น การรดน้ำในไร่นา การเลี้ยงสัตว์ หรือการเก็บน้ำในที่ห่างไกลที่ไม่มีไฟฟ้าสำรอง เป็นต้นสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ นอกจากนี้ระบบยังสามารถเก็บค่าข้อมูลที่เกี่ยวข้องโดยการเก็บค่าขึ้นระบบอินเตอร์เน็ตสรรพสิ่ง ซึ่งจะใช้รวบรวมข้อมูลสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์ [5] เช่น ปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ สถานะของปั๊มน้ำ และปริมาณน้ำที่ถูกสูบ เพื่อนำมาแสดงผลในแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนหรืออุปกรณ์อัจฉริยะอื่น ๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและควบคุมระบบจากระยะไกลได้อย่างสะดวก ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ติดตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกน โดยใช้มอเตอร์ที่สามารถปรับมุมองศาโดยใช้เซ็นเซอร์แบบ LDR จำนวน 4 ตัว ซึ่งสามารถเก็บค่าโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เก็บค่าไปยัง Google Sheet ซึ่งสามารถเก็บค่าพลังงาน ค่าความเข้มแสง โดยใช้ระยะเวลาในการเก็บทุก ๆ 10 นาที ซึ่งจ่ายโหลดไปยังปั๊มน้ำ

2. วิธีการดำเนินการ

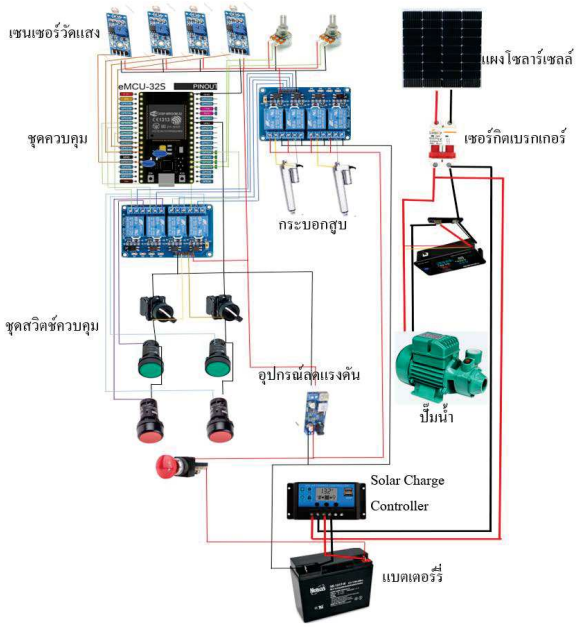
การออกแบบอุปกรณ์จะอ้างอิงกับการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามองศาบนแกนโลกตามรูปที่ 1 ซึ่งจะใช้การหมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกน เคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนวแกน Y โดยใช้โหลดเป็นปั๊มน้ำสามารถแสดงผลในแอปพลิเคชัน Blynk โดยแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนและเก็บผลผ่าน Google Sheet



รูปที่ 1 การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ตามองศาบนแกนโลก
[อ้างอิง: www.signsomething.com]

2.1 โครงสร้างและอุปกรณ์

การออกแบบของโปรแกรมจะมีการแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนของการสร้างปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์ติดตามดวงอาทิตย์ โดยนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้แสงดวงอาทิตย์มาใช้กับปั๊มน้ำ โดยใช้ระบบโซลาร์เซลล์ที่รับพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้อุปกรณ์ดังตารางที่ 1 และการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรการออกแบบอุปกรณ์ของโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่แบบ 2 แกน

ตารางที่ 1 รายละเอียดอุปกรณ์หลักของโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่แบบ 2 แกน

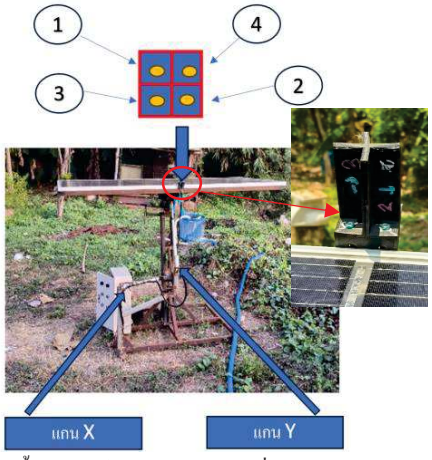
อุปกรณ์	รายละเอียด	จำนวน
ไมโครคอนโทรลเลอร์	ESP32 WiFi	1 ตัว
ปั๊มน้ำหอยโข่ง	24 โวลต์ 300 วัตต์	1 ตัว
แผงโซลาร์เซล์	450 วัตต์ โมโนคริสตัลไลน์	1 แผง
แบตเตอรี่	12 โวลต์ 17 Ah	1 ก้อน
เซ็นเซอร์วัดแสง	LDR	4 ตัว
เซอร์กิตเบรกเกอร์	DC 20AT	1 ตัว
ชุดรีเลย์	DC 5 โวลต์	2 ชุด
อุปกรณ์ลดแรงดัน	DC-DC 12 โวลต์ - 5 โวลต์	1 ตัว
กระบอกสูบไฟฟ้า	แนวแกน X และ Y	2 ตัว
Selector Switch	เลือกโหมดการทำงาน	2 ตัว
Bush Button Switch	กดสั่งงานและหยุด	4 ตัว
Emergency Switch	กดกรณีฉุกเฉิน	1 ตัว
Solar Charge Controller	ควบคุมการชาร์จจากโซลาร์เซลล์	1 ตัว

จุดเริ่มต้นเมื่อยังไม่มีแสงอาทิตย์ แผงโซลาร์เซลล์จะตั้งขึ้นทำมุม 75 องศา เนื่องจากข้อจำกัดของกระบอกสูบเพื่อลดการเกาะของหยดน้ำบนแผงโซลาร์เซลล์ และเมื่อเริ่มมีแสงจากดวงอาทิตย์ การทำงานจะเริ่มจากการ

ใช้เซนเซอร์วัดแสงแบบ LDR จำนวน 4 ตัวเป็นตัวกำหนดมุมในการทำงานของกระบอกสูบไฟฟ้า (Electric Actuator) เคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนวแกน Y แบบอัตโนมัติเพื่อหมุนตามแสงอาทิตย์ จากนั้นจะส่งพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ผ่านเซอร์กิตเบรกเกอร์ไปจ่ายยังโหลดที่เป็นปั๊มน้ำ และส่วนที่เหลือจะส่งไปเก็บยังแบตเตอรี่โดยผ่าน Solar Charge Controller เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้กับอุปกรณ์ส่วนการควบคุมโดยผ่านอุปกรณ์ลดแรงดันเป็น 5 โวลต์กระแสตรง ได้แก่ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สวิตช์ต่าง ๆ เซนเซอร์ รีเลย์ เป็นต้น เมื่อทำการประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน และ 2) ส่วนของการแสดงผลและเก็บค่า โดยเชื่อมต่อไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 กับสัญญาณ Wi-Fi ที่ทำการเชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตโดยแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ทโฟนและเก็บผลบน Spreadsheet ของ Google Sheet เพื่อสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลนำมาวิเคราะห์และเก็บผลย้อนหลังได้

2.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะเริ่มจากจากการใช้เซนเซอร์วัดแสงแบบ LDR จำนวน 4 ตัวตามรูปที่ 3 กำหนดให้เซนเซอร์วัดแสงแบบ LDR หมายเลข 1 และ 2 เคลื่อนที่กระบอกสูบในแนวแกน X และเซนเซอร์วัดแสงแบบ LDR หมายเลข 3 และ 4 เคลื่อนที่กระบอกสูบในแนวแกน Y แบบอัตโนมัติเพื่อหมุนตามแสงอาทิตย์โดยดูจากลักษณะการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์เป็นหลัก



รูปที่ 3 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแสงแบบ LDR สั่งงานแบบอัตโนมัติ

การแสดงผลบนแอปพลิเคชัน Blynk ตามรูปที่ 4 จะแสดงมุมของแกน X และแกน Y โดยทำการเปรียบเทียบค่าอนาล็อกอินพุตที่เข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นค่า 0-4095 โดยในแนวแกน X เมื่อทำการหดกระบอกสูบเข้าสุด ทำการวัดมุมจะได้ที่ 38 องศา และทำการยืดกระบอกสูบออกสุด ทำการวัดมุมได้ที่ 15 องศา ในแนวแกน Y ทำการยืดกระบอกสูบออกสุดที่ 0 องศา และทำการหดกระบอกสูบเข้าสุดเป็นมุม 90 องศา จากนั้นจะทำการเทียบสเกลค่าอนาล็อกแปลงเป็นองศาแสดงบนแอปพลิเคชัน และยังแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ทั้งยังเก็บค่าทุก ๆ 10 นาทีจะเก็บค่าแบบอัตโนมัติไปยัง Google Sheet



รูปที่ 4 ตัวอย่างหน้าแสดงผลบนแอปพลิเคชันผ่านสมาร์ทโฟน

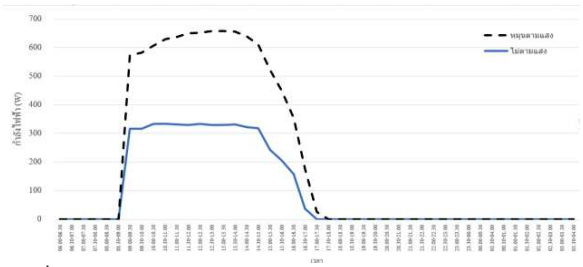
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ชุดโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนซึ่งนำมาใช้กับการจ่ายโหลดแบบปั๊มน้ำในพื้นที่การเกษตรโดยแสดงผลในแอปพลิเคชันใช้งานผ่านสมาร์ทโฟน โดยเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์แต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวันและพลังงานไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละวัน โดยการทดสอบแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 แผงโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่ทำมุม 15 องศา และกรณีที่ 2 แผงโซลาร์เซลล์แบบหมุนตามแสงอาทิตย์ตามแสงอาทิตย์ ซึ่งการทดสอบจะใช้อุปกรณ์จำนวน 2 ชุดติดตั้งในพื้นที่ใกล้เคียงกันและทดสอบที่สภาพแวดล้อมเหมือนกันตามช่วงเวลาต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

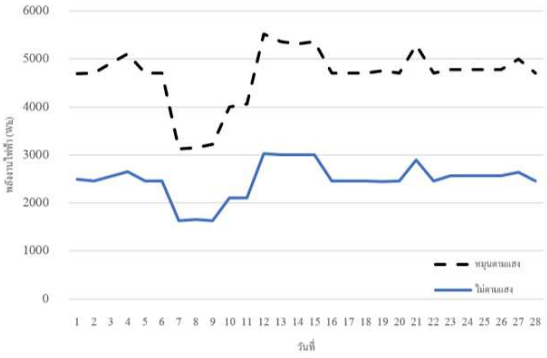
3.1 ประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์

ผลจากการทดสอบและเก็บค่าทุก ๆ 30 นาทีที่ได้บันทึกไว้ยัง Google Sheet โดยทำการยกตัวอย่างมา 1 วันในวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2568 พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้แต่ละช่วงเวลาของทั้ง 2 กรณี พบว่า โซลาร์เซลล์จะเริ่มผลิตไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 9.00-17.00 น. จำนวน 8 ชั่วโมงโดยโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงตามแสงอาทิตย์จะให้กำลังไฟฟ้ามากกว่าโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่ตามรูปที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้า (วัตต์-ชั่วโมง) ที่ได้ใน 1 เดือน ทดสอบ ณ เดือนกุมภาพันธ์ 2568 พบว่า โซลาร์

เซลล์หมุนตามแสงตามแสงอาทิตย์จะให้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่โดยเฉลี่ยแต่ละวันแล้วอยู่ที่ร้อยละ 13.04 ตามรูปที่ 6 และเมื่อเทียบการทำงานของปั๊มน้ำจะได้มากกว่าถึงร้อยละ 21.28



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างแผงโซลาร์เซลล์แบบหมุนตามแสงและอยู่กับที่ต่อ 1 วัน



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระหว่างแผงโซลาร์เซลล์แบบหมุนตามแสงและอยู่กับที่เดือนกุมภาพันธ์ 2568

3.2 การตอบสนองต่ออัตราการไหลของน้ำ

ตารางที่ 2 ระยะการแสดงผลด้วยแอปพลิเคชันผ่านสมาร์ทโฟน

เวลา (น.)	แบบอยู่กับที่		หมุนตามแสง		
	มุม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)	มุมแกน X (องศา)	มุมแกน Y (องศา)	อัตราการไหล (ลิตร/นาที)
9.00	15	7.54	28	71	65.92
10.00	15	64.84	85	62	82.1
11.00	15	81.04	91	57	81.46
12.00	15	83.92	49	46	85.52
13.00	15	81.84	15	15	83.5
14.00	15	65.46	19	1	80.12
15.00	15	48.3	18	4	59.84
16.00	15	0	17	2	10.16

ผลจากการทดสอบที่สามารถตอบสนองต่ออัตราการไหลของน้ำจากปั๊มที่ทำงานนั้น ทำการยกตัวอย่างมา 1 วันในวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2568 โดยใช้การทดสอบแบบหมุนตามแสงและแบบคงที่ในเวลาเดียวกัน โดยจะเก็บผลทุก 1 ชั่วโมง โดยแสดงผลเฉพาะช่วงที่ปั๊มทำงานสามารถเปรียบเทียบได้ตามตารางที่ 2 จะเห็นว่าอัตราการไหลของแบบหมุนตามแสงได้มากกว่าแบบอยู่กับที่

4. สรุป

โซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนสำหรับจ่ายโหลดปั๊มน้ำแสดงผลในแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านสมาร์ทโฟน จากการทดลองการทำงานของโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์สำหรับจ่ายโหลดปั๊มน้ำพบว่า การทำงานจะได้ประสิทธิภาพมากกว่าแบบอยู่กับที่ โดยที่ระยะเวลาการทำงานต่อวันเท่ากันที่ 8 ชั่วโมง ซึ่งโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงตามแสงอาทิตย์จะให้กำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า และปริมาณน้ำจากการทำงานของปั๊มมากกว่าโซลาร์เซลล์แบบอยู่กับที่ ซึ่งการใช้ชุดโซลาร์เซลล์หมุนตามแสงอาทิตย์แบบ 2 แกนนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] M. Akhtar, M. Raffeh, F. Zaman, A. Ramzan, and S. Aslam, “A Development of Congestion Level Based Dynamic Traffic Management System using IoT,” in 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, Turkey, 2020.

[2] N. Díaz, J. Guerra and J. Nicola, “A Smart Traffic Light Control System,” in 2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), Cuenca, Ecuador, 2018.

[3] P. Manikanta, Saddam S.K. Hussian and R. Tamil Kodi, “A IoT Ambulance with Automatic Traffic Light Control,” in 2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN), Vellore, India, 2019.

[4] K.N Rama and M. Babu, “A IoT for ITS: An IoT Based Dynamic Traffic Signal control,” in 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India, 2018, pp. 532-537.

[5] E. Basil and S.D. Sawant, “A IoT based traffic light control system using raspberry Pi,” in 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India, 2017, pp. 1078-1081.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบและสร้างโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัจฉริยะ

Design and build a smart Dubai cockroach farm

วิฑูรย์ พรมมี[1*] ประกาศิต ศรีทะแก้ว[1] ธนกฤต สราญสิริบรรรักษ์[1] และ จิรัฏฐ์ ฝั้นจักรสาย[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
E-mail: wprommee232@gmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัจฉริยะ เพื่อลดจำนวนความสูญเสียของแมลงเมื่อเปรียบเทียบกับการเลี้ยงด้วยระบบเดิม โรงเพาะเลี้ยงระบบใหม่ ควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน ทำการเลี้ยงทั้งสองระบบ เลี้ยงแบบไม่ควบคุมและเลี้ยงแบบควบคุมสภาวะแวดล้อม โดยเลี้ยงแบบใหม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ระบายอากาศในโรงเพาะเลี้ยง พร้อมให้อาหารและเลี้ยงโดยระบบไม่ควบคุม จะไม่มีระบบช่วยเลี้ยง จากนั้นสังเกตการสูญเสียจำนวนแมลง การลดลงของอาหารเมื่อมีอุณหภูมิความชื้นมาเกี่ยวข้อง การสูญเสียของไข่ น้ำหนักก่อนเลี้ยงและหลังเลี้ยง ทำการทดลองเลี้ยงระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบไม่ควบคุม พบว่า ค่าจากการใช้งานระบบอัตโนมัติ ที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ ค่าการสูญเสียจำนวนไข่ในระบบควบคุมน้อยกว่าระบบไม่ควบคุม นอกจากนี้ โรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัตโนมัติควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือยังสามารถนำไปต่อยอดการเพาะแมลงเพื่อเพิ่มผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ฟาร์มอัจฉริยะ, ระบบอัตโนมัติ, การควบคุมสิ่งแวดล้อม, การควบคุมด้วยโทรศัพท์มือถือ

Abstract

This article describes the design and construction of a smart Dubai cockroach farm to reduce the number of insect losses compared to traditional farming. New System Aquaculture Remote control via mobile phone via application Farming in both systems Uncontrolled and environmentally controlled farming. Ventilate the culture, ready to feed, and raise it in an uncontrolled system. A decrease in food occurs when temperature and humidity are involved. Loss of egg weight before and after feeding. It was found that the value of using the automation system was that the loss of eggs in the control system was less than that of the uncontrolled system. In addition, the automatic Dubia cockroach cultivation plant, which is controlled via mobile phone, can also be used to expand insect cultivation and increase productivity effectively.

Keywords: smart farm, automation system, environmental control, mobile remote control

1. บทนำ

วัฏจักรแมลงสาบดูเบีย วงจรชีวิตตั้งแต่เกิด ตัวเมียจะตั้งครรภ์ประมาณ 28 วัน และไข่อยู่ในท้องตัวเมียตลอดจนถึงการคลอด ดั้งนั้นเมื่อตัวเมียตาย ตัวอ่อนก็จะตายทั้งหมด ปกติตัวอ่อนจะมีจำนวนประมาณ 20-40 ตัว ตัวอ่อนจะเติบขึ้นระหว่างการลอกคาบ ก่อนเข้าสู่วัยโตเต็มที่ วัยโตเต็มที่มีชีวิตอยู่ 2 ปี อุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญของการเพาะเลี้ยง และพวกมันไม่ผสมพันธุ์ต่ำกว่า 20°C และไม่ลอกคราบหากความชื้นไม่ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ [1]



รูปที่ 1 แมลงสาบดูเบียโตเต็มวัย และตัวอ่อน

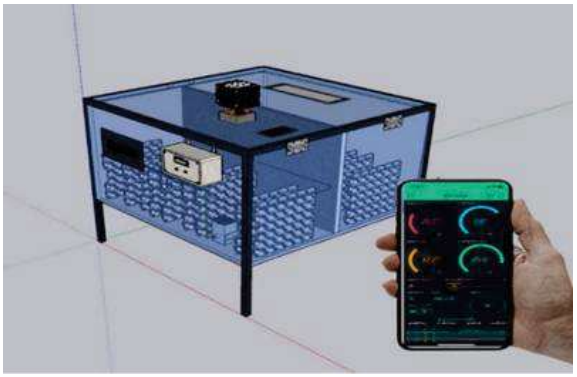
ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการทำฟาร์มอัจฉริยะได้ปฏิวัติการเพาะเลี้ยงแมลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเลี้ยงแมลงสาบดูเบีย แมลงเศรษฐกิจในตลาดอาหารสัตว์สวยงาม วิธีการทำฟาร์มแบบดั้งเดิมมักส่งผลให้เกิดความสูญเสียด้านการผลิตอย่างมาก เนื่องจากความผันผวนของสิ่งแวดล้อมและการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาระบบอัตโนมัติในการเลี้ยงแมลงได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเพื่อเพิ่มผลผลิตและลดการสูญเสีย เทคนิคการทำฟาร์มอัจฉริยะโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม ได้แสดงให้เห็นถึง

ประโยชน์ที่สำคัญในการปรับปรุงสภาพการผสมพันธุ์และลดอัตราการเสียชีวิต [2] ระบบควบคุมสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพอุณหภูมิ ความชื้น และการระบายอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพาะเลี้ยงแมลง [3] ระบบอัตโนมัติในการเลี้ยงแมลงได้รับการพิสูจน์แล้วว่าช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ในอาหาร ควบคุมการสูญเสียไข่ และปรับปรุงอัตราการเจริญเติบโตของแมลงโดยรวม ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มผลผลิต [4] นอกจากนี้ การวิจัยเกี่ยวกับการเลี้ยงแมลงสาบดูเบียยังให้ความสำคัญของการรักษาสภาพแวดล้อมให้คงที่ วิธีการทำฟาร์มแบบดั้งเดิมมักนำไปสู่ผลลัพธ์ที่คาดเดาไม่ได้ ในขณะที่ระบบอัตโนมัติให้ความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือในการเลี้ยงแมลง [5]

จากงานวิจัย [2-5] ได้ศึกษาการทำฟาร์มอัจฉริยะในการเพาะเลี้ยงแมลง อย่างไรก็ตามยังขาดการศึกษาโรงเพาะเบี้ยงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัตโนมัติควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในประยุกต์ใช้โทรศัพท์มือถือ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้คณะวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบีย อัตโนมัติควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือ เพื่อลดจำนวนความสูญเสียของการเพาะเลี้ยง

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

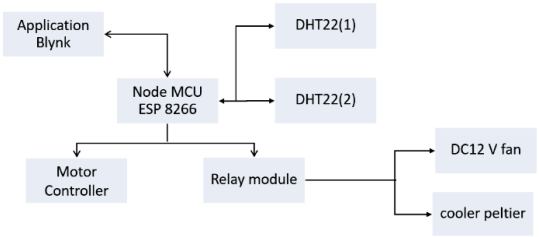
2.1 แบบจำลองโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัตโนมัติควบผ่านโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 2 โรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัตโนมัติควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือ

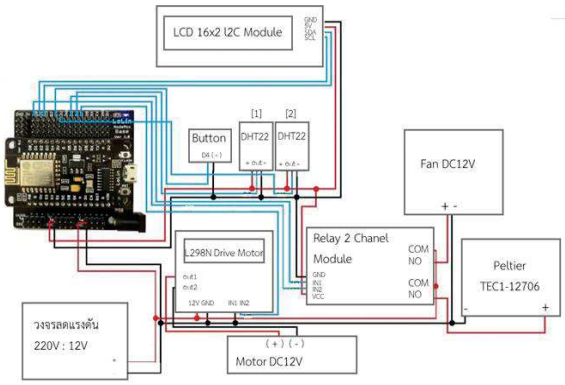
โรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบีย ขนาดกว้าง 0.5 เมตรยาว 1 เมตร สูง 1.1 เมตร การควบคุมระละไกลโดยใช้แอปพลิเคชันบิ้งค์ (Blynk) อายุการใช้งานของตัวอุปกรณ์ประมาณ 5 ปี ต้นทุนวัสดุ 1,200 บาท ค่าใช้จ่ายรายเดือน 90 บาท จุดคุ้มทุนประมาณ 4.3 เดือน

2.2 ระบบการทำงานโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบีย



รูปที่ 3 ระบบการทำงานของโรงเพาะเลี้ยง

ระบบการทำงานประกอบด้วยเซนเซอร์ดีเฮชทียี่สิบสองส่งค่าอุณหภูมิและความชื้นส่งไปยังบอร์ดอีเอสพีแปดสองหกหก แสดงบนแอพพลิเคชั่นและสั่งการกลับมายังอุปกรณ์ชุดทำความเย็น(cooler peltier) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าที่ตั้งไว้และสั่งเครื่องให้อาหารทำงานตามที่ตั้งค่าปริมาณการให้อาหาร พัดลมจะทำงานเมื่อสั่งการใช้งานบนแอพพลิเคชั่น



รูปที่ 4 การต่อเชื่อมอุปกรณ์กับบอร์ดอีเอสพีแปดสองหกหก

รูปที่ 4 วงจรการเชื่อมต่ออุปกรณ์บอร์ดอีเอสพีแปดสองหกหก ขาวีไอเอ็นต่อเข้ากับแหล่งจ่าย ขาดีศูนย์ ต่อเข้ากับไอเอ็นสองของ รีเลย์สองช่องสัญญาณ ขาดีหนึ่งต่อกับขาเอสซีแอลของจอแอลซีดี ขาดีสองต่อเข้ากับเอสดีเอของจอแอลซีดี ขาดีสามต่อเข้ากับช่องเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ ดีเฮชทียี่สิบสอง ตัวที่สอง ขาดีสี่ต่อเข้ากับขาไอเอ็นของสวิตช์ตั้งค่าขาดีห้าต่อเข้ากับขาไอเอ็นหนึ่งของรีเลย์ ขาดีเจ็ดต่อเข้ากับขาเอาต์พุต ของของเซ็นเซอร์ ดีเฮชทียี่สิบสอง ตัวที่หนึ่ง ขาดีแปดต่อเข้ากับช่องไอเอ็นหนึ่ง ของบอร์ดขับมอเตอร์ขาห้าโวลต์ต่อเข้ากับขาห้าโวลต์ของจอแอลซีดี และต่อเข้ากับขั้วบวกของดีเอชทียี่สิบสอง ทั้งตัวที่หนึ่งและสอง ขาจีเอ็นดีของบอร์ดอีเอสพีแปดสองหกหกต่อเข้ากับขาเอาต์พุตของสวิตช์ตั้งค่าและขาลบของดีเอชทียี่สิบสอง ทั้งสองตัวขาเอาต์พุตหนึ่ง

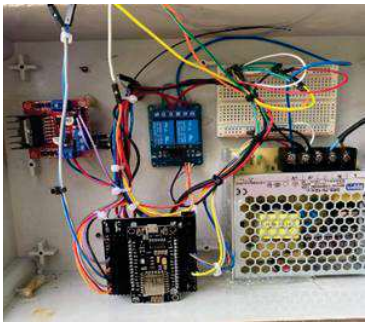
และเอาต์พุตสอง ของชุดขับมอเตอร์จะต่อเข้ากับขั้วบวกและลบของมอเตอร์ดีซี ซึ่งเอ็นโอของรีเลย์ต่อเข้ากับขั้วบวกของพัดลมและแผ่นเพลเทียร์ขาคอมของรีเลย์ ต่อเข้ากับขั้วลบของพัดลมกับชุดทำความเย็นเพลเทียร์ ขาวีไอเอ็นกับขาจีไอเอ็น องบอร์ดเอ็มซียูแปดสองหกหก ต่อเข้ากับช่องสิบสองโวลต์ของชุดขับมอเตอร์ดีซี และไอเอกับจีไอเอ็น

3. ผลการทดลอง

โรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียแบ่งเป็นสองห้องติดกันสำหรับเลี้ยงด้วยระบบควบคุมและระบบไม่ควบคุม แผงไข่สำหรับเพาะเลี้ยงและวัสดุโครงสร้างที่แข็งแรงในระบบปิด



รูปที่ 5 โรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบีย

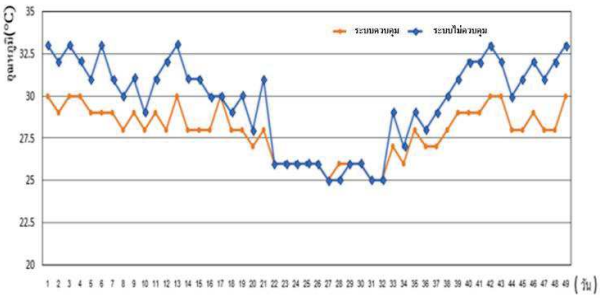


รูปที่ 6 อุปกรณ์สำหรับคุมระบบอุณหภูมิ ให้อาหาร และระบายอากาศ

รูปที่ 6 ประกอบด้วย หม้อแปลงแรงดัน 220V AC to 12V DC บอร์ดอีเอสพีแปดสองหกหก อ่านค่าอุณหภูมิจากดีเอชทียี่สิบสอง และควบคุมการปรับตั้งอุปกรณ์ชุดรีเลย์สำหรับควบคุมแผ่นเพลเทียร์ พัดลมขนาด 12 โวลต์ บอร์ดขับมอเตอร์ขนาด12โวลต์ หน้าจอแอลซีดี แสดงค่าอุณหภูมิและความชื้น



รูปที่ 7 การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้แอปพลิเคชัน



รูปที่ 8 อุณหภูมิเฉลี่ยต่อวันระหว่างระบบควบคุมและไม่ควบคุม

รูปที่ 8 ระบบควบคุมสามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงเหมาะสม (ไม่เกิน 28°C) ได้ดีกว่าระบบไม่ควบคุมมีความแปรปรวนของอุณหภูมิสูง ซึ่งส่งผลให้แมลงสาบมีอัตราการตายและการสูญเสียไข่สูงขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิสูงเกิน 30°Cโดยเฉพาะในสัปดาห์ที่ 6 และ 7

ตารางที่ 1 การสูญเสียจำนวนไข่แมลงสาบดูเบีย

สัปดาห์	การสูญเสียจำนวนไข่ (ฟอง)	
	ระบบควบคุม	ระบบไม่ควบคุม
1	1	2
2	0	3
3	1	1
4	1	0
5	0	0
6	2	5
7	2	3
รวม	7	14

ตารางที่ 1 ระบบควบคุมสูญเสียไข่รวม 7 ฟอง ระบบไม่ควบคุมสูญเสียไข่รวม 14 ฟอง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมลดการสูญเสียไข่ลงได้ครึ่งหนึ่ง เมื่อเทียบกับระบบไม่ควบคุม

ตารางที่ 2 จำนวนการเสียชีวิตของแมลงสาบดูเบีย

สัปดาห์	จำนวนการเสียชีวิต (ตัว)	
	ระบบควบคุม	ระบบไม่ควบคุม
1	3	4
2	0	0
3	11	17
4	13	19
5	4	15
6	14	28
7	22	30
รวม	67	113

ตารางที่ 2 ระบบควบคุมช่วยลดอัตราการเสียชีวิตของแมลงลงได้อย่างมีนัยสำคัญ ความสำคัญของผลที่นำมาเสนอคือ การยืนยันประสิทธิภาพของระบบควบคุมอัตโนมัติในการลดอัตราการตายและการสูญเสียไข่ ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียและสนับสนุนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี ไอโอที ในภาคการเกษตร โดยเฉพาะการควบคุมสิ่งแวดล้อมผ่านมือถือที่ช่วยลดความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น นอกจากนี้ยังลดต้นทุนแรงงาน เนื่องจากสามารถควบคุมและติดตามการเลี้ยงจากระยะไกลแบบเรียลไทม์

3. สรุป

ผลที่ได้จากการทดลองโรงเพาะเลี้ยงแมลงสาบดูเบียอัตโนมัติควบคุมผ่านโทรศัพท์มือถือ โดยวิธีการไอโอทีสั่งการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น พบว่า ระบบควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 28 องศาเซลเซียสและความชื้นไม่ต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปัญหาการทิ้งไข่และการตายในระบบไม่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นและสามารถประหยัดแรงงานคนในกระบวนการเลี้ยงแมลงเพื่อลดต้นทุนแรงงาน ซึ่งเป็นประโยชน์กับเกษตรกรที่เลี้ยงแมลงและผู้ที่สนใจ นอกจากนี้ สำหรับงานพัฒนาต่อไปควรเพิ่มระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติหากอุณหภูมิหรือความชื้นผิดปกติ ชุดอุปกรณ์ในตู้ควบคุมควรมีอุปกรณ์ป้องกันและควรใช้ไฟโต้บอร์ดในตู้ควบคุม ขยายระบบไอโอทีให้มีสำรองพลังงาน เพื่อแก้ปัญหาการเกิดไฟดับ ระบบยังคงทำงานได้ต่อเนื่อง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่สนับสนุน งบประมาณ สถานที่ วัสดุฝึกและเครื่องมือวัดในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Brown and K. Taylor, “Environmental control systems in modern insect farming,” J. Agric. Technol., vol. 15, no. 3, pp. 45–60, 2019.

[2] L. Garcia and R. Lopez, “Improving Dubia cockroach farming through automation,” *Insect Sci. Technol.*, vol. 12, no. 2, pp. 78–92, 2020.

[3] A. E. Arumona et al., "Microfluidic Flow Rate Sensor Using Electron Cloud Plasma Transport Within Silicon Mirroring Circuits," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 24, pp. 27268-27274, 15 Dec.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3124368.

[4] R. Smith, T. Johnson, and S. Kim, “Advances in smart farming: The impact of automation on insect cultivation,” *Smart Agric. Rev.*, vol. 18, no. 4, pp. 102–118, 2020.

[5] H. Wang, Y. Zhao, and L. Chen, “Enhancing insect productivity with automated systems,” J. Sustain. Agric., vol. 20, no. 5, pp. 55–73, 2022.



ผศ.ดร.วิฑูรย์ พรมมี
อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าและเกษตรอัจฉริยะ



ผศ. ประกาศิต ศรีทะแก้ว
อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าและเกษตรอัจฉริยะ



นายนธนกฤต สราญสิริบริรักษ์
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าและเกษตรอัจฉริยะ



นายจิรัฏฐ์ ฝั้นจักรสาย
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมไฟฟ้าและเกษตรอัจฉริยะ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาเครื่องช่วยเดินอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุโดยใช้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Development of Intelligent Walker for the Elderly using Internet of Things

นิยวดี ศรีสุวรรณ[1] วราภรณ์ ลือใจ[1] ตฤณภพ บุญเส็ง[1] สุวัฒน์ สกุลชาติ[1] และ วิกร วงษ์เสถียร[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: wikorn.w@rmutsb.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องช่วยเดินอัจฉริยะสำหรับผู้สูงอายุโดยใช้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ซึ่งจะช่วยให้ผู้สูงอายุมีการเดินได้อย่างสะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินมากขึ้น โดยการใช้บอร์ด Node-MCU ESP32 มาควบคุมการทำงานของเครื่องช่วยเดิน โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านสวิตช์ปุ่มกดที่มือจับของเครื่อง สามารถเปลี่ยนทิศทางและความเร็วได้ นอกจากนี้มีการแจ้งเตือนการล้ม โดยใช้ไจโรสโคปเซนเซอร์วัดระดับความเอียงของเครื่องและส่งการแจ้งเตือนพร้อมพิกัดตำแหน่งผ่านแอพพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือไปยังผู้ดูแล และมีฟังก์ชันเพิ่มเติมในการวัดชีพจรและระยะทางการเดิน โดยแสดงผลทางหน้าจอแอลซีดี ผลการทดสอบการทำงานในส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ การทำงานของฟังก์ชันต่างๆ สามารถทำงานถูกต้อง 100% นอกจากนี้จากผลการสำรวจการใช้งานเครื่องช่วยเดินจากอาสาสมัครจำนวน 5 คน โดยเป็นผู้สูงอายุ ซึ่งมีอายุระหว่าง 50-70 ปี พบว่า ได้คะแนนสูงสุด 92% ในหัวข้อความสะดวกสบายในการปรับความเร็วและทิศทาง ส่วนความแข็งแรงของตัวเครื่องอาจจะต้องมีการปรับปรุงต่อไป

คำสำคัญ: เครื่องช่วยเดินอัจฉริยะ, ไมโครคอนโทรลเลอร์, ไอโอที

Abstract

This paper presents the development of a smart walking aid for the elderly using Internet of Things (IoT) to improve walking convenience and efficiency. The device is controlled by a Node-MCU ESP32, with movement managed through a push-button switch on the handle, allowing users to adjust both direction and speed. Additionally, the device features a fall detection system that utilizes a gyroscope sensor to measure tilt angles. When a fall is detected, an alert along with the user's location is sent to a caregiver via a mobile application. Moreover, the device includes additional functions for measuring heart rate and walking distance, with real-time data displayed on an LCD screen. The performance evaluation demonstrated that the movement control and all functions operated with 100% accuracy. Furthermore, a user satisfaction survey conducted with five elderly volunteers aged 50–70 years revealed a highest score of 92% for the ease of adjusting speed and direction. However, the structural durability of the device may require further improvements.

Keywords: Intelligent Walker, Microcontroller, Internet of Things(IoT)

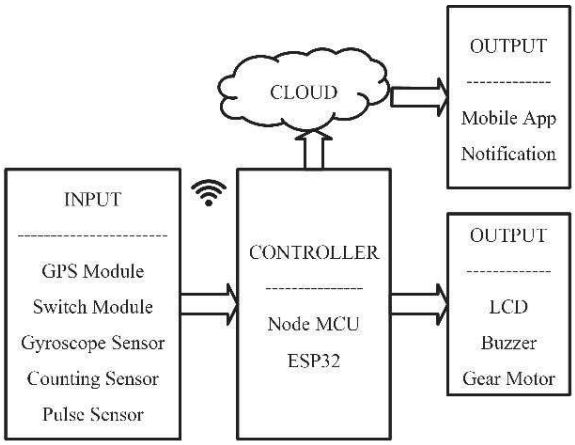
1. บทนำ

ในการเคลื่อนที่สำหรับกลุ่มผู้สูงอายุจำเป็นต้องมีเครื่องช่วยเดินเพื่อเพิ่มความสะดวกสบายและเพิ่มความปลอดภัยในการเดิน เช่น ไม้เท้า ไม่ค้ำ และเครื่องช่วยเดิน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มความสมดุลและป้องกันการหกล้มระหว่างทำกิจวัตรประจำวัน โดยที่อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถช่วยเพิ่มความมั่นคงในการทรงตัวและช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้สูงอายุและยกระดับความเป็นอิสระในการดำรงชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี

เครื่องช่วยเดินหรือวอล์กเกอร์ (Walker) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์สำคัญในการช่วยเดินอย่างมากของผู้สูงอายุและผู้ป่วยโรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง ลักษณะทั่วไปเป็นโครงขา 4 ขา ด้านบนมีมือจับอยู่ 2 จุด ใช้สำหรับช่วยพยุง รองรับน้ำหนักของผู้ใช้งาน ผลิตจากวัสดุหลากหลายชนิด วอร์กเกอร์ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ประเภท คือ วอร์กเกอร์มาตรฐาน ซึ่งเป็นชนิดที่ไม่มีล้อหรืออุปกรณ์เสริมบริเวณล้อ วอร์กเกอร์ 2 ล้อ และวอร์กเกอร์ 4 ล้อ

จากปัญหาและความต้องการของผู้สูงอายุที่ต้องการความปลอดภัยในการเดินมากขึ้น มีงานวิจัยหลากหลายงานวิจัยที่พัฒนาเกี่ยวกับเครื่องช่วยเดิน [1-5] ซึ่งได้พัฒนาเครื่องช่วยเดินมาเพื่อช่วยเหลือผู้ป่วยและผู้สูงอายุ สำหรับงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องช่วยเดินให้มีความสะดวกสบายและปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากขึ้น โดยมีฟังก์ชันในการช่วยเดิน ซึ่งเป็นการกดสวิตช์ตรงมือจับของเครื่องช่วยเดินเพื่อทำให้ล้อ

เคลื่อนที่โดยผู้ใช้ไม่ต้องใช้แรงยก สามารถปรับความเร็วในการเดิน และทิศทางการเดินได้ง่าย นอกจากนั้นเพื่อความปลอดภัยสำหรับผู้ใช้งาน จะมีฟังก์ชันตรวจจับการล้ม และแจ้งเตือนการล้มเพื่อขอความช่วยเหลือและส่งพิกัดตำแหน่งของผู้ใช้งานไปยังแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือของผู้ดูแล



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุม

2. การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ การออกแบบตำแหน่งอุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ลงบนเครื่องช่วยเดิน

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

งานวิจัยนี้นำเครื่องช่วยเดินแบบมาตรฐานมาพัฒนา ให้เป็นแบบ 4 ล้อ โดยทำการติดตั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ Node-MCU ESP32 ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ โดยมีหลักการทำงานดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักดังนี้

2.1.1 ส่วนของการตรวจวัด ประกอบด้วย ไจโรสโคปเซนเซอร์สำหรับตรวจจับการล้ม พัลส์เซนเซอร์สำหรับตรวจจับชีพจร จีพีเอสโมดูลสำหรับระบุตำแหน่งของเครื่อง เซนเซอร์ตรวจนับสำหรับวัดระยะทางการเดิน สวิตช์สำหรับกดแจ้งเหตุเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน

2.1.2 ส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ ประกอบไปด้วย มอเตอร์เกียร์ดีซีขนาด 12 V จำนวนรอบ 40 RPM ใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ล้อ ซึ่งมีสวิตช์ปุ่มกด 2 ตัว ติดตั้งอยู่ที่ด้ามจับของเครื่องช่วยเดิน ใช้สำหรับควบคุมการทิศทางการเคลื่อนที่ โดยถ้ามีการกดสวิตช์ด้านขวาจะเป็นการเลี้ยวซ้าย กดสวิตช์ด้านซ้ายจะเลี้ยวขวา ถ้ากดสวิตช์ 2 ข้างพร้อมกันจะเป็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า นอกจากนี้จะมีปุ่มปรับระดับความเร็วในการเคลื่อนที่ และสวิตช์คันโยกสำหรับเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่หน้าหลัง

2.1.3 ส่วนของการแสดงผล ประกอบด้วย หน้าจอแอลซีดีขนาด 20 หลัก 4 แถว ซึ่งใช้แสดงผลค่าระยะทาง อัตราการเต้นของหัวใจ สถานะการเชื่อมต่อ Wi-Fi สถานะแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน นอกจากนี้จะมีการแสดงผลที่หน้าจอสมาร์ทโฟนผ่านแอปพลิเคชัน Line Notify เมื่อมีเกิดการล้มหรือมีการกดปุ่มฉุกเฉิน

2.2 การออกแบบตำแหน่งอุปกรณ์และการติดตั้ง

ในการออกแบบตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บนเครื่องช่วยเดินต้องจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ให้เหมาะสมและสามารถใช้งานได้คล่องตัว โดยคำนึงถึงการใช้งานอุปกรณ์จริง น้ำหนักของอุปกรณ์ที่ติดตั้ง และรูปทรงของอุปกรณ์ โดยการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2 กล่องควบคุมจะอยู่ด้านบนของตัวเครื่อง ภายในกล่องควบคุมประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ Node-MCU ESP32 ไจโรเซนเซอร์ โมดูลจีพีเอส แบตเตอรี่ หน้าจอแอลซีดี สวิตช์ควบคุม บัซเซอร์ ด้านล่างของตัวเครื่องจะติดตั้งล้อทั้ง 2 ด้าน (4 ล้อ) โดยล้อด้านหน้าจะมีขนาดใหญ่กว่าล้อด้านหลัง เพื่อให้น้ำหนักของตัวเครื่องมีความสมดุล ล้อจะถูกขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์เกียร์ บริเวณมือจับทั้งสองข้างของเครื่องช่วยเดินจะติดตั้งสวิตช์แบบกดติดปล่อยดับซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับวงจรควบคุมมอเตอร์เกียร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของล้อ นอกจากนี้ยังมีเซนเซอร์ตรวจวัดระยะทางการเดินติดตั้งอยู่บริเวณใกล้กับล้อหน้าด้านขวา และเซนเซอร์วัดชีพจรอยู่บริเวณมือจับด้านขวา



รูปที่ 2 เครื่องช่วยเดินที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์พร้อมใช้งาน



รูปที่ 3 แผงควบคุมบนเครื่องช่วยเดิน

ในการทำงานของเครื่องช่วยเดินที่ถูกพัฒนา สามารถควบคุมการทำงานจากแผงควบคุมซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย (1) สวิตช์เปิดปิดเครื่อง (2) ปุ่มปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของล้อ (3) สวิตช์ปรับทิศทางการเคลื่อนที่หน้า-หลัง (4) รูชาร์จแบตเตอรี่ (5) หน้าจอแอลซีดีแสดงผล แสดงค่าระยะทางการเดิน ค่าชีพจร ค่าสถานะการเชื่อมต่อเครือข่าย Wi-Fi สถานะการทำงานของเครื่อง (6) ไฟแสดงสถานะแบตเตอรี่ (7) สวิตช์การส่งข้อมูลไปยังแอพพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน สีแดงสำหรับกดส่งค่าระยะทางการเดิน สีเหลืองสำหรับกดส่งค่าชีพจร สีฟ้าสำหรับรีเซตการเชื่อมต่อ Wi-Fi สีเขียวสำหรับรีเซตค่าต่างๆ ที่เก็บข้อมูล (8) สวิตช์ฉุกเฉิน สำหรับกดเพื่อแจ้งสถานการณ์ฉุกเฉินที่ต้องการความช่วยเหลือ เครื่องจะส่งเสียงดัง พร้อมกับส่งข้อความขอความช่วยเหลือและตำแหน่งปัจจุบันของผู้ใช้งานไปยังผู้ดูแล

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องช่วยเดินที่พัฒนา จะทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องช่วยเดินดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่

ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของเครื่องช่วยเดิน โดยควบคุมให้มีการเดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา จำนวน 10 รอบ โดยทำการทดสอบทั้งบนพื้นที่ราบเรียบและพื้นผิวขรุขระ พบว่าสามารถทำงานได้ถูกต้อง 100 % แต่บนพื้นผิวขรุขระมีการสั่นของเครื่องเล็กน้อย

3.2 ผลการทดสอบการตรวจวัดระยะทางโดยใช้เซนเซอร์ตรวจนับ

ทำการทดสอบการอ่านค่าระยะทางโดยเปรียบเทียบระยะทางที่วัดได้จริงกับระยะทางที่อ่านได้จากเซนเซอร์ตรวจนับโดยผ่านหน้าจอแอลซีดี โดยทำการทดสอบ 5 ครั้ง ระยะทางที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าสามารถอ่านค่าระยะทางได้ถูกต้อง 100%

3.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบแจ้งเตือนเมื่อตรวจจับการล้มและการกดสวิตช์ฉุกเฉิน

ทำการทดสอบการตรวจจับการล้มโดยใช้ไจโรสโคปเซนเซอร์ โดยทำการเอียงเครื่องช่วยเดินไปทางแกน Y ให้มุมองศาระดับแตกต่างกัน 5 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งผลการทดสอบพบว่า ถ้าระดับการเอียงต่ำกว่า 26 องศา เป็นการตรวจจับว่ามีการล้มเกิดขึ้น ระบบจะส่งเสียงแจ้งเตือนผ่านบัซเซอร์ และส่งข้อความแจ้งเตือนผ่านไลน์พร้อมกับตำแหน่งปัจจุบันของผู้ใช้งาน ซึ่งผลการทดสอบถูกต้อง 100% เช่นเดียวกัน เมื่อทำการทดสอบการกดปุ่มสวิตช์ฉุกเฉิน ก็จะมีการแจ้งเตือนผ่านบัซเซอร์ และ แจ้งเตือนผ่านไลน์พร้อมพิกัดตำแหน่ง

3.4 ผลการทดสอบการใช้งานจริงจากอาสาสมัคร

ทำการทดสอบการใช้งานจริงโดยให้อาสาสมัครที่เป็นผู้สูงอายุ ที่มีอายุตั้งแต่ 50-70 ปี จำนวน 5 คน ทำการใช้งานเครื่องช่วยเดินและให้อาสาสมัครกรอกแบบประเมินประสิทธิภาพของเครื่องช่วยเดินใน 5 หัวข้อ ต่อไปนี้

1) ความคล่องตัวในการเดิน
2) ความสะดวกสบายในการปรับทิศทางและความเร็ว
3) ความแข็งแรงของเครื่อง
4) ความเข้าใจการใช้งานเครื่อง
5) ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่อง

โดยผลสรุปคะแนนความพึงพอใจการใช้งานจากอาสาสมัครทั้ง 5 คนแสดงดังตารางที่ 3 โดยในแต่ละหัวข้อแต่ละคนจะมีคะแนนเต็ม 5 คะแนน โดยที่คะแนนรวมทั้ง 5 คน คือ 25 คะแนน จากตารางพบว่าความพึงพอใจในส่วนของความสะดวกสบายในการปรับทิศทางและความเร็ว มีคะแนนสูงสุด 23 คะแนน ความคล่องตัวในการเดินคะแนนรองลงมา 21 คะแนน ส่วนในหัวข้อความเข้าใจการใช้งานเครื่องมีคะแนนน้อยสุดเนื่องจาก เครื่องช่วยเดินที่พัฒนามานี้มีฟังก์ชันการทำงานหลากหลายเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องช่วยเดินแบบเดิม ซึ่งอาจทำให้ผู้สูงอายุต้องใช้เวลาในการทำความเข้าใจในการใช้งานเครื่องเล็กน้อย ส่วนความแข็งแรงของเครื่องได้คะแนนน้อยที่สุด เนื่องมาจากโครงสร้างเครื่องช่วยเดินที่ถูกพัฒนานี้ ถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบาและรับน้ำหนักได้ดี เมื่อนำอุปกรณ์ต่างๆ มาติดตั้งอาจทำให้เกิดการเสียสมดุลในการรับน้ำหนักเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม จากผลประเมินการใช้งานจริงจากอาสาสมัครทั้ง 5 คน ให้คะแนนประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องสูงสุด 23 คะแนน โดยที่เครื่องช่วยเดินนี้สามารถใช้งานได้ประมาณ 2 ชั่วโมง

50 นาที โดยคำนวณจากกระแสขณะใช้งานเครื่องขณะมีการเดิน ซึ่งวัดได้ประมาณ 1.8 A โดยใช้แบตเตอรี่แห้งชนิดชาร์จไฟได้ขนาด 12 V 5 Ah

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องช่วยเดินให้มีความสะดวกสบายและปลอดภัยต่อผู้ใช้งานมากขึ้น โดยติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ ซึ่งมีฟังก์ชันในการช่วยเดิน สามารถปรับความเร็วในการเดิน และทิศทางการเดินได้ง่าย มีฟังก์ชันตรวจจับการล้ม และแจ้งเตือนการล้มเพื่อขอความช่วยเหลือ และส่งพิกัดตำแหน่งของผู้ใช้งานไปยังแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือของผู้ดูแล จากการทดสอบการทำงานของเครื่องสามารถทำงานได้ครบทุกฟังก์ชันตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยได้ทดสอบการใช้งานจริงกับอาสาสมัครผู้สูงอายุ พบว่าผลการให้คะแนนความพึงพอใจอยู่ในเกณฑ์ดี 23 คะแนน หรือ 92% โดยประสิทธิภาพเด่นของเครื่อง คือ ความสะดวกสบายในการปรับความเร็วและทิศทาง ซึ่งทำให้ใช้งานง่าย ไม่จำเป็นต้องยกตัวเครื่องขณะเดิน ส่วนในเรื่องของความแข็งแรงของเครื่องอาจจะต้องมีการพัฒนาต่อ เพื่อให้เครื่องช่วยเดินมีประสิทธิภาพการทำงานและมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการอ่านค่าระยะทางโดยเซนเซอร์ตรวจนับ

ครั้งที่	ระยะทางจริง (m)	ระยะทางที่อ่านได้ (m)	ความผิดพลาด (m)
1	1.2	1.2	0
2	1.6	1.6	0
3	2.0	2.0	0
4	2.4	2.4	0
5	4	4	0
ค่าความผิดพลาดรวม 0%			

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการตรวจจับการล้มโดยไจโรสโคปเซนเซอร์

ครั้งที่	มุมการล้ม (องศา)	เสียง Buzzer	การแจ้งเตือน พร้อมส่งพิกัด
1	50	ไม่ดัง	ไม่มี
2	30	ไม่ดัง	ไม่มี
3	25	ดัง	มีการแจ้งเตือนพร้อมส่งพิกัด
4	15	ดัง	มีการแจ้งเตือนพร้อมส่งพิกัด
5	0	ดัง	มีการแจ้งเตือนพร้อมส่งพิกัด
ความถูกต้องการทำงานของระบบแจ้งเตือน 100 %			

ตารางที่ 3 สรุปผลประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจากอาสาสมัคร

หัวข้อ	คะแนนจากอาสาสมัครแต่ละคน (คะแนนเต็มหัวข้อละ 5 คะแนน)					รวม (25)
	1	2	3	4	5	
1	4	5	5	4	3	21
2	5	4	5	4	5	23
3	3	4	4	3	3	17
4	4	4	4	3	3	18
5	4	4	5	5	5	23

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Chotikunnan et al., "The design and construction of surrounding control system for the rehabilitative walker using mecanum wheel," in 2017 10th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), Hokkaido, Japan, 2017.

[2] Y. Tsen Pan, C. Cheng Shih, C. DeBuys and P. Hur, "Design of a Sensory Augmentation Walker with a Skin Stretch Feedback Handle," in 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), Nanjing, China, 2018, pp. 832-837.

[3] C. Nave and O. Postolache, "Smart Walker based IoT Physical Rehabilitation System," in 2018 International Symposium in Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI), Shanghai, China, 2018.

[4] B. Naets et al., "Smart Walker Design for Clinical Rehabilitation," in 2022 2nd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Meknes, Morocco, 2022.

[5] S. Shilaskar, S. Joshi, S. Surve and S. Chavanke, "Enhanced Mobility for Visually Impaired: A Smart Walker with Object Detection," in 2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, India, 2024.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องล้างไข่ไก่ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

Egg Washing Machine Controlled By Programmable Logic Controller

ชุติพล มหาวีระ[1*] ภานุมาศ แสนพวง[1] เจษฎา พรหมเกษ[1] กฤตยา สมสัย[1] และณัฐวุฒิ สมพงษ์[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
E-mail: apapol.ma@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอออกแบบและพัฒนาเครื่องล้างไข่ไก่สำหรับใช้ในครัวเรือน ทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยการป้อนไข่เข้าเครื่องและลำเลียงผ่านแปรงขัดพร้อมกับฉีดน้ำล้างในขณะที่แปรงทำความสะอาดไข่ แล้วลำเลียงต่อไปยังจุดพักไข่ที่มีการติดตั้งพัดลมฮีตเตอร์เพื่อเป่าให้แห้ง ให้ไข่ไก่ปราศจากความชื้น ซึ่งสามารถล้างไข่ได้ 20 ฟอง ต่อการล้างหนึ่งรอบการทำงานเครื่องล้างไข่ไก่นี้ใช้เวลาในการล้างและเป่าแห้งรวมโดยเฉลี่ย 6 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกับการล้างไข่ไก่ด้วยคนพบว่า เครื่องล้างไข่ไก่ควบคุมด้วย PLC เร็วกว่าประมาณ 50%

คำสำคัญ: การล้างไข่ไก่, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

Abstract

This article presents the design and development of a semi-automatic household egg washing machine controlled by a programmable logic controller. By feeding eggs into the machine and transporting them through the scrubbing brush while spraying water to wash them while cleaning the eggs, and then transporting them to the egg resting point where a heater fan is installed to blow dry them so that the eggs are free from moisture. It can wash 20 eggs per washing cycle. This egg washer takes an average of 6 minutes to wash and dry. When compared to washing eggs by humans, the PLC-controlled egg washer is 50% faster.

Keywords: Egg washing, programmable logic controller

1. บทนำ

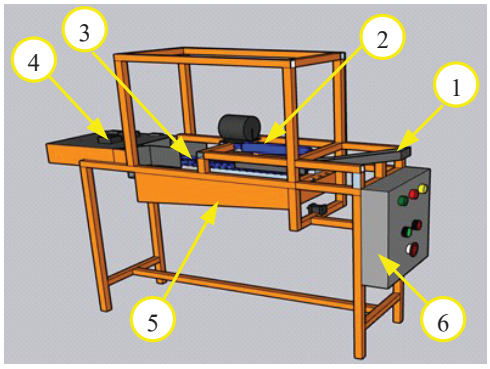
ในปัจจุบันการเลี้ยงไก่ไข่เริ่มในครัวเรือนมีมากขึ้น ตั้งแต่เลี้ยงเพื่อบริโภคไข่ไก่เองและเลี้ยงเพื่อออกจำหน่ายไข่ไก่สู่ท้องตลาด เนื่องจากความต้องการทางตลาดค่อนข้างสูง เพราะราคาที่ถูก รวมไปถึงประโยชน์ที่ได้รับของไข่ไก่และยังสามารถเก็บไว้ได้นานถึง 21 วันหลังแม่ไก่ออกไข่แต่หากนำไข่ไก่ไปเก็บไว้ในอุณหภูมิที่ต่ำพอให้อากาศมีความเย็นก็จะยืดอายุของไข่ได้ถึง 35 วัน จึงทำให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่เลือกซื้อไข่ไก่ติดไว้ในครัวเรือน เพื่อนำมาประกอบอาหารได้ง่าย และในการบรรจุสินค้าส่งออกตลาดต้องเป็นไข่ไก่ที่มีเปลือกที่สะอาด เพื่อให้ผู้บริโภคสนใจในไข่ไก่ ซึ่งไข่ไก่ที่ออกมาจากตัวแม่ไก่นั้นอาจจะมีสิ่งสกปรกติดมาด้วย เช่น เศษดิน หญ้า และอุจจาระของแม่ไก่ สิ่งเหล่านี้บ่งบอกว่าไข่ไก่มีการปนเปื้อนเชื้อโรคตามปกติแล้ว การแก้ปัญหาจะเป็นคนหรือพนักงานในฟาร์มที่จะทำความสะอาดโดยการใช้มือล้างทำความสะอาด หรือถ้าเป็นฟาร์มขนาดใหญ่ มีไข่ไก่จำนวนมากจะใช้เครื่องล้างขนาดใหญ่การ ซึ่งราคาค่อนข้างสูง กระบวนการล้าง มีทั้งแบบแห้งและแบบเปียกซึ่งฟาร์มไก่เลือกใช้แบบเปียกเนื่องจากไข่ไก่ที่มีจำนวนมาก ทำให้กระบวนการแบบแห้งทำความสะอาดได้ช้ากว่าแบบเปียก ซึ่งในกระบวนการแบบเปียกจะทำให้ไข่ไก่มีความชื้นและต้องเช็ดหรือเป่าแห้งก่อนส่งออก จึงคำนึงถึงเรื่องความชื้นหลังจากทำความสะอาดแบบเปียก

ด้วยวิธีการทำความสะอาดดังกล่าวเป็นวิธีการที่นิยมกันมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และต้นทุนต่ำ ข้อเสียของวิธีนี้ คือจะใช้เวลานานทำให้คนที่ล้างเป็นเวลานานๆ เกิดอาการปวดเมื่อยตามร่างกายและที่สำคัญเวลาไข่ไก่โดนน้ำอาจทำให้เกิดความชื้นจนเกิดเป็นเชื้อราได้

จากปัญหาดังกล่าวผู้จัดทำโครงการได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องล้างไข่ไก่ โดยการนำ PLC มาควบคุมเครื่อง เพื่อประหยัดเวลาในการใช้แรงงานคนในการล้างและเพิ่มอุปกรณ์ในการเป่าแห้งเพื่อทำให้ไข่ไก่ไม่เกิดเชื้อราจากความชื้นได้

2. การออกแบบและสร้าง

2.1 การออกแบบโครงสร้าง



รูปที่ 1 โครงสร้างเครื่องล้างไข่

โครงสร้างเครื่องล้างไข่ จากรูปที่ 1 มีส่วนประกอบดังนี้
หมายเลข 1 รางป้อนไข่เข้าเครื่อง
หมายเลข 2 ชุดแปรงขัดไข่
หมายเลข 3 ชุดลำเลียงไข่
หมายเลข 4 จุดพักไข่เพื่อเป่าลมร้อน
หมายเลข 5 ถาดรองน้ำ
หมายเลข 6 ตู้ควบคุม



รูปที่ 2 โครงสร้างจริงเครื่องล้างไข่ไก่

เครื่องล้างไข่ไก่ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักสำคัญดังรูปที่ 3



(ก) (ข) (ค)



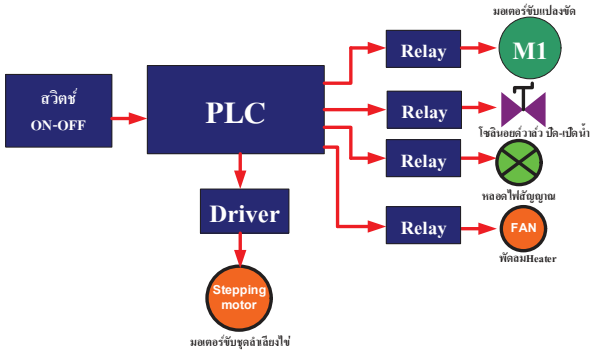
(ง)

รูปที่ 3 ส่วนประกอบเครื่องล้างไข่ไก่

จากรูปที่ 3 เป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องล้างไข่ ซึ่งประกอบด้วย (ก) รางป้อนไข่เข้าเครื่อง (ข) ชุดแปรงขัดไข่และชุดลำเลียงไข่มายังจุดเป่าแห้ง (ค)หัวฉีดน้ำเพื่อฉีดนำเข้าไปขณะแปรงกำลังขัดไข่ และ (ง) จุดเป่าลมร้อนเพื่อให้ไข่แห้ง

2.2 การออกแบบระบบควบคุม

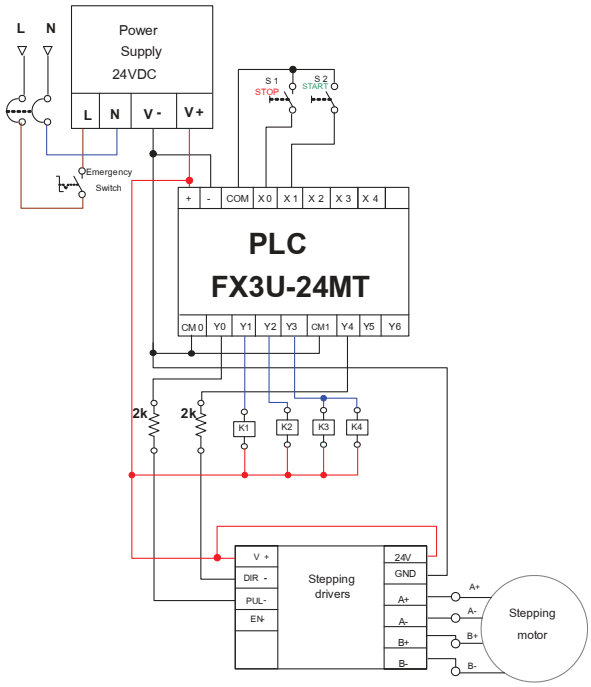
ในการควบคุมการทำงานใช้โปรแกรมเมเบิลคอนลอจิกโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งลักษณะการควบคุมเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยมีผังวงจรดังรูปที่ 1



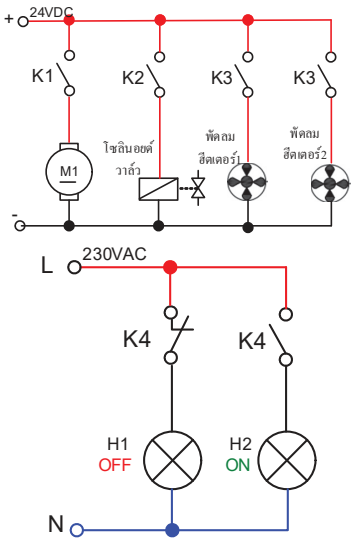
รูปที่ 4 ผังวงจรควบคุม

จากรูปที่ 4 อุปกรณ์ทางด้านอินพุทจะสั่งงานด้วยสวิตช์ปุ่มกดเพื่อควบคุมอุปกรณ์ทางด้านเอาท์พุท ได้แก่ 1. มอเตอร์ M1 สำหรับขับชุดแปรงขัด ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลท์ 250 วัตต์ ความเร็วรอบพิกัดที่ 2750 รอบต่อนาที 2. โซลินอยด์วาล์วสำหรับ ปิด-เปิด น้ำฉีดล้างไข่ ใช้โซลินอยด์วาล์วไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลท์ 3.หลอดไฟสัญญาณเพื่อแสดงสถานการณ์ทำงาน 4. พัดลมฮีตเตอร์สำหรับเป่าให้ไข่แห้ง ใช้ขนาด200 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลท์ อัตราการไหลของอากาศ 2.3m^3/s จำนวน 2 ตัว และ 5. สเต็ปปิ้งมอเตอร์สำหรับขับชุดลำเลียงไข่ ใช้ Nema23 23HS5628 พิกัด 2.8 แอมแปร์ และใช้วงจรขับรุ่น TB6600 แรงบิดพิกัด 12600G.cm

จากรูปที่ 4 เขียนเป็นวงจรควบคุมได้ดังรูปที่ 5 โดยใช้บอร์ด PLC รุ่น FX3U-24MT กำหนดสวิตช์ S1 เป็นสวิตช์หยุดการทำงาน (STOP) และ S2 เป็นสวิตช์เริ่มการทำงาน(START) ส่วนทางด้านเอาท์พุทกำหนด Y0 และ Y4 เพื่อควบคุม stepping motor โดย Y0 ควบคุมพัลส์ และ Y4 ควบคุมทิศทาง กำหนด Y1 สำหรับควบคุมรีเลย์ K1 กำหนด Y2 สำหรับควบคุม K2 และกำหนด Y3 สำหรับควบคุมการทำงานรีเลย์ K3 และ K4

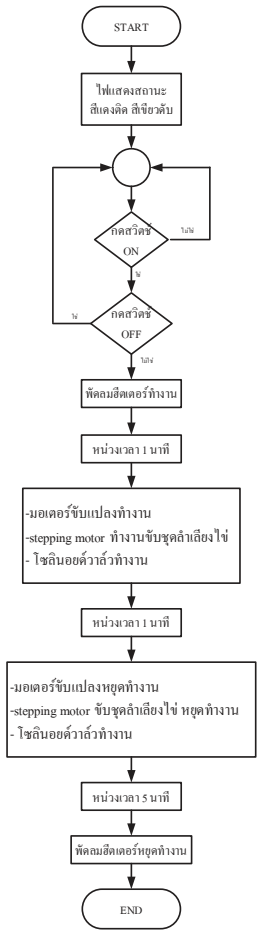


รูปที่ 5 วงจรควบคุม



รูปที่ 6 วงจรกำลัง

จากรูปที่ 6 เป็นวงจรกำลัง โดยรีเลย์ K1 ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ M1 รีเลย์ K2 ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว และรีเลย์ K3 ควบคุมการทำงานของพัดลมฮีตเตอร์ทั้ง 2 ตัว และรีเลย์ K4 ควบคุมการทำงานของหลอดไฟสัญญาณ H1 แสดงสถานะหยุดการทำงาน(OFF) และ H2แสดงสถานะกำลังทำงาน (ON)



รูปที่ 7 Flow Chart การทำงานของเครื่องล้างไข่

จากรูปที่ 7 เมื่อกดสวิตช์เริ่มการทำงานพัดลมฮีตเตอร์จะทำงานก่อนเป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นมอเตอร์ขับแปรงขัด มอเตอร์ขับชุดลำเลียงไข่ และโซลินอยด์วาล์วจะทำงานปล่อยน้ำออกหัวฉีด แล้วป้อนไข่เข้าเครื่องเพื่อล้างทำความสะอาด ไข่จะถูกลำเลียงผ่านแปรงขัดพร้อมกับน้ำล้างจากหัวฉีดน้ำ และเลียงต่อไปยังจุดพักไข่ เพื่อให้พัดลมฮีตเตอร์เป่าให้แห้ง โดยใช้เวลาในการเป่าแห้ง 5 นาที

3.ผลการทดลอง

การทดลองล้างไข่โดยใช้แรงงานคน 1 คน สำหรับล้างไข่จำนวน 20 ฟอง ซึ่งเท่ากับจำนวนไข่ที่ใช้เครื่องล้าง 1 รอบการทำงาน โดยทำการทดลองในเบื้องต้นจำนวน 10 ครั้ง ได้ผลตามตารางที่ 1 ซึ่งในการล้างไข่ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดเฉลี่ยได้ที่ 487.65 วัตต์

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบเวลาการล้างคนด้วยแรงงานคนกับใช้เครื่องล้างไข่

ครั้งที่	เวลาที่ใช้(นาที)	
	ใช้แรงงานคน	ใช้เครื่องล้าง
1	14.30	5.56
2	14.37	5.58
3	14.15	6.01
4	14.24	5.58
5	14.45	5.55
6	14.50	6.06
7	14.48	6
8	14.52	6.06
9	14.58	5.55
10	15.05	5.56

จากการางที่ 1 ทดลองใช้แรงงานคนในการทำความสะอาดจำนวน 20 ฟอง โดยการล้างด้วยน้ำเปล่าขัดด้วยแปรง และเช็ดให้แห้งด้วยผ้าสะอาด ใช้เวลาเฉลี่ย 14.46 นาที เครื่องล้างไข่ที่สร้างขึ้นล้างไข่จำนวน 20 ฟอง โดยใช้เวลาเฉลี่ย 6.05 นาที

ผลการทดลองในส่วนของความสะอาด ใช้วิธีการสังเกตด้วยตาเปล่า และแบ่งระดับคะแนนความสะอาดเป็น 5 ระดับดังนี้

- ระดับ 1 แย่มาก มีคราบสิ่งสกปรกหรือเศษสิ่งต่างๆ ที่ติดอยู่เปลือกไข่อย่างชัดเจน
- ระดับ 2 แย่ มีคราบสิ่งสกปรกหรือเศษสิ่งต่างๆ ที่ยังเหลืออยู่เปลือกไข่ แต่มองเห็นไม่ชัดเจน
- ระดับ 3 ปานกลาง มีคราบสิ่งสกปรกเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่มองเห็น
- ระดับ 4 ดี ไม่มีคราบสิ่งสกปรกมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
- ระดับ 5 ดีมาก ไม่มีคราบสิ่งสกปรกหรือเศษสิ่งใดๆ เหลืออยู่เปลือกไข่เลย

โดยผลการทดลองการใช้เครื่องล้างไข่ที่สร้างนี้มีระดับคะแนนความสะอาดที่ 5 คะแนน คือดีมาก

4. สรุป

จากการทดลองพบว่า อุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบและโปรแกรมที่พัฒนาสามารถนำไปใช้งานได้จริง เปรียบเทียบระหว่างการล้างไข่ไก่โดยใช้คนและเครื่องล้างไข่ไก่ควบคุมด้วย PLC การล้างไข่ไก่ด้วยคนโดยใช้ ฟองน้ำและน้ำสะอาดพร้อมเช็ดแห้งด้วยผ้า ใช้เวลาเฉลี่ย 13.38นาที ต่อการล้างไข่ 20 ฟอง การล้างไข่ไก่ด้วยคนโดยใช้ แปรงและน้ำสะอาดพร้อมเช็ดแห้งด้วยผ้า ใช้เวลาเฉลี่ย 14.46 นาที ต่อการล้างไข่ 20 ฟอง ทั้งสองวิธีที่ใช้คนล้างให้คะแนนความสะอาดเฉลี่ยอยู่ที่ 100% ในทางตรงกันข้าม เครื่องล้างไข่ไก่ที่ควบคุมด้วยระบบ PLC สามารถล้างและเป่าแห้งไข่ไก่ 20 ฟองภายในเวลาเพียง 6 นาที และเมื่อเปรียบเทียบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง สามารถล้างไข่ไก่ได้ถึง 200 ฟองโดยมีคะแนนความสะอาดเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 5 (ดีมาก) และมีข้อได้เปรียบด้านความรวดเร็วอย่างชัดเจน ลดเวลาในการทำงาน ซึ่งทำให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในกระบวนการล้างไข่ไก่ในปริมาณมากอย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ 1.นายศิวกร แก้วสะแสน 2. กฤษฎิณัฏฐ์ ไชยปัญหา และ 3.นายสุวิชา คำปัญญา นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่ออกแบบและสร้างเครื่องกายภาพบำบัด ตลอดจนทดลองและบันทึกผลจนการดำเนินงานจนแล้วเสร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] อภิชาติ ศรีสุก,ฉันทิชย์ ฉัตรคชราษฎร์,และชาญวิทย์ วรรณกุล. (2552).*เครื่องล้างไข่สำหรับชุมชนขนาดเล็ก* [ปริญญาพนธ์ปริญญาตรี]. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[2] ศิริวรรณ อดุลย์สุข, สุเจตน์ ชื่นชม, อาสูตร สงวนเกียรติ และ ศศิธร นาคทอง,(2563) การเพิ่มมูลค่าของไข่เปลือกสกปรกด้วยเครื่องล้างไข่อัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตรและการจัดการ, 3(1). 5-12

[3] อาทิตย์ พวงสมบัติ , แก้วกานต์ พวงสมบัติ. (2562). การศึกษาปัจจัยที่เหมาสมของเครื่องล้างไข่เค็มพอกดินแบบแปรงขัดทรงกระบอก.วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.ปีที่ 25 ฉบับที่1, 38-45

[4] FoodNetworkSolution.(2554).*Egg/ไข่* https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1146/.

7. ประวัติผู้เขียนบทความ



ชุติพล มหาวีระ อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจ ระบบไฟฟ้ากำลัง



ภานุมาศ แสนพวง อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจ เกี่ยวกับการควบคุมด้วยโปรแกรม



เจษฎา พรหมเกษ อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจ พลังงานทดแทน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบและพัฒนาตู้เพาะเลี้ยงเห็ดที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

Design and Development of a Mushroom Cultivation Chamber Controlled by a Microcontroller

ชุติพล มหาวีระ[1*] นครินทร์ ศรีปัญญา[1] กอบกุล นงนุช[2] และ พิมพ์นิภา รัตนจันทร์[3]
[1*]สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
[2]สาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
[3]สาขาการตลาด คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา
E-mail: konggola.ma@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาตู้เพาะเลี้ยงเห็ดที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมในการเพาะเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตู้เพาะเลี้ยงมีขนาดกะทัดรัด แบ่งออกเป็นส่วนควบคุมและส่วนเลี้ยงเห็ด รองรับก้อนเชื้อได้ 20 ก้อน ใช้ถาดแขวนแบบโปร่งเพื่อให้อากาศไหลเวียนสะดวก ภายในตู้มีระบบทำความเย็นที่ลดอุณหภูมิได้ถึง 18°C ภายใน 15 นาที และระบบทำความร้อนที่เพิ่มอุณหภูมิได้ถึง 40°C ใน 10 นาที ใช้แผ่นอะคริลิกโปร่งใสเพื่อให้เห็ดได้รับแสงในช่วงกลางวัน ระบบควบคุมอัตโนมัติประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และแสงได้อย่างแม่นยำ ผลการทดลองเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานในระบบที่ตั้งค่าอุณหภูมิ 25°C และความชื้น 96% พบว่าสามารถเก็บดอกเห็ดได้รวม 18 กิโลกรัมในระยะเวลา 4 เดือน ทำรายได้รวม 1,800 บาท หักค่าใช้จ่าย 504 บาท คงเหลือกำไรสุทธิ 1,296 บาท แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของระบบในการเพาะเลี้ยงเห็ดอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ตู้เพาะเลี้ยงเห็ด, ระบบควบคุมอุณหภูมิ, ระบบควบคุมความชื้น, ไมโครคอนโทรลเลอร์, เห็ดนางฟ้าภูฐาน

Abstract

This research presents the design and development of a mushroom cultivation chamber controlled by a microcontroller. The incubator is designed to support various mushroom species grown in substrate blocks. It features a compact rectangular structure divided into two parts: a lower control compartment and an upper growing chamber capable of holding 20 substrate blocks using a ventilated hanging tray. The temperature control system can lower the temperature to 18°C within 15 minutes and raise it to 40°C within 10 minutes. The transparent acrylic wall allows natural light during the day. The automatic control system integrates both hardware and software to regulate temperature, humidity, and light accurately. In an experimental trial using 25°C temperature and 96% humidity to grow Bhutan oyster mushroom (*Pleurotus sajor-caju*), a total yield of 18 kg was harvested over four months, generating 1,800 THB in revenue. After deducting costs of 504 THB, a net profit of 1,296 THB was achieved. The results confirm the effectiveness and economic viability of the system for sustainable mushroom cultivation.

Keywords: Mushroom cultivation chamber, Temperature control system, Humidity control system, Microcontroller, Bhutan oyster mushroom

1. บทนำ

การเพาะเห็ดเป็นหนึ่งในกิจกรรมทางการเกษตรที่มีความสำคัญทั้งในด้านเศรษฐกิจและโภชนาการ โดยเห็ดถือเป็นแหล่งโปรตีนที่ดีและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง ด้วยความต้องการของตลาดที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเพาะเห็ดกลายเป็นช่องทางสร้างรายได้ที่น่าสนใจสำหรับเกษตรกร อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมทั้งอุณหภูมิ

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การออกแบบและพัฒนาตู้เพาะเลี้ยงเห็ดที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ช่วยให้สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในตู้เพาะเลี้ยงได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้การเพาะเห็ดมีคุณภาพและผลผลิตที่สูงขึ้น [2],[4]. ระบบควบคุมอัตโนมัติยังช่วยลดความเป็นไปได้ของการเกิดโรคในเชื้อเห็ด ซึ่งเป็นปัญหาที่เกษตรกรมักต้องเผชิญในการเพาะเลี้ยงเห็ด [5],[7].

งานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุม

สภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะเห็ด เช่น การพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถสั่งการและตรวจสอบสภาพอุณหภูมิและความชื้นในระยะไกล โดยมีการใช้เซนเซอร์อ่านค่าต่าง ๆ และส่งข้อมูลไปยังผู้ควบคุมระบบ [6],[8]. นอกจากนี้ การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ยังช่วยให้เกษตรกรสามารถควบคุมตู้เพาะเลี้ยงเห็ดจากที่ไกลได้ ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดการฟาร์มอย่างมีประสิทธิภาพ [5].

การศึกษาในชุมชนบ้านวังผาได้สร้างตู้เพาะเห็ดอัตโนมัติที่เน้นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นซึ่งได้รับการตอบรับที่ดีจากเกษตรกร โดยมีการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบและการสร้างรายได้ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการพัฒนานี้ [2],[8],[9].

จากข้อมูลดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการออกแบบและพัฒนาตู้เพาะเลี้ยงเห็ดที่ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่เพียงเพิ่มประสิทธิภาพในการเพาะเห็ด แต่ยังส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีในการเกษตร ซึ่งเป็นแนวทางที่ควรสนับสนุนเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต [1],[2],[5].

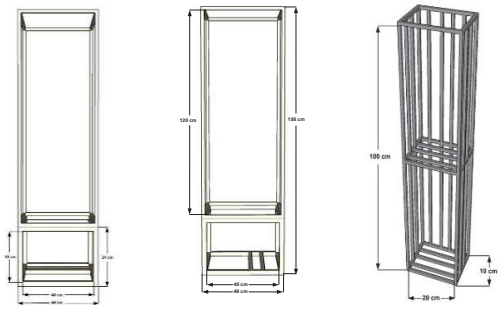
2. การออกแบบ

2.1 การออกแบบโครงสร้างตู้เพาะเห็ด

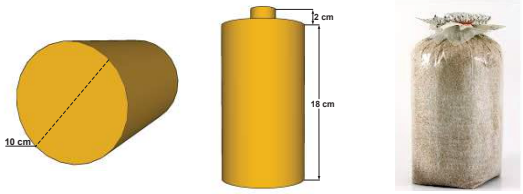
การออกแบบโครงสร้างสำหรับตู้เพาะเห็ด จะสร้างในลักษณะสี่เหลี่ยมเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ ตู้จะแบ่งเป็นสองส่วน ด้านล่างคือส่วนอุปกรณ์และกล่องควบคุม ซึ่งจะมีขนาด ขนาด 49 × 44 × 34 เซนติเมตร(cm.) และส่วนบน ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับเพาะเลี้ยงเห็ด มีขนาด 49 × 44 × 120 เซนติเมตร ดังรูปที่ 1

2.2 การออกแบบถาดวางก้อนเชื้อเห็ด

การออกแบบสำหรับถาดวางก้อนเชื้อเห็ด ออกแบบให้มีลักษณะแบบแขวน ขนาด 20 × 10 × 100 cm. เพื่อให้อากาศไหลผ่านรอบก้อนเห็ด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างตู้เพาะเห็ดและถาดวางก้อนเชื้อเห็ด



รูปที่ 2 ก้อนเชื้อเห็ด

ลักษณะของก้อนเชื้อเห็ดจะเป็นลักษณะทรงกลมซึ่งมีขนาดดังรูปที่ 2 ก้อนเชื้อเห็ด 1 ก้อน หนักประมาณ 0.9 กิโลกรัม และน้ำหนักของก้อนเชื้อเห็ดเมื่อมีการรดน้ำ 1.1 กิโลกรัม

สามารถคำนวณได้จากพื้นที่ของก้อนเชื้อเห็ด

จากสูตรของการหาพื้นที่สี่เหลี่ยม = กว้าง × ยาว

เมื่อ ความกว้าง 20 cm. และ ความยาว 100 cm.

จะได้ พื้นที่ของถาด = 20 cm. × 100 cm. = 2,000 cm.

จากสูตรของการหาพื้นที่วงกลม = πr^2

จะได้ พื้นที่วงกลม = $\pi(5)^2$ = 78.54 cm.^{2}

เมื่อ พื้นที่ก้อนเห็ด 20 ก้อน = 78.54×20 = 1,570.8 cm.^{2}

$= 2{,}000 - 1{,}570.8 = 429.2$ cm.^{2}

ดังนั้น เมื่อนำก้องเห็ดไปวางในถาดจะเหลือพื้นที่ว่างเพื่อไม่ให้ชิดกันเกินไปจะได้ดังนี้ลักษณะการวางก้อนเชื้อเห็ดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการวางก้อนเชื้อเห็ดและตู้โปรงแสง

2.3 ระบบควบคุมอัตโนมัติ

การออกแบบส่วนที่ต้องควบคุมอัตโนมัติจะมีอยู่ 3 ระบบ ระบบควบคุมความชื้น ระบบทำความเย็นและระบบทำความร้อน จะมีวิธีการคำนวณตามขั้นตอนดังนี้

การคำนวณหาระบบทำความเย็นการลดอุณหภูมิให้กับตู้เพาะเห็ดนั้น ต้องใช้เครื่องทำความเย็น ในการลดอุณหภูมิ เพื่อเป็นการทำให้อุณหภูมิเหมาะสมจึงมีการเลือกใช้เครื่องทำความเย็นให้เหมาะสม

สูตรการหาปริมาณความร้อนก้อนเชื้อเห็ด

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \ (Btu) \qquad (1)$$

เมื่อ Q คือ ภาระความร้อนจากก้อนเชื้อเห็ด ($Btu/24h$)

m คือ มวลของก้อนเห็ดที่มีการรดน้ำ (48 lb.)

c คือ ความร้อนจำเพาะของก้อนเห็ด (1.02 Btu/kg°F)

Δ_t คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่ต้องการ (°F)

แทนค่า $m = 22\ kg/24h$

$c = 1.02\ Btu/kg.°F$

$\Delta T = (89.6°F - 59°F) = 30.6°F$

$Q = 48\ lb/24\ h \times 1.02\ Btu/kg.°F \times 30.6°F$

$Q = \ 1{,}498.18\ \ Btu/24h$

ต้องการลดอุณหภูมิจาก 89.6°F(32°C) ลดอุณหภูมิจนถึง 59°F(18°C) ในเวลา 15 นาที

ภาระความร้อนจากก้อนเห็ด $= 1{,}498.18 \frac{Btu}{0.25\ h}$

$= 5{,}992.72\ \ Btu/h$

$\approx 6{,}000\ \ Btu/h$

∴ จะต้องใช้เครื่องทำความเย็นขนาด 6,000 *Btu/h*

การทำความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิต้องใช้เครื่องทำความร้อน โดยการเลือกใช้จำนวนแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกที่เหมาะสมเพื่อที่จะมีประสิทธิภาพในการทำคาวามร้อนได้

การคำนวณแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \qquad (2)$$

เมื่อ Q คือ พลังงานความร้อน (Joule)

m คือ มวลของก้อนเห็ดที่มีการรดน้ำ (kg.)

c คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ (1 kJ / kg. Kelvin)

Δ_t คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง (Kelvin)

แทนค่าในสูตร $Q = mc\Delta t$

Q = 22 kg x 1 kJ / kg. Kelvin x (313.15 Kelvin - 293.15 Kelvin)

Q = 440 kJ

แปลงเป็น Power $P = Q/t$

โดย t =10 นาที เพื่อที่จะทำอุณหภูมิถึง 40 (

P = 440,000 J/600 s.

P = 733.33 W

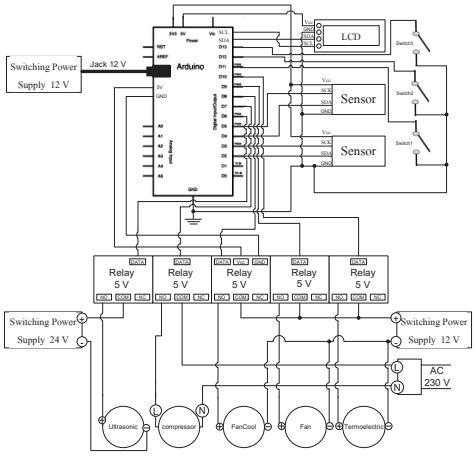
แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก 1 แผ่น 120 W

733.33 W/120 W = 6.11 ≈ 7 แผ่น

ระบบควบคุมความชื้นภายในตู้ใช้เครื่องอัลตราโซนิกทำน้ำให้เป็นไอน้ำแล้วใช้พัดลมเป่าเพื่อเพิ่มความชื้นในตู้

2.4 การออกแบบให้แสงสว่าง

เนื่องจากเห็ดต้องการแสงจะไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างดอกตู้ออกแบบให้มีลักษณะโปร่งใส ผนังตู้ปิดด้วยแผ่นอะคริลิค หนา 5 mm. ทำให้เห็ดได้รับแสงในตอนกลางวันและพักตอนกลางคืน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 single line diagram

2.5 วงจรควบคุม

จากรูปที่ 4 แสดงการต่อวงจรการทำงานเพื่อให้ Arduino รับค่าจากเซ็นเซอร์ แล้วสั่งการทำงานของระบบทำความชื้น ระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น และพัดลมดูดอากาศ

2.6 ผลการทดลอง

ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานจากการทดลองควบคุมระบบอุณหภูมิ พบว่าสามารถลดอุณหภูมิจาก 26°C เหลือ 18°C ได้ภายในเวลาเฉลี่ย 15 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40°C ได้ภายใน 10 นาที โดยในการเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานจำนวน 20 ก้อน ได้ตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 96% หลังจากเปิดดอกเห็ด 7 วัน สามารถเก็บดอกได้รอบละ 1.5 กิโลกรัม รวม 3 รอบใน 1 เดือน คิดเป็น 4.5 กิโลกรัม หากจำหน่ายกิโลกรัมละ 100 บาท จะมีรายได้ 450 บาท ตลอดอายุการเก็บเกี่ยวเฉลี่ย 4 เดือน จะได้ผลผลิตรวม 18 กิโลกรัม คิดเป็นรายได้ 1,800 บาท หักค่าใช้จ่ายรวม 504 บาท ได้แก่ ค่าไฟฟ้า 200 บาท ค่าน้ำ 4 บาท และค่าก้อนเชื้อเห็ด 300 บาท จะมีกำไรสุทธิ 1,296 บาท ต่อเห็ด 20 ก้อน

3. สรุป

การทดลองควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการเลี้ยงเห็ดนางฟ้าภูฐานด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ พบว่าสามารถลดอุณหภูมิจาก 26°C เหลือ 18°C ภายใน 15 นาที และเพิ่มเป็น 40°C ได้ภายใน 10 นาที โดยตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิที่ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 96% ในการเลี้ยงเห็ดจำนวน 20 ก้อน ภายหลังเปิดดอกเห็ด 7 วัน สามารถเก็บเกี่ยวได้รอบละ 1.5 กิโลกรัม รวม 3 รอบใน 1 เดือน คิดเป็น 4.5 กิโลกรัม หากเลี้ยงจนครบอายุการเก็บเกี่ยว 4 เดือน จะได้ผลผลิตรวม 18 กิโลกรัม สร้างรายได้ 1,800 บาท หักค่าใช้จ่ายรวม 504 บาท จะมีกำไรสุทธิ 1,296 บาท การออกแบบตู้เพาะเลี้ยงประกอบด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น แสง และถาดวางก้อนเชื้อ พร้อมทั้งการคำนวณภาระความร้อนและความเย็นอย่างเหมาะสม ส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงเห็ด.

เอกสารอ้างอิง

[1] เปรมกมล สุนหนองนก และ ณัฐวุฒิ มาลีลัย. (2562). การออกแบบระบบโรงเรือนเพาะเห็ดนางรมอัจฉริยะด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อาดุยโน่. *การประชุมวิชาการระดับชาติเครือข่ายวิจัยสถาบันอุดมศึกษาทั่วประเทศ ครั้งที่ 13* (น.1812-1820). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[2] วัชระ สุขแสวง, สุชาติ คุมนิล และคณะ. (2565). การพัฒนาโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยการผสมผสานเทคโนโลยี. *วารสารมหาจุฬานาครทรรศน์*, ปีที่ 9 ฉบับที่ 11, น.181-195.

[3] นัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์, มามีน นิลอ่อน และคณะ. (2565). การพัฒนาโรงเพาะเห็ดควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์. *การประชุมสัมมนาวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติเครือข่ายบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ (GNRU) ครั้งที่ 22* (น.19-30). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

[4] วีรศักดิ์ ฟองเงิน, สุรพงษ์ เพ็ชร์หาญ และคณะ. (2561). *การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอทีควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า*. วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม. ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, น.172-182.

[5] อดิสรณ์ ปรีชา, ศุภัทชัย รุ่งเรือง และคณะ. (2564). *โรงเพาะเห็ดระบบอัตโนมัติชุมชนบ้านวังผา ตำบล แม่จะเรา อำเภอ แม่ระมาด จังหวัด ตาก*. การประชุมวิชาการระดับชาติสำหรับนักศึกษา ครั้งที่ 1 (น.1034-1041). มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.

[6] อรพรรณ แซ่ตั้ง, นิสา พุทธนาวงศ์ และคณะ. (2560). *การออกแบบโรงเรือนสำหรับควบคุมอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อส่งเสริมการเพาะเลี้ยงเห็ดแครง*. วารสารการอาชีวะและเทคนิคศึกษา. ปีที่ 7 ฉบับที่ 13. น.87-97.

[7] โยธิน จิ๋นเนียม, สุดารัตน์ สุขสวัสดิ์ และคณะ. (2567). *การพัฒนาระบบอินเตอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IOT) เพื่อการศึกษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเห็ดหูหนู*. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16. (น.599-608). มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

[8] ธนพร พะยอมใหม่ และ สมสิน วางขุนทด. (2566). *การพัฒนาโรงเพาะเห็ดพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและมูลค่าของเห็ดด้วยการควบคุมผ่านสมาร์ทโฟนสำหรับวิสาหกิจชุมชนผู้เพาะเห็ด*. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 4 ฉบับที่ 2. น.59-73.

[9] ชุติพล มหาวีระ, อรอุมา ดอนบำรุง และ คณะ. (2564). *ตู้เพาะเห็ดนางฟ้าภูฐานอัตโนมัติควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์*. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 5 และการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 2. (น.561-568). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์.



ชุติพล มหาวีระ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ทำงานที่คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจเกี่ยวระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบพลังงานทดแทน นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์



นครินทร์ ศรีปัญญา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ทำงานที่คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจเกี่ยว ระบบปัญญาประดิษฐ์ นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์



กอบกุล นงนุช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิทยาศาสตร์ ตำแหน่งวิชาการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทำงานที่คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตสกลนคร งานวิจัยที่สนใจเกี่ยว การประเมินคุณภาพสิ่งแวดล้อม งานนวัตกรรม



พิมพ์นิภา รัตนจันทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาการตลาด ตำแหน่งวิชาการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทำงานที่คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลางนครราชสีมา งานวิจัยที่สนใจเกี่ยว การตลาดออนไลน์ กลยุทธ์ทางการตลาด

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้น

Short-tail Electric Boat Propulsion Drive Set

คณโฑ ปานทองคำ อเนก ไทยกุล ณัฐพร ความสุข และ ธนโชติ กัลยาณปัทม์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย **E-mail:** konto.p@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นดัดแปลงติดท้ายเรือ ต้นกำลังเป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปลงถ่าน 24 V 500 W ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเธียมฟอสเฟต 24 V 22 Ah ที่ออกแบบให้อยู่ในกล่องเดียวกันกับชุดควบคุมความเร็ว เพื่อให้ถอดเก็บหรือยกไปชาร์จได้ง่าย ผลการทดลองใช้งานกับเรือไฟเบอร์กลาส ขนาด 8 ฟุต บรรทุกน้ำหนัก 75 กิโลกรัม ได้ความเร็วเฉลี่ย 6.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ต่อเนื่องได้นาน 45 นาทีต่อรอบชาร์จ ทำความเร็วสูงสุด 6.45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถนำไปใช้ทดแทนเครื่องยนต์เรือขนาดเล็กได้ค่อนข้างดี โดยเฉพาะในแง่ของการเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เรือไฟฟ้าหางสั้น, ระบบขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าดัดแปลง

Abstract

This research presents the design of a modified short-tail electric boat propulsion system. The prime mover is a 24 V, 500 W brushless DC motor. The system is powered by a 24 V, 22 Ah LFP battery, which is housed in the same enclosure as the speed controller to facilitate easy removal. Experimental results obtained using an 8-foot fiberglass boat, carrying a load of 75 kg, demonstrate an average speed of 6.4 km/h, maintained continuously for 45 min/charge. The maximum speed was 6.45 km/h. This system can serve as an effective replacement for small boat engines, particularly due to its environmental benefits.

Keywords: Short-tail electric boat, Modified electric boat propulsion

1. บทนำ

เรือไฟเบอร์กลาสและเรือไม้ขนาดเล็ก เป็นพาหนะที่นิยมใช้งานของเกษตรกรและชาวบ้านที่อาศัยริมน้ำ มักใช้ในการเดินทางและประกอบอาชีพ เช่น ใช้เป็นเรือให้อาหารในบ่อปลา เรือวางเบ็ดตกปลา เรือวางเครื่องมือจับปูและสัตว์น้ำริมฝั่ง และอื่น ๆ โดยส่วนใหญ่ใช้การขับเคลื่อนด้วยพายมือหรือใช้ใบจักรขับด้วยเครื่องยนต์ มีทั้งชนิดหางยาวและหางสั้น หากเป็นแบบหางยาวมักติดตั้งกับยึดเรือแบบถาวร ระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ แม้จะมีข้อดีด้านกำลังและความเร็ว แต่มีเสียงดังรบกวนมาก [1] และการใช้พลังงานจากน้ำมันก็มีการปล่อยก๊าซที่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยการปรับเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ มาเป็นการขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ นอกจากจะช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้แล้ว ยังช่วยลดมลพิษทางเสียงลงได้เป็นอย่างดี สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ SDG 7 ที่มุ่งหมายการพัฒนาพลังงานสะอาด ให้ทุกคนสามารถเข้าถึงได้ [2]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นดัดแปลงติดท้ายเรือ เพื่อใช้ทดแทนเครื่องยนต์แบบเดิมสำหรับเรือขนาดเล็กที่ใช้ในงานเกษตรกรรม บริการท่องเที่ยว และใช้เป็นพาหนะตามวิถีชีวิตชุมชนชายน้ำ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

2. แนวคิดและเป้าหมาย

งานวิจัยนี้ มีเป้าหมายเพื่อศึกษาระบบขับเคลื่อนเรือไฟเบอร์กลาส ขนาด 8 – 10 ฟุต ที่นิยมใช้งานทั่วไปในหมู่เกษตรกรและชาวบ้านชุมชนริมน้ำ จากเดิมที่ใช้ไม้พายหรือเครื่องยนต์ติดท้าย ปรับเปลี่ยนเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่าน ร่วมกับชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์และแบตเตอรี่แบบลิเธียมฟอสเฟต โดยดัดแปลงติดตั้งมอเตอร์ให้ขับชุดใบพัดติดท้ายเรือแบบหางสั้น ลักษณะเดียวกับเครื่องยนต์แบบ Outboard มีมาตรบอกความเร็วรอบมอเตอร์ แรงดันกระแส และระดับแบตเตอรี่คงเหลือ พร้อมชุดควบคุมและแบตเตอรี่ที่ติดตั้งในกล่องกันน้ำ สามารถถอดประกอบและนำไปชาร์จประจุไฟฟ้าได้ง่าย เพื่อให้ชาวบ้านที่สนใจ สามารถนำไปใช้ทดแทนเครื่องยนต์แบบเดิม ที่มีมลพิษทางเสียง และไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

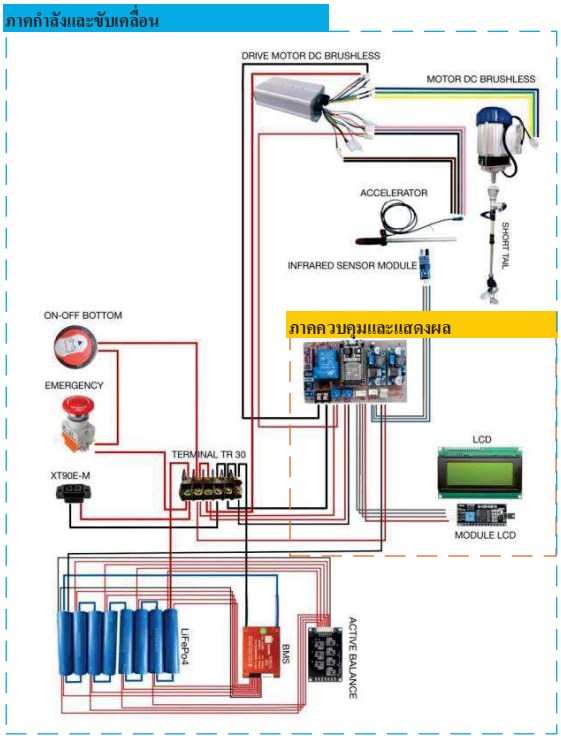
2.1 การออกแบบวงจรและหลักการทำงาน

จากความต้องการชิ้นงานที่มีราคาถูก ใช้เทคโนโลยีไม่สูงมาก สร้างและประกอบได้ง่าย จึงได้ออกแบบวงจรแบ่งออกเป็น 2 ภาคหลัก โดยมีภาพรวมของวงจร ดังรูปที่ 1 และมีรายละเอียดของภาคต่าง ๆ ดังนี้

ภาคควบคุมและแสดงผล ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับจอแสดงผล LCD ทำหน้าที่รับค่าจากเซ็นเซอร์วัดกระแส แรงดันแบตเตอรี่ และเซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบมอเตอร์ มาประมวลผล ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 5 ส่วน ได้แก่

1) เซ็นเซอร์วัดกระแส (Current sensor) รุ่น ACS712-30A สำหรับวัดกระแสในช่วง 0 - 30 A ให้เอาต์พุตเป็นแรงดัน 66 mV/A ส่งไปประมวลผลที่ ESP32 และแสดงค่ากระแสขณะใช้งานที่จอ LCD

2) เซ็นเซอร์วัดแรงดัน ใช้วงจรแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทานสองตัว (Voltage divider) ร่วมกับโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ADS1115 ขนาด 16 บิต ทำหน้าที่วัดแรงดันแบตเตอรี่แล้วแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ส่งไปประมวลผลที่ ESP32 และแสดงค่าที่จอ LCD



รูปที่ 1 วงจรชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้น

3) เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบมอเตอร์ ใช้ Infrared Obstacle Detection Sensor ทำงานร่วมกับแผ่นสะท้อนแสงที่ติดไว้บริเวณเพลาขับของมอเตอร์ เพื่อจับรอบการหมุนมาแปลงเป็นความเร็วรอบต่อนาที (rpm) ด้วยตัวประมวลผล ESP32 และแสดงค่าที่จอ LCD

4) รีเลย์ 12V 30A แบบ 4 ขา รุ่น SLA-12VDC-SL-A ทำหน้าที่เปิด-ปิดการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังชุดขับมอเตอร์ใบพัดเรือ

5) จอ LCD ใช้แบบ 4 บรรทัด 20 ตัวอักษร เชื่อมต่อแบบ I^2C เพื่อให้สามารถสื่อสารกับ ESP32 ได้ง่าย ใช้จำนวนสายน้อย ราคาถูก

โดยได้ออกแบบให้อุปกรณ์หรือจุดต่อสายของอุปกรณ์เหล่านี้อยู่บน PCB บอร์ดควบคุมเดียวกัน ส่วนไฟเลี้ยงภาคควบคุมและแสดงผลได้ออกแบบให้มี 2 ชุด ประกอบด้วย

1) ไฟ DC 12 V ได้จากโมดูล Buck Converter ลดแรงดันแบตเตอรี่ 24 V ให้เหลือ 12 V เพื่อเลี้ยงรีเลย์ 12 V 30 A ที่เป็นเสมือนสวิตช์เปิด-ปิด ไฟไปจ่ายให้กับชุดขับมอเตอร์

2) ไฟ DC 5 V ได้จากโมดูล Buck Converter ลดแรงดันแบตเตอรี่ 24 V ให้เหลือ 5 V เพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้ กับ ESP32 และจอ LCD

ภาคกำลังและขับเคลื่อน ภาคนี้เป็นส่วนของแหล่งจ่ายพลังงาน ชุดขับเคลื่อนต้นกำลัง และชุดใบจักรเรือ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 3 ส่วน ได้แก่

1) แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมฟอสเฟต (LFP) 3.2 V 22 Ah จำนวน 8 ก้อน ต่ออนุกรมกัน จะได้แรงดัน 25.6 V ทำงานร่วมกับ BMS 24 V และ Active balance ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลักให้กับภาคควบคุมและภาคกำลัง

2) ชุดขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ยี่ห้อ Chang-Store ขนาด 500 W 24 V เป็นตัวควบคุมความเร็วแบบพัลส์วิดธ์มอดูเลชัน สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (DC Brushless Motor) ขนาด 500 W 24 V 22 A ความเร็ว 2200 รอบต่อนาที ยี่ห้อเดียวกัน ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนต้นกำลังให้กับชุดใบจักรเรือ

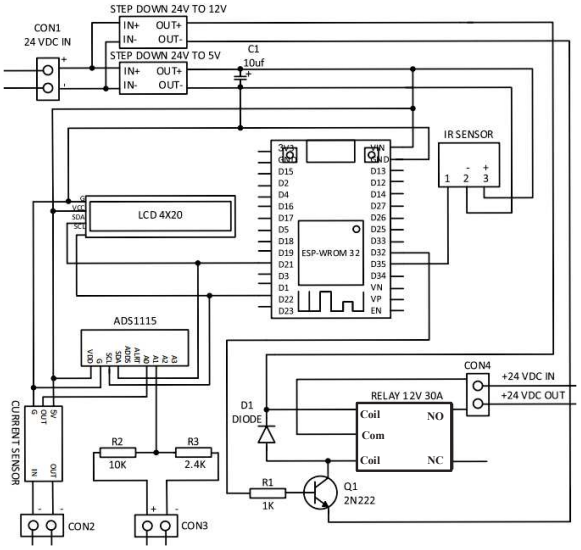
3) ชุดหางเรือสั้นประกอบกับเครื่องตัดหญ้า ใช้ที่มีขายทั่วไป เส้นผ่านศูนย์กลางก้าน 28 มิลลิเมตร แกนเพลาเฟือง 9 ฟัน มีตัวยึดกับตัวเรือ และด้ามจับคันบังคับ พร้อมคันเร่งไฟฟ้า นำมาใช้เป็นชุดใบจักรเรือหางสั้น โดยดัดแปลงเปลี่ยนใบพัดเป็นขนาด 10 นิ้ว ประกอบแกนเพลาเข้ากับมอเตอร์ แทนเครื่องตัดหญ้า ดังรูปที่ 2



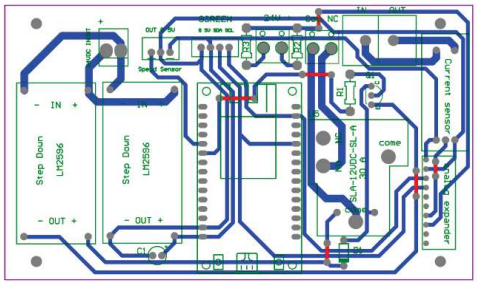
รูปที่ 2 ใบจักรเรือหางสั้นที่นำมาดัดแปลงประกอบกับมอเตอร์

2.2 การสร้างและการประกอบ

จากความต้องการใช้งานอุปกรณ์ และวงจรที่ได้ออกแบบไว้เบื้องต้น จะมีอุปกรณ์ชิ้นเล็ก ๆ ค่อนข้างมาก เพื่อให้ง่ายในการต่อวงจรใช้งานและชิ้นงานมีความเรียบร้อย แข็งแรง จึงได้ออกแบบแผ่น PCB ของบอร์ดควบคุมและแสดงผล สำหรับใช้ติดตั้งตัวประมวลผลและอุปกรณ์อื่น ๆ รวมไว้ในบอร์ดเดียวกัน ทำให้ส่วนควบคุมให้มีขนาดเล็ก ลดการหลุดหลวมของจุดต่อต่าง ๆ และง่ายต่อการติดตั้งใช้งาน โดยมีวงจรของบอร์ดควบคุมและแสดงผล ดังรูปที่ 3 และลายวงจรที่จะใช้สร้างแผ่น PCB ดังรูปที่ 4 เมื่อนำแผ่น PCB ที่สร้างขึ้น มาทำการบัดกรีลงอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อย จะได้บอร์ดภาคควบคุมและแสดงผลที่แล้วเสร็จ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 3 วงจรภาคควบคุมและแสดงผล



รูปที่ 4 ลาย PCB ของบอร์ดควบคุมและแสดงผล



รูปที่ 5 บอร์ดควบคุมและแสดงผลที่ประกอบแล้วเสร็จ

เมื่อนำบอร์ดควบคุมและแสดงผลพร้อมอุปกรณ์อื่น ๆ ติดตั้งในกล่องพลาสติกกันน้ำ ร่วมกับแบตเตอรี่และชุดขับมอเตอร์ เพื่อให้ถอดเก็บหรือยกไปชาร์จได้ง่าย ดังรูปที่ 6 แล้วจึงนำไปติดตั้งบนเรือไฟเบอร์กลาส จะได้ชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้น พร้อมใช้งาน ดังรูปที่ 7

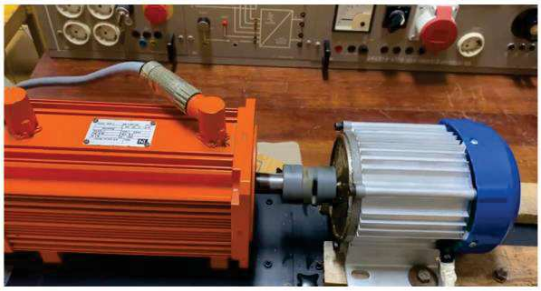


รูปที่ 6 ชุดควบคุมและแสดงผลที่ลงกล่องเสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 7 ชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นที่ติดตั้งบนเรือไฟเบอร์กลาส 8 ฟุต

ทั้งนี้ก่อนการนำชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นไปติดตั้งใช้งาน เพื่อให้มั่นใจว่ามอเตอร์และชุดขับมีความเข้ากันได้ และเพื่อให้ทราบกำลังและแรงบิดว่าตรงตามข้อมูลผู้ขายหรือไม่ จึงนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังรูปที่ 8 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 1 และ รูปที่ 9

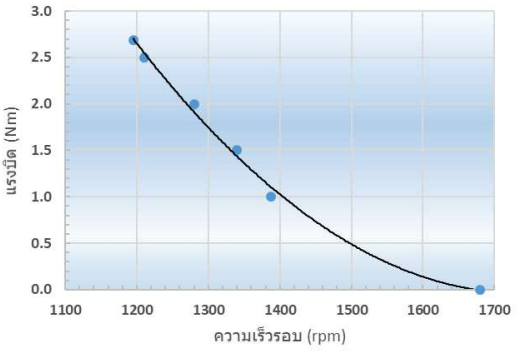


รูปที่ 8 การทดสอบขับโหลดของมอเตอร์ไร้แปลงถ่าน

ขณะที่ไม่มีโหลด หากบิดคัดเร่งจนสุด ระบบจะสามารถทำความเร็วได้ที่ 1680 รอบต่อนาที และเมื่อทดลองขับโหลด ผลจากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า มอเตอร์สามารถขับโหลดได้ แต่ความเร็วจะลดลงมากเมื่อมีโหลดสูงขึ้น ดังจะเห็นได้ขณะขับโหลดที่ 2.5 Nm ก็จะมีกระแสใกล้ถึงค่าพิกัดมอเตอร์แล้ว และยังได้ทำการทดสอบฟังก์ชันการป้องกันการจ่ายกระแสเกิน โดยตั้งกระแสไว้ที่ 18 A ผลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 2 โดยระบบควบคุมสามารถป้องกันกระแสเกินได้ ตามที่กำหนด

ตารางที่ 1 ผลการขับโหลดของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

แรงบิด (Nm)	กระแสมอเตอร์ (A)	ความเร็วรอบ (rpm)
1	4.1	644
	6.1	997
	8	1388
1.5	5.3	571
	9.6	1054
	10.8	1340
2	6.1	500
	12	1000
	13.5	1280
2.5	9.8	600
	14.2	1000
	16	1211



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วรอบมอเตอร์ ขณะมีโหลด และบิดคันเร่งสูงสุด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบฟังก์ชันตัดการทำงานเมื่อเกิดกระแสเกิน

ครั้งที่	แรงบิด (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	กระแสมอเตอร์ (A)	การทำงาน	
				ปกติ	ตัดการทำงาน
1	1.0	644	4.1	/	
2		997	6.1	/	
3		1388	8	/	
4	1.5	571	5.3	/	
5		1054	9.6	/	
6		1340	10.8	/	
7	2.0	500	6.1	/	
8		1000	12	/	
9		1280	13.5	/	
10	2.5	600	9.8	/	
11		1000	14.2	/	
12		1211	16	/	
13	2.7	1195	18		/

2.3 การทดสอบใช้งาน

ในการทดสอบใช้งาน ทำโดยการติดตั้งชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นบนเรือไฟเบอร์กลาส ขนาด 8 ฟุต ทดสอบวิ่งสามรอบที่น้ำหนักบรรทุก 75 กิโลกรัม เท่ากัน ซึ่งเป็นโหลดสูงสุดที่เหมาะสมกับเรือขนาดนี้ ดังรูปที่ 10 ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 3



รูปที่ 10 ทดสอบการขับเคลื่อนเรือไฟเบอร์กลาส ขนาด 8 ฟุต

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการทำความเร็ว ในระยะทาง 100 m

รอบที่	ระยะทาง (m)	เวลา (s)	ความเร็ว	
			(m/s)	(km/h)
1	100	55.83	1.79	6.45
2	100	56.38	1.77	6.39
3	100	56.59	1.77	6.36
เฉลี่ย	100	56.27	1.78	6.40

ซึ่งจะเห็นได้ว่าชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้นที่สร้างขึ้นนี้ สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ 6.45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วเฉลี่ยประมาณ 6.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และจากการทดสอบพบว่าสามารถแล่นต่อเนื่องได้นาน 45 นาทีต่อรอบการชาร์จ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามจากการสังเกตการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้เมื่อนำมาใช้ขับใบจักรเรือ อาจจะทำงานนี้ได้ไม่ดีนัก เนื่องจากความเร็วรอบตกค่อนข้างมาก และมีแรงบิดค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับมอเตอร์ชนิดอื่น

3. สรุป

บทความนี้นำเสนอแนวคิด การออกแบบและการสร้างชุดขับเคลื่อนเรือไฟฟ้าหางสั้น ที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน สำหรับขับเคลื่อนเรือไฟเบอร์กลาสหรือเรือไม้ขนาดเล็ก ได้ผลเป็นไปตามที่คาดหวัง นำไปติดตั้งใช้กับเรือเพื่องานเกษตรกรรมและการเดินทางระยะสั้น ๆ ได้ และยังสามารถจะพัฒนาต่อให้บันทึกค่ากระแสแรงดัน พลังงาน และความเร็วเรือ หรือข้อมูลอื่น ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสมกับเรือขนาดเล็กนี้ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Marissa Francisco Munar, Sheryl Espiritu Diokno, Rovinna Janel Cruzate- Tayo, Lew Andrew Ravelas Tria, "Electrification of Boats for Small-Scale Rural Fishing", 2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp.589-593, 2024.

[2] United Nations, " Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all," 2021. [Online] . Available: sdgs.un.org/goals/goal7.[Accessed:27-Mar-2025].

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

อุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่ววองไวของนักกีฬา

A timing device to train athlete agility

ศุภกร กตาธิการกุล[1*] พิทักษ์ บุญนุ่น[2] สุเจนต์ พรหมเหมือน[1] และสุวิทย์ เพชรห้วยลึก[1]
[1*]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: pituk.b@rmutsv.ac.th, supagone@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการออกแบบอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่ววองไวของนักกีฬาโดยใช้หลักการการตรวจวัดจับเวลาด้วยโมดูลอัลตร้าโซนิก ข้อมูลที่ได้จะประมวลผลเพื่อแปลงเป็นเวลาในการเคลื่อนที่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมทั้งแสดงผลด้วยจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร ทำการส่งข้อมูลแบบอีเอสพีนาว (ESP-NOW) จากผลการทดสอบและเปรียบเทียบการจับเวลาสำหรับวิ่งระยะ 20 เมตร จับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาโดยมนุษย์และการใช้กล้องบันทึกวิดีโอแบบภาพช้าร่วมกับโปรแกรม Adobe Premiere Pro ได้ค่าคลาดเคลื่อน 12.41 % เปรียบเทียบกับอุปกรณ์จับเวลาที่สร้างขึ้นมีค่าคลาดเคลื่อน 3.53 % ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถนำไปช่วยจับเวลาที่แม่นยำเพื่อฝึกความคล่องแคล่ววองไวในกีฬาประเภทต่างๆ เพื่อนำไปพัฒนาศักยภาพในการฝึกกีฬาได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ความคล่องแคล่ว, ไมโครคอนโทรลเลอร์, โมดูลอัลตร้าโซนิก

Abstract

This article aims to study the design of a timing device to train agility in athletes by using the principle of measuring time with an ultrasonic module. The obtained data will be processed to convert to the movement time by a microcontroller and displayed on a 16x2 character LCD screen. The data is sent as ESP-NOW. From the test results and comparison of timing for 20- meter running, timing with a human stopwatch and using a slow-motion video camera with Adobe Premiere Pro, the error value is 12.41% compared to the timing device that has an error value of 3.53%. Therefore, this device can be used to help measure accurate time to train agility in various sports to develop the potential for better sports training.

Keywords: Agility, Microcontroller, Ultrasonic module.

1. บทนำ

ปัจจุบันการเล่นกีฬาในประเทศไทยในหลายๆ ชนิดกีฬา อาทิ เช่น ฟุตบอล ฟุตซอล วอลเลย์บอล แบดมินตันเป็นต้น ได้มีการพัฒนาไปในรูปแบบของอาชีพมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างจากอดีตมากสำหรับเรื่องที่เกี่ยวข้องกับสมรรถภาพทางกาย ผู้ฝึกสอนสมัยก่อนมีความเชื่อว่าสมรรถภาพทางกายของนักกีฬามี ความสำคัญน้อยกว่าทักษะการเล่น แต่ในปัจจุบันความเชื่อนั้นได้เปลี่ยนไป เพราะมีข้อค้นพบว่า ระดับสมรรถภาพทางกายนักกีฬาที่แตกต่างกันมีความสัมพันธ์กับการประสบผลสำเร็จในการแข่งขัน ดังนั้น ผู้ฝึกสอน ต้องให้นักกีฬาได้ฝึกและทดสอบสมรรถภาพทางกายด้านต่าง ๆ อย่างเหมาะสม โดยกีฬาชนิดต่าง ๆ จะมีการ ฝึกซ้อมของการเคลื่อนไหวในรูปแบบต่าง ๆ มากมาย โดยวิธีการหนึ่งคือวิธีการหนึ่งในการฝึกความคล่องแคล่ว ว่องไวของนักกีฬาอีกด้วย ซึ่งหากเรามีระดับความคล่องแคล่ววองไวที่ดีก็จะเคลื่อนไหวได้ดี ความคล่องแคล่ว ว่องไว เป็นความสามารถในการเปลี่ยนทิศทางของร่างกายอย่างมีประสิทธิภาพ แต่สามารถควบคุมได้ในขณะ เคลื่อนไหวด้วยการใช้แรงเต็มที่มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และร่างกายสามารถเปลี่ยนอิริยาบถได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น นักกีฬาจะมีความคล่องแคล่ววองไวได้จะต้องฝึกฝนตนเองเสมอ ยกตัวอย่างกีฬา ประเภทฟุตบอล การฝึกความคล่องแคล่วจะส่งผลต่อสมรรถภาพทางร่างกายและจะส่งผลต่อการเล่นใน สนามแข่งขัน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ **สุรศักดิ์ เกิดจันทึก (2546)** กล่าวว่า การทดสอบสมรรถภาพทางกาย ของนักกีฬาฟุตบอลในเกมการแข่งขันเวลา 90 นาที แต่เวลาที่ใช้จริง ๆ ในการเล่นจะใช้เวลาประมาณ 60 นาที หรืออาจจะมากน้อยกว่านั้น ขึ้นอยู่กับแท็คติกการเล่น การบาดเจ็บ และการหยุดเวลา ส่วนรูปแบบหรือวิธีการ เล่นจะแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ และสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอด โดยเฉพาะในปัจจุบันได้มีการคิดค้น วิธีการเล่นสมัยใหม่เพื่อให้การแข่งขันตื่นเต้นและน่าสนใจ จึงมีการใช้ความเร็วและความคล่องแคล่ววองไวเข้ามาประยุกต์ใช้ทำให้การแข่งขันมีคุณภาพมากขึ้น รวมทั้งการเล่นกีฬาประเภทต่าง ๆ โดยในการฝึกซ้อมจะ ฝึกซ้อมของการเคลื่อนไหวในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น กีฬาฟุตบอล ฟุตซอล มีการทดสอบสมรรถภาพสนามในการวิ่งระยะ 5 เมตร 10 เมตร เพื่อวัดความคล่องแคล่ววองไวและความเร็วในการเปลี่ยนทิศทาง โดยส่วนใหญ่ จะใช้นาฬิกาจับเวลาในการตัดสินและการฝึกซ้อมความคล่องแคล่ววองไวและความเร็วจะใช้การ

จับเวลาเพื่อ การพัฒนาศักยภาพ ซึ่งการจับเวลาจะใช้มนุษย์ในการจับเวลาทั้งจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของการวิ่งหรือการ ทดสอบความคล่องแคล่วส่งผลให้เวลาที่ได้เป็นค่าเวลาที่ได้โดยประมาณอันเกิดจากความคลาดเคลื่อนของผู้จับเวลาทำให้นักกีฬาไม่สามารถทราบค่าเวลาที่แน่นอนหรือใกล้เคียงมากที่สุดได้ ทำให้การพัฒนาศักยภาพของ กีฬาประเภทต่าง ๆ ไม่สามารถทำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งในปัจจุบันเครื่องจับเวลาที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ เป็นนาฬิกาจับเวลา หรือถ้าเป็นตัวจับเวลาในการทดสอบสมรรถภาพทางด้านความคล่องแคล่วจะนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและไม่สามารถซ่อมแซมได้เอง **เจริญ กระบวนรัตน์ (2557)** กล่าวไว้ว่า ระยะทางที่ใช้ในการฝึกความเร็วควรให้เหมาะสมกับกีฬาแต่ละประเภท ตัวอย่างเช่น การฝึกกีฬาวอลเล่ย์บอล บาสเกตบอล ฟุตซอล เหมาะสมกับ ระยะทาง 20 เมตร ส่วนระยะทาง 40 เมตร จะเหมาะสมกับการฝึกกีฬาฟุตบอล รักบี้ ฮอกกี้ เป็นต้น

วีระยุทธ กองวงษาและคณะ(2562) ศึกษาและเปรียบเทียบผลของโปรแกรมการฝึกความเร็วและความคล่องแคล่วของนักกีฬาฟุตบอล มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม กลุ่มตัวอย่างเป็นนักกีฬาฟุตบอล มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม โดยวิธีการเลือกแบบเฉพาะเจาะจง มีการทดสอบสมรรถภาพของความเร็วและความคล่องแคล่วว่องไวก่อนการทดลองและหลังการทดลอง พบว่า กลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยความเร็วและความคล่องแคล่วว่องไวของ นักกีฬาฟุตบอล ก่อนการทดลองและหลังการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และดีกว่าก่อนการทดลอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ทดสอบสมรรถภาพทางกายด้านความเร็วอยู่ใน เกณฑ์ดี และพบว่ากลุ่มทดลองมีค่าเฉลี่ยความคล่องแคล่วว่องไวเมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ทดสอบ สมรรถภาพทางกายด้านความคล่องแคล่วว่องไว อยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก **ชาญชัย ชาญฤทธิ์ (2559)** ได้พัฒนาเครื่องจับเวลาในการวิ่ง (speed timer) และเพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องจับเวลาในการวิ่ง กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 17 คน แบ่งออกเป็นกลุ่มผู้ทรงคุณวุฒิตรวจความเหมาะสมของเครื่องมือ จำนวน 4 คน กลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักเรียนมีหน้าที่ จับเวลาในการวิ่งโดยใช้นาฬิกาจับเวลาจำนวน 3 คน และกลุ่มตัวอย่างที่เป็นนักเรียนทำหน้าที่วิ่งทดสอบ สมรรถภาพด้านความเร็วในระยะทาง 50 เมตร มีอายุระหว่าง 16 – 17 ปี จำนวน 10 คน ได้มาโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นเครื่องจบเวลาในการวิ่ง (speed timer) โดยใช้แสงเลเซอร์ ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น **ภัทรภร บุญทวีมิตร(2565)** ศึกษาผลของการใช้โปรแกรมการฝึกแบบควบคู่ที่มีผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวในกีฬาบาสเกตบอลของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3 พบว่า ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลของการใช้โปรแกรมการ ฝึกแบบควบคู่ที่มีผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวในกีฬาบาสเกตบอลของกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม ระยะเวลา 8 สัปดาห์โดยใช้วิธีเปรียบเทียบค่าที่เป็นอิสระต่อกัน แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และมี ผลความพึงพอใจในการเข้าร่วมโปรแกรมการฝึกแบบควบคู่มีค่าเฉลี่ยระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด **พัชรี ทองคำพานิช และกาญจนา กาญจนประดิษฐ์(2564)** ได้การสร้างชุดอุปกรณ์และโปรแกรมการฝึกที่พัฒนาความคล่องแคล่วว่องไวสำหรับนักกีฬาเซปักตะกร้อ ประกอบด้วย 2 ส่วน ด้วยกัน คือ กล่องควบคุมการ ส่งสัญญาณจำนวน 1 ตัว มีหน้าที่ควบคุมการส่งสัญญาณไปที่กล่องการรับสัญญาณและกล่องการรับสัญญาณ จำนวน 5 ตัว มีหน้าที่รับสัญญาณจากกล่องส่งสัญญาณ กล่องการรับสัญญาณสามารถแสดงสัญญาเตือน 3 รูปแบบ ได้แก่ สัญญาณเสียงและแสง สัญญาณแสง และสัญญาณเสียงในการใช้กับรูปแบบฝึกต่าง ๆ

ดังนั้นจึงเสนอแนวคิดในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีฬาเพื่อไปใช้ในการทดสอบสมรรถภาพของการเคลื่อนที่สำหรับกีฬาประเภทต่างๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์และเกิดความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้หลักการการตรวจวัดจับเวลาด้วยโมดูลอัลตร้าโซนิก HC-SR04 ข้อมูลที่ได้จะประมวลผลเพื่อแปลงเป็นเวลาในการเคลื่อนที่ โดยการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Wemos D1 mini ของระยะทางของการทดสอบการเคลื่อนที่ของความคล่องแคล่วบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด พร้อมทั้งแสดงผลด้วยจอ LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร โดยทำการส่งข้อมูลแบบ ESP-NOW ด้วยความถี่ 2.4 GHz โดยการออกแบบได้ให้ความสำคัญกับต้นทุนการผลิตและความสามารถในการผลิตได้ภายในประเทศ สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยการใช้เทคโนโลยีที่ไม่สูง ซึ่งจะเป็นการลดการนำเข้าเครื่องมือที่มีราคาแพงจากต่างประเทศได้อีกทางหนึ่งและเพื่อให้บุคคลทั่วไปสามารถใช้เทคโนโลยีได้ง่ายยิ่งขึ้นและเพื่อส่งเสริมการพัฒนาด้านกีฬา และเพื่อสนับสนุนการเรียนรู้และนำไปเป็นพื้นฐานในการต่อยอดสำหรับการสร้างนวัตกรรมใหม่ๆ ขึ้นมาสู่เชิงพาณิชย์

2.ทฤษฎีและการออกแบบนวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์

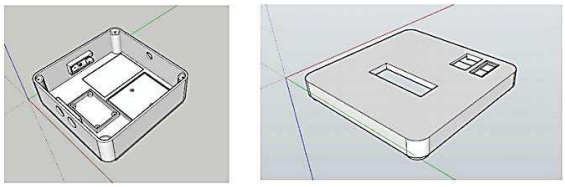
หลักการของอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีฬาจะแบ่งอุปกรณ์ออกเป็น 2 ชุด คือจุดที่ผู้วิ่งออกตัวกับจุดสิ้นสุดหรือเส้นชัย โดยการใช้หลักการวัดระยะห่างด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคด้วยโมดูล HC-SR04 มาใช้งาน เป็นการใช้คลื่นอัลตราโซนิคความถี่ 40kHz มีหลักการ คือ ตัวส่งคลื่นที่ทำหน้าที่สร้างคลื่นเสียงออกไปในการวัดระยะแต่ละครั้ง แล้วเมื่อไปกระทบวัตถุหรือสิ่งกีดขวางคลื่นเสียงถูกสะท้อนกลับมายังตัวรับแล้วประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อจับเวลาในการเดินทางของคลื่นเสียงในทิศทางไปและกลับ ก็จะสามารถคำนวณระยะห่างจากวัตถุกีดขวางได้

การออกแบบอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของรักกีฬาจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

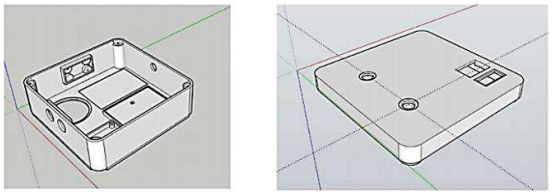
จุดออกตัว : ใช้โมดูลวัดระยะห่างด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคตรวจจับว่ามีผู้วิ่งอยู่ที่จุดออกตัวหรือไม่ หากผู้วิ่งอยู่ที่จุดออกตัวแล้วเมื่อกดปุ่มรีเซ็ทตัวอุปกรณ์จะรีเซ็ทตัวเองรวมถึงส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ที่จุดสิ้นสุดเพื่อทำการรีเซ็ทด้วย ตัวอุปกรณ์ทั้ง 2 จุดก็จะพร้อมใช้งาน และเมื่อผู้วิ่งกดผู้สตาร์ทตัวอุปกรณ์จะส่งสัญญาณเสียงการปล่อยตัว เมื่อผู้วิ่งออกตัวไปแล้วโมดูลวัดระยะห่างด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคจะตรวจไม่เจอผู้วิ่งในระยะที่กำหนดก็จะส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์จุดสิ้นสุดเพื่อทำการจับเวลา ด้วยหลักการ ESP-NOW แบบ ONE WAY

จุดสิ้นสุด : เมื่อผู้วิ่ง วิ่งมาถึงจุดสิ้นสุดโมดูลวัดระยะห่างด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคจะตรวจพบผู้วิ่ง ในระยะที่กำหนดจะทำการหยุดเวลาและแสดงผลที่หน้าจอ LCD หากผู้วิ่งต้องการทำการทดสอบการวิ่งใหม่อีกครั้งสามารถไปยังจุดออกตัวและทำการรีเซ็ทอุปกรณ์ใหม่ ได้อีกครั้ง

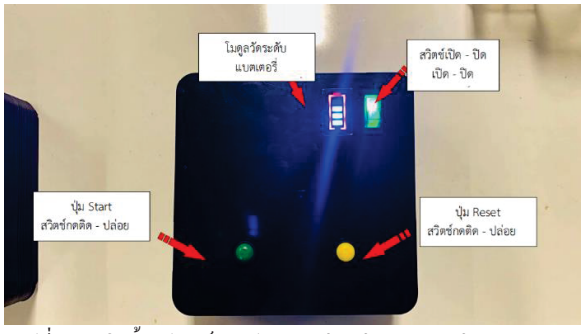
ทำการออกแบบกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์จุดออกตัวและจุดสิ้นสุดได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม SketchUp และพิมพ์กล่องโดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 1 - 2 โดยภายในทั้ง 2 จุด ประกอบด้วย ถ่านชาร์จ 18650 จำนวน 3 ก้อนจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าประมาณ 11.1 – 12.6V และใช้โมดูลลดแรงดัน LM2596 ทำการลดแรงดันไฟฟ้าให้เหลือ 5V เพื่อให้สามารถใช้งานได้กับบอร์ด Wemos D1 mini , โมดูล HC-SR04, โมดูลเสียง Buzzer จอแสดงผล LCD ขนาด 16x2 ตัวอักษร โมดูลวัดระดับแบตเตอรี่ โมดูลบันทึกเสียง/เล่นเสียง ISD1820 และลำโพง และทากรการติดตั้งอุปกรณ์และประกอบส่วนต่าง ๆ ของกล่องออกตัวและกล่องจุดสิ้นสุด แสดงดังรูปที่ 3 -4



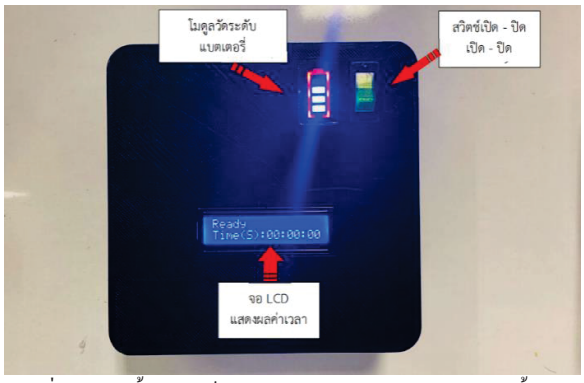
รูปที่ 1 โมเดลกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์จับเวลาสำหรับการวิ่งระยะสั้นเพื่อการพัฒนาสุขภาพและการกีฬา จุดออกตัว



รูปที่ 2 โมเดลกล่องสำหรับติดตั้งอุปกรณ์จับเวลาสำหรับการวิ่งระยะสั้นเพื่อการพัฒนาสุขภาพและการกีฬา จุดสิ้นสุด



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์และประกอบส่วนต่าง ๆ ของกล่องจุดออกตัว เสร็จเรียบร้อย



รูปที่ 4 การติดตั้งอุปกรณ์และประกอบส่วนต่าง ๆ ของกล่องจุดสิ้นสุด เสร็จเรียบร้อย

3. ผลการทดสอบนวัตกรรม

จากการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่ววองไวของนักกีฬากับการใช้มนุษย์จับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาและเปรียบเทียบกับการใช้กล้องบันทึกวิดีโอแบบภาพช้า (Slow Motion) ร่วมกับโปรแกรม Adobe Premiere Pro จะทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง เมื่อทำการทำสอบนักกีฬาขณะผู้วิ่งเริ่มออกตัวจากจุดออกตัว เวลาจะเริ่มจับเวลา แสดงดังรูปที่ 5 และเมื่อนักกีฬาถึงจุดสิ้นสุดเวลาจะหยุดลง แสดงดังรูปที่ 6 นำไปหาค่าข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของการจับเวลา แล้วบันทึกผล แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 การทดลองใช้งานอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่ววองไวของนักกีฬาขณะผู้วิ่งเริ่มออกตัว



รูปที่ 6 การทดลองใช้งานอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีพา ขณะผู้ถึงจุดสิ้นสุด

นอกจากนี้นำไปทดสอบจับเวลาในการฝึกความคล่องแคล่วของนักกีพาฟุตบอล แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดลองใช้งานอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีพาในฝึกความคล่องแคล่วของนักกีพาฟุตบอล

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบและเปรียบเทียบการจับเวลาสำหรับวิ่งระยะ 20 เมตร โดยแบ่งเป็นการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาโดยมนุษย์และการใช้กล้องบันทึกวิดีโอแบบภาพช้า (Slow Motion) ร่วมกับโปรแกรม Adobe Premiere Pro

จำนวนครั้ง	ผลการจับเวลา				
	จับเวลาด้วยกล้องบันทึกวิดีโอแบบภาพช้า (Slow Motion) ร่วมกับโปรแกรม Adobe Premiere Pro	จับเวลาด้วยอุปกรณ์จับเวลาสำหรับการวิ่งระยะสั้น		จับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาโดยมีมนุษย์ควบคุม	
		เวลา	ความคลาดเคลื่อน	เวลา	ความคลาดเคลื่อน
1	2.23	2.32	4.17 %	2.78	24.66 %
2	2.13	2.14	0.61 %	1.79	15.77 %
3	2.19	2.27	3.52 %	2.47	13.06 %
4	2.16	2.32	7.22 %	2.32	7.56 %
5	2.21	2.33	5.61%	2.01	8.98 %
6	2.13	2.16	1.27 %	2.37	11.24 %
7	2.19	2.23	1.64 %	1.90	13.26 %
8	2.17	2.20	1.15 %	2.28	4.95 %
9	2.30	2.41	4.74 %	2.07	9.83 %
10	2.35	2.48	5.40 %	2.70	14.74 %
เฉลี่ย			**3.53 %**		**12.41 %**

4. สรุป

บทความนี้ศึกษาออกแบบอุปกรณ์จับเวลาเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวของนักกีพา จากผลการทดสอบและเปรียบเทียบการจับเวลาสำหรับวิ่งระยะ 20 เมตร จับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาโดยมนุษย์และการใช้กล้องบันทึกวิดีโอแบบภาพช้า (Slow Motion) ร่วมกับโปรแกรม Adobe Premiere Pro ได้ค่าคลาดเคลื่อน 12.41 % เปรียบเทียบกับอุปกรณ์จับเวลาที่สร้างขึ้นมีค่าคลาดเคลื่อน 3.53 % ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถนำไปช่วยจับเวลาที่แม่นยำเพื่อฝึกความคล่องแคล่วว่องไวในกีพาประเภทต่าง ๆ เพื่อนำไปพัฒนาศักยภาพในการฝึกกีพาได้ดียิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและงบประมาณ

เอกสารอ้างอิง

[1] นาวินทร์ สมประสงค์. (2559). คู่มือการใช้งานโปรแกรม SketchUp Pro 8 ภาษาไทย. สืบค้น 10 สิงหาคม 2565.

[2] ชาญชัย ชาญฤทธิ์. (2559). การพัฒนาเครื่องจับเวลาในการวิ่งและโปรแกรมวิเคราะห์ความเร็วในการวิ่ง. โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย นครปฐม (พระตำหนักสวนกุหลาบมัธยม).

[3] พัชรี ทองคำ พานิช และกาญจนา กาญจนประดิษฐ์. (2564). การสร้างชุดอุปกรณ์และโปรแกรมการฝึกที่พัฒนาความคล่องแคล่วว่องไว สำหรับนักกีพาเซปักตะกร้อ. วารสารวิทยาศาสตร์การกีพาและสุขภาพ ปีที่ 22 ฉบับที่ 3 (กันยายน-ธันวาคม 2564).

[4] ภัทรภร บุญทวีมิตร. (2565). ผลของการใช้โปรแกรมการฝึกแบบควบคู่ที่มีผลต่อความคล่องแคล่วว่องไวในกีพาบาสเกตบอลของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3. วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[5] เจริญ กระบวนรัตน์. (2557). วิทยาศาสตร์การฝึกสอนกีพา. กรุงเทพฯ: บริษัทสินธนา ก้อปปี้.

[6] สุรศักดิ์ เกิดจันทึก. (2554). การศึกษาแบบทดสอบสมรรถภาพทางกายกีพาวอลเลย์บอล. กรุงเทพฯ : การกีพา แห่งประเทศไทย.

[7] วีรยุทธ กองวงศา และคณะ.(2562). การพัฒนาโปรแกรมการฝึกความเร็วและความคล่องแคล่วโดยใช้การฝึกกับลูกฟุตบอลของนักกีพาฟุตบอลมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.วารสารสุขศึกษาพลศึกษา และสันทนาการ ปีที่ 45 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม พ.ศ. 2562

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องบ่มกระเทียมดำควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย

Black Garlic Fermenter Controlled Via Wireless Network

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน* ชนกานต์ ไพบูลย์โรจน์รุ่ง อมรพงศ์ ฐากุลอธิวัฒน์ และ ธนิตา ลาภวิบูลย์กิจ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
E-mail: wuthikrai_ch@rmutto.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องบ่มกระเทียมดำที่สามารถควบคุมและตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องผ่านทางเว็บไซต์โดยใช้บอร์ด ESP32 เชื่อมต่อกับ WiFi เป็นตัวประมวลผลหลัก ใช้เซ็นเซอร์ SHT20 จำนวน 4 ตัว เพื่อวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่อง ผลการทดสอบพบว่า เครื่องบ่มกระเทียมดำสามารถควบคุมสั่งงานและแสดงผลผ่านทางเว็บไซต์แบบเรียลไทม์ได้ตรงตามที่ต้องการ กระเทียมดำที่ได้จากกระบวนการบ่มด้วยเครื่องบ่มกระเทียมดำ พบว่าการบ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %RH ในระยะเวลาการบ่มจำนวน 12 วัน กระเทียมมีการเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มคล้ายเจลลี่ กลิ่นคล้ายผลไม้ ไม่เหม็นฉุน ให้รสหวานอมเปรี้ยว เป็นรสชาติตามที่ต้องการ น้ำหนักหลังบ่มเหลือ 75.19% ใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวน 733.50 หน่วย คิดเป็นเงิน 3,540.30 บาท

คำสำคัญ: เครื่องบ่ม, กระเทียมดำ, เครือข่ายไร้สาย

Abstract

This paper presents the design and construction of black garlic fermentation machine controlled via wireless network that allows for controlling and monitoring the machine's operational status through a website. It uses ESP32 board connected to WiFi as the main processor and uses four SHT20 sensors to measure the temperature and relative humidity. The experimental results showed that the black garlic fermentation machine can control and display via the website in real time as required. The black garlic obtained from the fermentation process using the black garlic fermentation machine showed that fermenting garlic at 70°C and 70% RH for 12 days resulted in garlic turning completely black. The texture became soft and chewy, like jelly, with a fruity aroma and no pungent odor. It had a sweet and slightly sour taste, as desired. The weight after fermentation was reduced to 75.19%, and the total electricity consumption was 733.50 kWh, amounting to a cost of 3,540.30 THB.

Keywords: fermentation machine, black garlic, wireless network

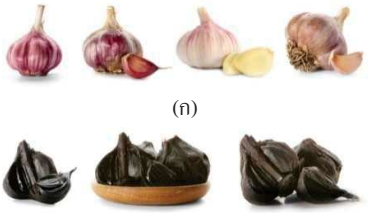
1. บทนำ

กระเทียมเป็นพืชสมุนไพรที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมของอาหารและใช้เป็นยาแผนโบราณในการรักษาโรค [1] เนื่องจากกระเทียมสดมีกลิ่นฉุน เมื่อรับประทานจะส่งกลิ่นทางลมหายใจ ผู้บริโภคบางกลุ่มจึงไม่นิยมรับประทาน ผลิตภัณฑ์กระเทียมดำ เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ในการลดกลิ่นฉุนของกระเทียมที่ได้รับความนิยม [2] มีประโยชน์ช่วยลดไขมัน ลดความดันโลหิต ลดน้ำตาลในเลือด บรรเทาอาการของโรคเบาหวาน และโรคหัวใจ เป็นต้น [3] กระเทียมดำมีประโยชน์ต่อร่างกายมากกว่ากระเทียมสดถึง 13 เท่า [4]-[5] ในการบ่มกระเทียมสดให้กลายเป็นกระเทียมดำ จะใช้เวลาตั้งแต่ 40-90 วัน อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 60-90 °C และความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 50-90 %RH [1] ส่งผลให้กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีดำจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) นอกจากนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบอัลซิลิน ที่เป็นสารที่ไม่คงตัวและมีกลิ่นฉุน ให้เป็นสาร S-Allyl-cysteine (SAC) และสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ซึ่งเป็นสารที่มีความคงตัว ไม่มีกลิ่นฉุน และเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [2] กระเทียมดำกับกระเทียมสดแตกต่างกันทั้งด้านรสชาติและลักษณะภายนอก คือ เนื้อสัมผัสเหนียวยืดหยุ่นคล้ายเจลลี่ สีน้ำตาลออกดำ รสชาติหวาน กลิ่นไม่ฉุน [1] ปัจจุบันเครื่องบ่มกระเทียมดำแบบหม้อหุงข้าวที่มีขายโดยทั่วไป ใช้ระยะเวลาการบ่มประมาณ 15-30 วัน ใส่กระเทียมสดได้ 2-3 kg และเครื่องบ่มกระเทียมดำที่นำเข้าจากต่างประเทศขนาดใหญ่ มีราคาค่อนข้างสูง มีงานวิจัยที่ทำการออกแบบเครื่องบ่มกระเทียมดำ ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 4-15 วัน ที่อุณหภูมิ 60-70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70-90 %RH สำหรับกระเทียมสด 1 kg [3]

จากการศึกษาเครื่องบ่มกระเทียมดำในปัจจุบันพบว่ายังไม่สามารถควบคุมและตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องผ่านเครือข่ายไร้สายได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเครื่องบ่มกระเทียมดำที่สามารถควบคุมและตรวจสอบสถานะการทำงานของเครื่องผ่านเครือข่ายไร้สายด้วยโทรศัพท์มือถือ/แท็บเล็ตหรือคอมพิวเตอร์ผ่านทางเว็บไซต์ที่ทำการออกแบบไว้ มีระบบควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในเครื่อง รวมถึงเก็บสถิติข้อมูลต่าง ๆ ของการบ่มเพื่อนำมาวิเคราะห์และวางแผนการบ่มกระเทียมดำในครั้งถัดไป

2. การผลิตกระเทียมดำ

กระเทียมดำผลิตจากกระเทียมสด ทำโดยคัดหัวกระเทียมที่มีคุณภาพ นำมาจัดเรียงลงบนถาดอลูมิเนียมไม่ให้ซ้อนทับกัน คลุมด้วยผ้าสะอาดและห่อด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ นำเข้าตู้บ่ม โดยผ่านกระบวนการบ่มที่มีการควบคุมอุณหภูมิระหว่าง 60-90 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 50-90 %RH ระยะเวลาในการบ่มประมาณ 40-90 วัน เมื่อครบกำหนดนำกระเทียมดำออกจากตู้บ่ม นำมาพักไว้ให้ไอน้ำระเหยออก ปล่อยให้เย็น และทำการบรรจุหีบห่อ [1]



(ก)

(ข)

รูปที่ 1 (ก) กระเทียมสด (ข) กระเทียมดำ [6]

ในระหว่างกระบวนการบ่มกระเทียมดำ มีการเปลี่ยนแปลงทางพฤกษเคมี ส่งผลให้การออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่าง ๆ [1] แสดงได้ดังตารางที่ 1

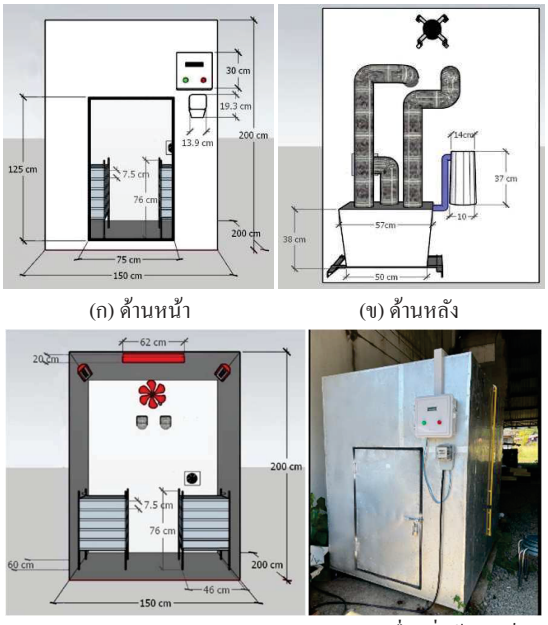
ตารางที่ 1 สารสำคัญในกระเทียมดำเมื่อเปรียบเทียบกับกระเทียมสด [1]

สารสำคัญ	กระเทียมสด	กระเทียมดำ
พลังงาน (kcal/100g)	138	227.1
โปรตีน	8.4%	9.1%
ไขมัน	0.1%	0.3%
คาร์โบไฮเดรต	28.7%	47.0%
S-allyl-cysteine (SAC)	23.7 µg/g	194.3 µg/g
Ý-glutamyl-S-allylcysteine	748.7 µg/g	248.7 µg/g
สารกลุ่ม flavonoids	3.22 mg rutin equivalent/g	เพิ่มขึ้น 4.77 เท่า
การกลุ่ม polyphenols	13 mg gallic acid equivalent/g	เพิ่มขึ้น 4.19 เท่า

3. การออกแบบเครื่องบ่มกระเทียมดำควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย

3.1 การออกแบบโครงสร้างของเครื่องบ่มกระเทียมดำ

เครื่องบ่มกระเทียมมีขนาดความกว้าง 1.5 m ยาว 2.0 m และสูง 2.0 m ภายในประกอบด้วยฮีตเตอร์อินฟาเรด 2,000 W 3 ชุด เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ 4 ตัว พัดลมขนาด 12 นิ้ว 1 ตัว พัดลมดูดอากาศ 6 นิ้ว 1 ตัว และชุดพ่นหมอก 1 ชุด ภายนอกจะมีเครื่องกรองน้ำให้สะอาดก่อนนำเข้าชุดพ่นหมอก และกล่องควบคุมการทำงานต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ โดยสามารถดูได้จากหน้าจอของกล่องควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 2



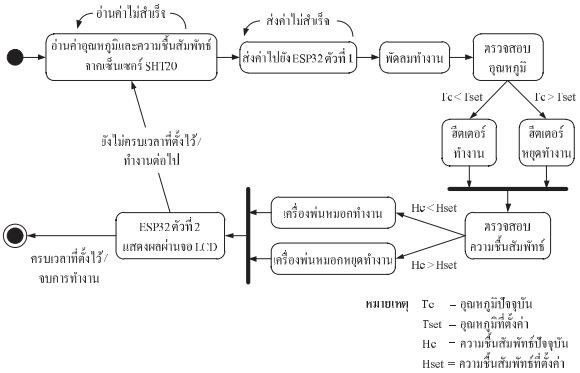
(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

(ค) ภายใน (ง) ตัวเครื่องที่สร้างสำเร็จ

รูปที่ 2 เครื่องบ่มกระเทียมดำ

3.2 การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

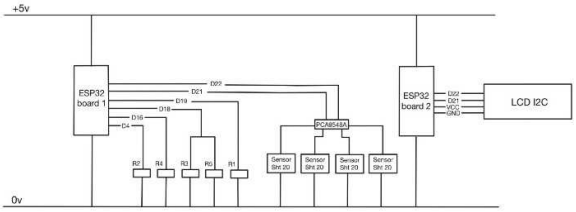
ชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะใช้เซ็นเซอร์ SHT20 วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แล้วส่งข้อมูลไปยังบอร์ด ESP32 ตัวที่ 1 เพื่อประมวลการทำงาน โดยอินเตอร์เฟสกับโซลิดสเตตรีเลย์ เพื่อสั่งการทำงานให้กับหัวพ่นหมอก พัดลม และต่อร่วมกับแมกเนติกส์คอนแทคเตอร์ในการสั่งการทำงานของฮีตเตอร์ ส่วน ESP32 ตัวที่ 2 จะรับข้อมูลและแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD ที่หน้าตู้บ่ม พร้อมทั้งแสดงผลที่หน้าเว็บไซต์ซึ่งพัฒนามาจากแพลตฟอร์ม Firebase



รูปที่ 3 แผนภาพสถานะการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

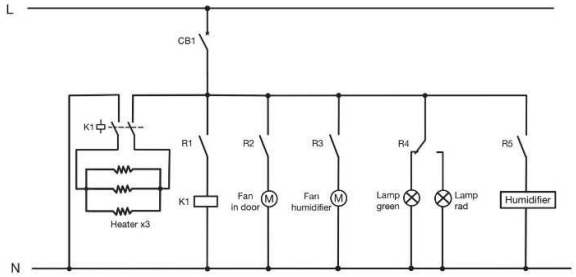
3.3 การออกแบบวงจรควบคุม

การทำงานของวงจรควบคุม เริ่มจาก ESP32 บอร์ดที่ 1 จะทำหน้าที่ส่งสัญญาควบคุมไปยังโซลิดสเตตรีเลย์เพื่อไปสั่งการอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในเครื่อง และรับค่าจากเซ็นเซอร์ SHT20 ทั้ง 4 ตัว ส่วน ESP32 บอร์ดที่ 2 จะต่อเข้ากับจอแสดงผล LCD เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิ ความชื้น และเวลานับถอยหลังที่ได้ตั้งค่าไว้ ดังรูปที่ 4

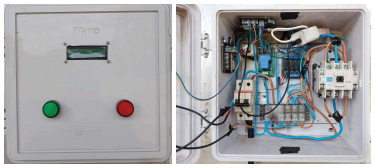


รูปที่ 4 วงจรควบคุม

ในส่วนของวงจรกำลัง การทำงานเริ่มจากเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ CB1 ไฟสถานะสีเขียวหน้าตู้ติด แสดงว่าเครื่องพร้อมใช้งาน เมื่อ ESP32 บอร์ดที่ 1 ถูกสั่งการทำงาน รีเลย์ R1 – R5 จะควบคุมให้อุปกรณ์ทำงานตามที่ตั้งค่าไว้ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรกำลัง



รูปที่ 6 ตู้ควบคุมการทำงานของระบบควบคุม

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของเครื่องบ่มกระเทียมดำควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย

พารามิเตอร์	เครื่องบ่มกระเทียมดำ	พารามิเตอร์	เครื่องบ่มกระเทียมดำ
ขนาด (ก x ย x ส)	1.5 m x 2 m x 2 m	ความจุ	240 kg (max)
ช่วงควบคุมอุณหภูมิ	RT 40 – 100 °C	ช่วงความชื้น	(30 – 98) %RH
ความผิดพลาดของอุณหภูมิ	± 0.5 °C	ความผิดพลาดของความชื้นสัมพัทธ์	± 3.0 %RH
ฮีตเตอร์อินฟาเรด	6,000 W	พัดลมดูดอากาศ	75 W
เครื่องพ่นหมอก	350 W	พัดลมระบายอากาศ	45 W

4. ผลการทดลอง

4.1 ทดลองการควบคุมและการแสดงผล

หลังจากกดปุ่มตั้งเวลาในเว็บไซต์ หน้าจอ LCD และหน้าเว็บไซต์จะแสดงสถานะการทำงาน ซึ่งจะนับเวลาถอยหลัง เมื่อครบกำหนดจะสั่งหยุดการทำงานของเครื่องบ่มกระเทียมดำ ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 หน้าจอ LCD แสดงสถานะที่หน้าเครื่องบ่มกระเทียมดำ



รูปที่ 8 หน้าเว็บไซต์แสดงสถานะต่าง ๆ

4.2 ทดสอบการบ่มกระเทียมดำ

การทดสอบบ่มกระเทียมดำแต่ละรอบ จะใช้กระเทียมโทนที่จัดหามาจากตลาดค้าขายทั่วไป ปริมาณ 3 kg วางบนถาด ถาดละ 500 g จำนวน 6 ถาด จัดวางที่ชั้นวาง ดังรูปที่ 9

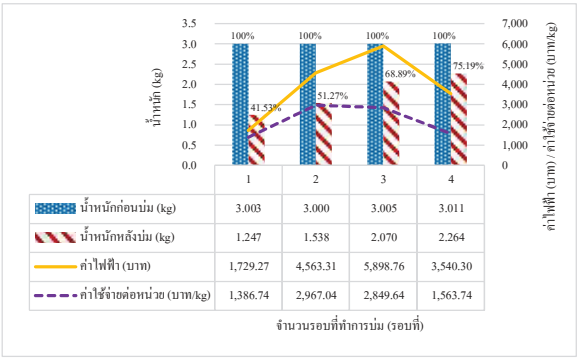


รูปที่ 9 การจัดวางกระเทียม

ทำการทดสอบการบ่มกระเทียมดำทั้งหมด 4 รอบ ดังนี้
รอบที่ 1 บ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 80 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %RH
รอบที่ 2 บ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80 %RH
รอบที่ 3 บ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 60 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 80 %RH
รอบที่ 4 บ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %RH



รูปที่ 10 ผลการบ่มกระเทียมดำ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกระเทียมและค่าไฟฟ้าในแต่ละรอบการบ่ม

จากรูปที่ 11 ผลจากการบ่มกระเทียมในรอบแรก พบว่า กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเข้ม มีเนื้อสัมผัสที่แข็ง และแห้งสนิท ใช้เวลาในการบ่ม 7 วัน ในรอบที่ 2 กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีดำ มีเนื้อสัมผัสเกือบแข็งพอบีบได้ ให้รสขม และค่อนข้างแห้ง ใช้เวลาในการบ่ม 15 วัน ในรอบที่ 3 กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีดำ มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มคล้ายเจลลี่ กลิ่นคล้ายผลไม้ ไม่เหม็นฉุน ให้รสหวานอมเปรี้ยว แต่รสชาติยังไม่ดีเท่าที่ควร เหมือนกระบวนการนึ่งมากกว่า ใช้เวลาในการบ่ม 20 วัน และในรอบที่ 4 กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มคล้ายเจลลี่ กลิ่นคล้ายผลไม้ ไม่เหม็นฉุน ให้รสหวานอมเปรี้ยว เป็นรสชาติตามที่ต้องการ ใช้เวลาในการบ่ม 12 วัน และพบว่าค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักกระเทียมหลังการบ่ม คือ 1,386.74 บาท/kg 2,967.04 บาท/kg 2,849.64 บาท/kg และ 1,563.74 บาท/kg ตามลำดับ

5. สรุป

จากการทดลองบ่มกระเทียมดำด้วยเครื่องบ่มกระเทียมดำควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย พบว่าสามารถทำการตั้งค่าและดูค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และระยะเวลาที่ต้องการบ่มแบบเรียลไทม์ผ่านทางเว็บไซต์ได้ตรงตามที่ต้องการ กระเทียมดำที่ได้จากกระบวนการบ่มด้วยเครื่องบ่มกระเทียมดำ พบว่าการบ่มกระเทียมดำที่อุณหภูมิ 70 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 70 %RH กระเทียมเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มคล้ายเจลลี่ กลิ่นคล้ายผลไม้ ไม่เหม็นฉุน ให้รสหวานอมเปรี้ยว เป็นรสชาติตามที่ต้องการ ใช้ระยะเวลาในการบ่มจำนวน 12 วัน น้ำหนักหลังบ่มเหลือ 75.19% ใช้พลังงานไฟฟ้า 733.50 หน่วย คิดเป็นเงิน 3,540.30 บาท ค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักกระเทียมหลังการบ่ม 1,563.74 บาท/kg ตัวเครื่องสามารถบรรจุกระเทียมสดได้สูงสุด 240 kg ต่อการบ่ม 1 รอบ สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจมีการนำ Machine Learning มาวิเคราะห์ผลการบ่มโดยเก็บข้อมูลไว้บน Cloud เช่น หาสูตรการบ่มที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น รวมถึงการออกแบบระบบควบคุมให้มีการประหยัดพลังงานมากขึ้นโดยใช้การควบคุมฮีตเตอร์แบบ Phase Control แทนการควบคุมฮีตเตอร์แบบเปิด-ปิด (ON-OFF)

เอกสารอ้างอิง

[1] ชญาณัฐ ท้าวแพทย์. (2566). การตรวจสอบปริมาณ เอส-อัลลิล ซิสทีอินในกระเทียมดำที่มาจากภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือในประเทศไทย (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง). ThaiLIS. https://tdc.thailis.or.th/tdc/search_result.php

[2] ชุติมา แก้วพิบูลย์ และ ฉวงศ์ บุนนาค. (2564). การประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกระเทียมโทนดำ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (วว.). ปีที่ 29, ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์ 2564, น. 111-118, doi: 10.14456/tstj.2021.10

[3] สิทธินนท์ ปัญญาเลิศชัย สันติสุข ประทีปเมือง พนัสนันท์ คล้ายเมืองปัก และ ภูริชญ์ งามคง. (2564). เครื่องหมักกระเทียมดำ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์. ปีที่ 3, ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2564, น. 40-47.

[4] จิรายุ มุสิกา ธนวรรณ มุสิกา และ พนารัตน์ สังข์อินทร์. (2565). สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระเทียมดำต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์กระเทียมดำ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ. ปีที่ 2, ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2565, น. 54-62.

[5] Bunsita. (2564, 9 เมษายน). เครื่องอบกระเทียมดำประหยัดพลังงานเพื่อยกระดับเศรษฐกิจชุมชน (RID64). https://createc.mhesi.go.th/node/1754

[6] Kapook. (ม.ป.ป.). กระเทียมดำ คืออะไร สรรพคุณต่างจากกระเทียมทั่วไปหรือเปล่า ?. https://health.kapook.com/view230527.html

การศึกษาเทคนิคการควบคุมสำหรับการขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีไลดาร์

A Study of Control Techniques for Propulsion with Lidar Technology

ชาคริต วินิจธรรม[1] กัญยาณี คำดี[1] อดิศักดิ์ ผ่อนร้อน[1] นัฐรดี เขมากโรทัย[1] และฐาปนา นามประดิษฐ์[2]
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า[1] สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
131 หมู่ 10 ถ.บำราศนราดูร ต.พลวง อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี 22210

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและศึกษาระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางด้วยเซนเซอร์ไลดาร์ ประมาณ 10 เมตร ที่ติดตั้งบนรถต้นแบบขนาดเล็ก โดยมีเป้าหมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับรถตัดหญ้าอัตโนมัติ ระบบนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ลดการใช้แรงงานคน ใช้งานพื้นที่สวนผลไม้ได้ โดยมีการออกแบบและสร้างรถต้นแบบพร้อมติดตั้งเซนเซอร์ไลดาร์เพื่อทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางและการเคลื่อนที่บนพื้นผิวต่าง ๆ คือ พื้นปูนและพื้นกระเบื้อง มีผลการทดสอบโดยรวม 45 ครั้ง รถสามารถเคลื่อนที่ไปถึงจุดหมายได้สำเร็จ 35 ครั้ง คิดเป็นความสำเร็จร้อยละ 77.78 และมีข้อผิดพลาด 10 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 22.22 ผลการทดสอบพบว่า ระบบไลดาร์มีความสามารถในการตรวจจับและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ดี แต่ยังต้องการการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการใช้งานบนพื้นที่ที่มีพื้นผิวสัมผัสที่หลากหลายมากขึ้น

คำสำคัญ : เทคโนโลยีไลดาร์ การขับเคลื่อน ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์

Abstract

This research aims to develop and study an obstacle detection system using a LiDAR sensor with a range of approximately 10 meters, installed on a small prototype vehicle. The goal is to apply this system to an autonomous lawn mower. The system enhances operational efficiency, reduces the need for manual labor, and can be utilized in orchards. The study involves designing and constructing a prototype vehicle equipped with a LiDAR sensor to test obstacle detection and movement on different surfaces, namely concrete and tile floors. The overall test was conducted 45 times, with the vehicle successfully reaching its destination in 35 instances, achieving a success rate of 77.78%. There were 10 failures, accounting for 22.22%. The test results indicate that the LiDAR system performs well in detecting and avoiding obstacles. However, improvements are needed to enhance its accuracy when operating on more diverse surface conditions.

Keywords: LiDAR Technology, Driving, ROS

1. บทนำ

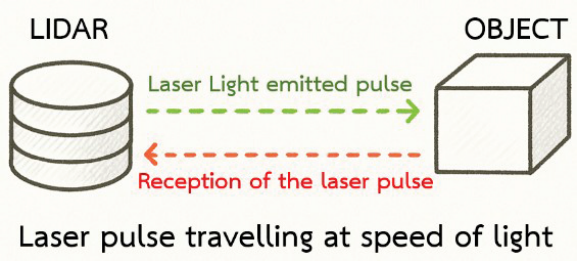
ปัจจุบันจังหวัดจันทบุรีและตราด ถือได้ว่าเป็นพื้นที่ผลิตไม้ผลทางการเกษตรของประเทศ โดยเฉพาะจังหวัดจันทบุรี มีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 3,961,250 ไร่ เป็นพื้นที่เกษตรกรรม 2,284,609 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 57.67 ของพื้นที่ทั้งหมด โดยแบ่งเป็นพื้นที่ไม้ผลประมาณ 1,038,126 ไร่ [1] ซึ่งแบ่งเป็น ทุเรียน มังคุด เงาะ ฯลฯ และก่อนที่จะได้ผลผลิตที่มีคุณภาพนั้นจะต้องมีขั้นตอนการดูแลพื้นที่สวนที่ดี ซึ่งหนึ่งในขั้นตอนของการดูแลสวนผลไม้เกษตรกร คือ เรื่องการกำจัดวัชพืชที่ขึ้นในสวนผลไม้ ซึ่งเป็นพืชที่ไม่ต้องการหรือพืชที่ขึ้นผิดที่ ทั้งแย่งธาตุอาหารในดิน โดยปกติเกษตรกรจะกำจัดวัชพืชนั้น มี 2 วิธีหลัก ๆ คือ 1) กำจัดด้วยวิธีทางเคมี (Chemical Control) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลดีและนิยมใช้กันมากแต่ในปัจจุบันการใช้สารเคมีปริมาณมากจะส่งต่อด้านความปลอดภัยของผลผลิต โดยการใช้สารเคมีกำจัดวัชพืชติดต่อกันเวลานาน ๆ ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค 2) กำจัดด้วยวิธีการใช้เครื่องจักรกลทางเกษตร(เครื่องตัดหญ้า) ซึ่งเป็นวิธีที่ดี วิธีหนึ่ง เพราะจะไม่มีสารเคมีตกค้างในสวนผลไม้ จะมีความปลอดภัยต่อผลผลิต และผู้บริโภค แต่จะมีข้อเสีย คือ ใช้เวลากำจัดวัชพืชนานกว่าวิธีที่ 1 แต่วัชพืชเจริญเติบโตไวหลังจากการกำจัด และที่สำคัญคือขาดแคลนแรงงานสำหรับการตัดหญ้า

คณะผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับใช้เซนเซอร์ไลดาร์ประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น ใช้เพื่อวัดระยะห่างของวัตถุ เพื่อป้องกันอุบัติเหตุบนท้องถนนหรือใช้วัดความสูงของฐานเมฆและปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า เป็นต้น [2,3] เพื่อที่นำมาทำรถต้นแบบโดยขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีไลดาร์(LiDAR) สำหรับการประยุกต์ใช้งานรถตัดหญ้าในอนาคต ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนแรงงาน เพิ่มความปลอดภัยและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยเทคโนโลยีนี้จะมีเลเซอร์ในการวัดระยะทางของวัตถุรอบตัวรถ โดยการส่งสัญญาณแสงไปยังวัตถุแล้ววัดระยะเวลาที่แสงสะท้อนกลับมา ทำให้สามารถสร้างภาพสามมิติของสภาพแวดล้อมรอบตัวรถได้อย่างแม่นยำ ระบบนี้ยังสามารถสร้างแผนที่ 2 มิติ และสแกนพื้นที่ได้ถึง 360 องศา จึงเหมาะสำหรับการศึกษาเพื่อมาประยุกต์ใช้งานกับรถตัดหญ้าต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไลดาร์ (LiDAR)

"ไลดาร์ (LiDAR)" ย่อมาจากคำว่า "Light Detection and Ranging" ซึ่งแปลว่า "การตรวจจับ และวัดระยะด้วยแสง" เป็นเทคโนโลยีสำรวจระยะไกลด้วยแสงเลเซอร์แบบ Pulse Wave โดยข้อมูลแสงที่เก็บค่ามาได้ เมื่อรวมกับ ข้อมูลอื่น ๆ ก็จะสามารถนำมาสร้างแผนที่ 3 มิติ ของวัตถุหรือพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ โดยมีหลักการทำงาน คือ การส่งแสงเลเซอร์ไปกระทบวัตถุหรือพื้นผิวต่าง ๆ [4] ระบบจะทำการคำนวณเวลาในการเดินทางของแสงตั้งแต่ถูกปล่อยออกจากอุปกรณ์จนสะท้อนกลับมาที่ตัวรับสัญญาณดังรูปที่ 1 โดยสามารถหาได้สมการที่ 1 และค่าผิดพลาดจากวัดจากสมการที่ 2



รูปที่ 1 หลักการทำงานของไลดาร์ (LiDAR)

$$\text{ระยะทาง} = \text{ความเร็วแสง} \times \text{ระยะเวลาไปกลับ}/2 \quad (1)$$

$$\%error = \left|\frac{X_{mea} - X_t}{X_t}\right| \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ $\%error$ = ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error)

X_{mea} = ค่าที่ได้จากการวัด (Measure value)

X_t = ค่าจริง (True value)

2.2 การสร้างแผนที่โดยใช้ไลดาร์

ไลดาร์ใช้เซนเซอร์เลเซอร์ในการวัดระยะทางไปยังวัตถุรอบข้าง ช่วยให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับโครงสร้างของพื้นที่ที่ตรวจจับได้ การใช้ กระบวนการ SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) จะช่วยให้รถสามารถนำข้อมูลจากไลดาร์มาสร้างแผนที่และระบุตำแหน่งของตนเองได้พร้อมกัน ตัวอย่างเทคนิคที่มีการนำมาใช้งาน เช่น

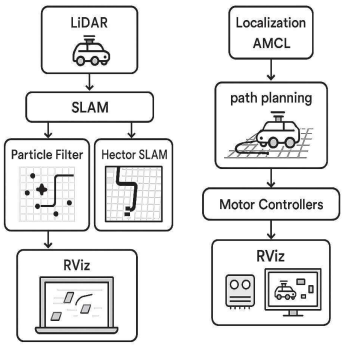
2.2.1 วิธี Particle Filter ใช้อนุภาคจำลองตำแหน่งที่เป็นไปได้ของรถ โดยจะปรับตำแหน่งของอนุภาคตามการเคลื่อนที่ เมื่อรถใช้เซนเซอร์ตรวจจับสภาพแวดล้อม ข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งของอนุภาค และคัดเลือกอนุภาคที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของตำแหน่ง

2.2.2 วิธี Hector SLAM ใช้ไลดาร์ในการสร้างแผนที่แบบเรียลไทม์ โดยไม่ต้องพึ่งตัววัดความเคลื่อนไหว (odometry) และใช้ Gaussian-Newton Optimization ในการปรับปรุงตำแหน่งของหุ่นยนต์ให้แม่นยำที่สุด

RViz (ROS Visualization) เป็นเครื่องมือที่ช่วยแสดงผลข้อมูลจาก ROS ในรูปแบบกราฟิกแบบเรียลไทม์ ซึ่งสามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ที่สร้างขึ้นจากไลดาร์และช่วยปรับปรุงพารามิเตอร์ของอัลกอริธึม SLAM ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3 การนำทางโดยใช้แผนที่

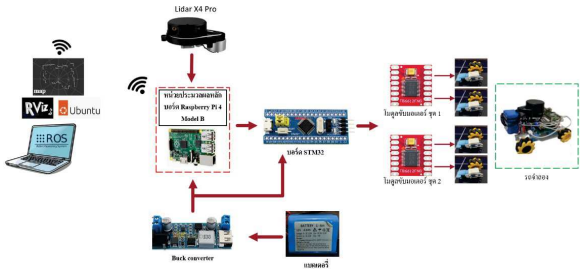
ข้อมูลแผนที่สภาพแวดล้อมสามารถใช้สำหรับการนำทางด้วย ROS Navigation Stack ซึ่งช่วยให้รถเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดได้อย่างอัตโนมัติและมีประสิทธิภาพ การนำทางเริ่มจากการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแผนที่ (localization) โดยใช้ AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) ซึ่งอาศัยเทคนิค Particle Filter ในการคำนวณตำแหน่งจากข้อมูลไลดาร์ เมื่อตำแหน่งถูกระบุ ระบบจะวางแผนเส้นทาง (path planning) เพื่อให้รถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายอย่างปลอดภัย จากนั้นคำสั่งควบคุมจะถูกส่งไปยัง Motor Controllers เพื่อกำหนดความเร็วและทิศทางของหุ่นยนต์ RViz สามารถใช้แสดงผลการนำทางแบบเรียลไทม์ เช่น แผนที่ ตำแหน่งหุ่นยนต์ เส้นทางที่วางแผนไว้ และสิ่งกีดขวางจากไลดาร์ เพื่อสังเกตการณ์ได้



รูปที่ 2 การสร้างแผนที่และการนำทาง

3. วิธีการดำเนินงาน

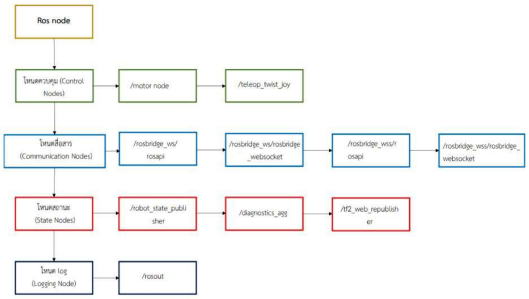
ระบบควบคุมรถอัตโนมัติใช้เซนเซอร์ LiDAR และแพลตฟอร์ม ROS ในการนำทางและประมวลผลสภาพแวดล้อม โดยใช้ Raspberry Pi 4 กับ Ubuntu รับข้อมูลจาก LiDAR แสดงผลผ่าน Rviz วางแผนเส้นทาง และควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน รถสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวาง เคลื่อนที่อัตโนมัติ และมีระบบตรวจสอบข้อผิดพลาดเพื่อเพิ่มเสถียรภาพ โดยมีผังการทำงานภาพรวมของงาน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผังการทำงานภาพรวมของงาน

3.1 การออกแบบการทำงานของรถต้นแบบ

ออกแบบการทำงานของรถต้นแบบจะใช้ระบบ ROS (Robot Operating System) หรือระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ เพื่ออำนวยความสะดวกในการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับหุ่นยนต์ เนื่องจากระบบมีความทันสมัยและเหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การประมวลผลรับส่งข้อมูลที่เป็นระบบ การใช้งานในขั้นตอนสั่งการที่สะดวกและเข้าใจง่าย ซึ่งการทำงานของรถจะแบ่งเป็น 2 ระบบใหญ่ คือ ระบบควบคุมการทำงานของรถและระบบการขับเคลื่อนของรถ ตามไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการทำงานของระบบ ROS

ส่วนการขับเคลื่อนนั้น จะใช้บอร์ด TB6612FNG ใช้ควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ร่วมกับ STM32 เพื่อขับมอเตอร์

3.2 การออกแบบโครงสร้างของตัวรถต้นแบบ

การออกแบบจะมีขนาดที่เหมาะกับการเป็นต้นแบบสำหรับการขับเคลื่อน ซึ่งรถจะมีความกว้าง 20 ซม. ยาว 25 ซม. สูง 15 ซม.

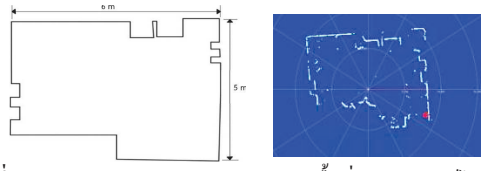


รูปที่ 5 โครงสร้างภาพรวมของรถต้นแบบ

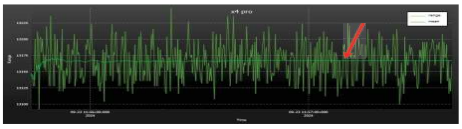
4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ไลดาร์

การเก็บผลการทำงานของไลดาร์นั้น จะให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงานของไลดาร์ก่อนนำมาประกอบกับตัวรถ ซึ่งจะมีการทดสอบการตรวจจับพื้นที่ โดยจะแสดงผลเป็น 2 มิติ ในโปรแกรม LidarViewer_V0.3.5 ทำการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ไลดาร์ เข้ากับพอร์ต USB Type A ของคอมพิวเตอร์ จากนั้นเซนเซอร์จะหมุนโดยอัตโนมัติเพื่อตรวจสอบพื้นที่โดยรอบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เปรียบเทียบแผนผังและการตรวจจับพื้นที่จากเซนเซอร์ไลดาร์



รูปที่ 7 กราฟที่แสดงค่า Range Mean และ Intensity ของเซนเซอร์

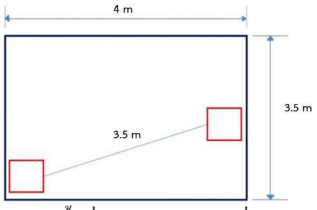
จะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ไลดาร์สามารถตรวจจับพื้นที่ได้ตามแผนผังของห้องจำลอง โดยระยะของเซนเซอร์ตรวจจับได้ ที่แสดงผลออกมา จะได้ค่า Range Mean และ Intensity เป็นกราฟดังรูปที่ 7 เพื่อจะใช้ประมวลผลใช้งานต่อไป

4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถ ด้วยการกำหนดจุดหมาย

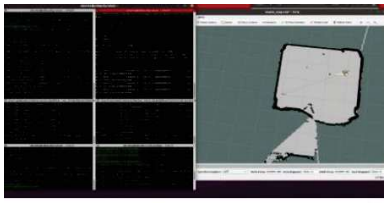
การเคลื่อนที่ของตัวรถทดสอบโดยแบ่งออกเป็น การเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย โดยไม่มีสิ่งกีดขวาง และมีสิ่งกีดขวาง เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินความผิดพลาดของรถ โดยประเมินผลการทดสอบ ผ่าน หมายถึง คลาดเคลื่อนจากจุดหมาย ไม่เกิน 30 ซม.

4.2.1 การทดสอบในพื้นที่ ไม่มีสิ่งกีดขวาง แบบที่ 1

พื้นที่ในการทดสอบจะมีการปูพื้นด้วยการแรปพลาสติกใสบนพื้นปูน ขนาด 3.5 ม. × 4 ม. ตามผัง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนผังของพื้นที่การทดสอบ แบบที่ 1 (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)

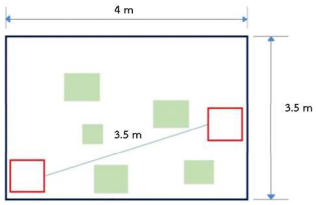


รูปที่ 9 การสร้างแผนที่ในคอมพิวเตอร์ แบบที่ 1 (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)

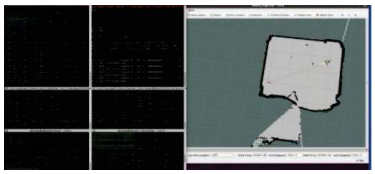
จากรูปที่ 9 เป็นผลการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย โดยไม่มีสิ่งกีดขวางจะเห็นได้ว่ามี การทดสอบ 15 ครั้ง ผ่าน 12 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 80 และ ไม่ผ่าน 3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 20

4.2.2 การทดสอบในพื้นที่มีสิ่งกีดขวาง แบบที่ 1

จะใช้พื้นที่และตำแหน่งของจุดเดินรถแบบเดียวกับแบบที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง จะแตกต่างจากเดิม โดยวางกล่องไว้ทั่วพื้นที่ภายในห้องทดสอบเพื่อจะสังเกตุการเดินรถขณะมีสิ่งกีดขวางรอบ ๆ เพื่อที่จะทดสอบระบบประมวลผลสร้างเส้นทางใหม่ ตามผังดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผนผังของพื้นที่การทดสอบแบบที่ 1 (มีสิ่งกีดขวาง)

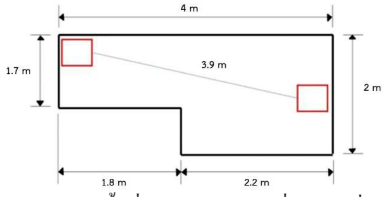


รูปที่ 11 การสร้างแผนที่ในคอมพิวเตอร์แบบที่ 1 (มีสิ่งกีดขวาง)

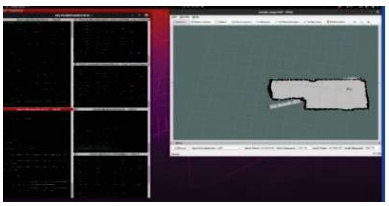
ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย โดยมีสิ่งกีดขวางแบบที่ 2 จะเห็นได้ว่าในการทดสอบ 15 ครั้ง ผ่าน 11 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 74 และไม่ผ่าน 4 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 26

4.2.3 การทดสอบในพื้นที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง แบบที่ 2

พื้นที่ในการทดสอบเป็นพื้นกระเบื้องมีพื้นที่ (1.7 m × 1.8 m) + (2 m × 2.2 m) ใน การทำสอบจะมีการขับเคลื่อนที่พื้นโดยตรง



รูปที่ 12 แผนผังของพื้นที่การทดสอบแบบที่ 2 (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)



รูปที่ 13 การสร้างแผนที่ในคอมพิวเตอร์แบบที่ 2 (ไม่มีสิ่งกีดขวาง)

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย แบบไม่มีสิ่งกีดขวางแบบที่ 2 พื้นมีความลื่นทำให้ระบบขับเคลื่อนมีข้อผิดพลาดเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าในการทดสอบ 15 ครั้ง ผ่าน 12 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 80 และไม่ผ่าน 3 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 20

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ต้นแบบรถของระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี LiDAR นี้ มีศักยภาพที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในภาคเกษตรกรรม คือ รถตัดหญ้าอัตโนมัติได้ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการนำทางยังสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแม่นยำและรองรับการทำงานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนมากขึ้นในอนาคตต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณงบสำหรับทำการวิจัย จากงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2567 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี และอนุเคราะห์ใช้สถานที่สำหรับการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานปลัดกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ข้อมูลพื้นฐานของจังหวัดจันทบุรี. [เว็บบล็อก]. สืบค้นจาก https://www.opsmoac.go.th/chanthaburi-dwl-files-421491791017

[2] ฉิศพงศ์ กิติ อนนท์ ติ่งผ่อง และ สุธี โสมาเกตุ. (2565). ระบบเตือนภัยระยะเบรกของยานพาหนะใช้ไลดาร์. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม. ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 (2022) : มีนาคม – เมษายน. สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง.

[3] สหัสยา พึงาม และ เสริม จันทร์ฉาย. (2560). การศึกษาความสูงของฐานเมฆและปริมาณเมฆที่สถานีวัดแห่งหนึ่งในเขตร้อนชื้นในภาคเหนือของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.

[4] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ(องค์การมหาชน). LiDAR เทคโนโลยีแห่งโลกอนาคต. [เว็บบล็อก]. สืบค้นจาก https://www.gistda.or.th/news_view.php?n_id=5884&lang=TH

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การควบคุมเตาเผาถ่านไม้ด้วยระบบฟัซซี่ลอจิก

Fuzzy Logic Charcoal Burner Control

สุรชาติ เหล็กงาม* กฤษฎ์ อานนท์ มานุพล ธานี และศิวกร โคธิเสน
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
E-mail: surachat@eng.buu.ac.th*

บทคัดย่อ

การเผาถ่านยังคงเป็นแหล่งพลังงานสำคัญในหลายภูมิภาค รวมทั้งประเทศไทย แต่กระบวนการผลิตถ่านแบบดั้งเดิมมักจะปล่อยอนุภาค PM2.5 และมลพิษอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก(Fuzzy Logic Control – FLC) เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับจัดการกับระบบที่ซับซ้อน ไม่เชิงเส้น และมีความไม่แน่นอน ซึ่งเป็นลักษณะของกระบวนการเผาถ่าน งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมการเผาถ่านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการปล่อย PM2.5 และสอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพอากาศที่เข้มงวดขึ้น โดยจะกล่าวถึงหลักการทำงาน ข้อดี ศักยภาพ ปัญหา และแนวทางการวิจัยและพัฒนาในอนาคต

คำสำคัญ: การเผาถ่าน, PM2.5, ระบบควบคุมฟัซซี่ลอจิก, การควบคุมการเผาไหม้, มลพิษทางอากาศ

Abstract

Charcoal burning remains an important source of energy in many regions, including Thailand. But traditional charcoal production processes often release PM2.5 particles and other pollutants that affect health and the environment. Fuzzy Logic Control (FLC) is a technique suitable for dealing with complex, non-linear, and uncertain systems. which is a characteristic of the charcoal burning process. This research presents a method for applying a fuzzy logic control system to control coal burning to increase efficiency, reduce PM2.5 emissions, and comply with stricter air quality standards. It will discuss working principles, advantages, potential, problems, and future research and development directions.

Keywords: Charcoal, PM2.5, Fuzzy Logic Control, Combustion Control, Air pollution

1. บทนำ

การเผาถ่านเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของชีวมวลภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด [1] กระบวนการผลิตถ่านแบบดั้งเดิมมักขาดการควบคุมที่แม่นยำ ทำให้เกิดการปล่อยอนุภาค PM2.5 ก๊าซเรือนกระจก และสารมลพิษอื่นๆ ในปริมาณมาก [2] อนุภาค PM2.5 เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์อย่างมาก เนื่องจากสามารถแทรกซึมลึกเข้าไปในปอดและกระแสเลือด ก่อให้เกิดปัญหาระบบทางเดินหายใจและหัวใจ

ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับระบบที่ซับซ้อนและมีความไม่แน่นอน โดยอาศัยหลักการของตรรกศาสตร์ฟัซซี่ ซึ่งแตกต่างจากตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมที่ใช้ค่าความจริงเพียงสองค่า (จริงหรือเท็จ) แต่ตรรกศาสตร์ฟัซซี่สามารถจัดการกับค่าความจริงที่เป็นไปได้หลายระดับ ทำให้สามารถจำลองการตัดสินใจของมนุษย์ได้ใกล้เคียงยิ่งขึ้น ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการเผาไหม้ต่างๆ อย่างประสบความสำเร็จ เช่น ในหม้อไอน้ำ [3] และเครื่องยนต์สันดาปภายใน [4] ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพและลดการปล่อยมลพิษ

งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมกระบวนการเผาถ่าน โดยมีเป้าหมายหลักคือการลดการปล่อยอนุภาค PM2.5 และมลพิษอื่นๆ เพื่อให้การผลิตถ่านเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากยิ่งขึ้น

2. หลักการพื้นฐานของการเผาถ่านและการควบคุม

2.1 พื้นฐานของการเผาถ่าน

กระบวนการเผาถ่านแบบดั้งเดิมเกี่ยวข้องกับการให้ความร้อนแก่ไม้หรือชีวมวลอื่นๆ ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนจำกัด ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อน (Pyrolysis) และได้ผลผลิตเป็นถ่าน วิธีการเผาถ่านแบบดั้งเดิม เช่น การเผาในหลุมดินหรือเตาดิน มักมีประสิทธิภาพต่ำและปล่อยมลพิษสูง เนื่องจากควบคุมอุณหภูมิและปริมาณอากาศได้ยาก ประสิทธิภาพและปริมาณการปล่อยมลพิษจากการเผาถ่านได้รับผลกระทบจากปัจจัยสำคัญหลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิในเตาเผา อัตราการไหลของอากาศ ความชื้นของไม้ ชนิดและขนาดของไม้ และระยะเวลาในการเผา การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมเป็นเรื่องท้าทาย เนื่องจากต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ เตาเผาแบบดั้งเดิมยังขาดระบบการตรวจสอบและปรับเปลี่ยนแบบเรียลไทม์ ทำให้ยากต่อการรักษาเงื่อนไขที่เหมาะสมตลอดกระบวนการเผาไหม้[5]

2.2 การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมการเผาไหม้

ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกได้รับการนำไปใช้ในการควบคุมระบบการเผาไหม้ต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการปล่อยมลพิษ และปรับปรุงเสถียรภาพของกระบวนการ ตัวอย่างเช่น ในหม้อไอน้ำ ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกถูกนำมาใช้เพื่อปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-to-Fuel Ratio - AFR) ให้เหมาะสม โดยอาศัยการวัดระดับออกซิเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสีย[3] ในเครื่องยนต์สันดาปภายในระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการฉีดเชื้อเพลิง การจุดระเบิด และการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย เพื่อลดการปล่อยมลพิษและเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องยนต์[4]

การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมการเผาไหม้โดยทั่วไปมีข้อดีหลายประการ เช่น ปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการปล่อยมลพิษ เพิ่มเสถียรภาพและความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน และสามารถปรับตัวให้เข้ากับเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานที่หลากหลายได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญคือการต้องอาศัยความรู้และความเชี่ยวชาญของผู้เชี่ยวชาญในการกำหนดชุดฟัซซี่ ฟังก์ชันสมาชิก และฐานกฎเกณฑ์ของระบบควบคุม

2.3 ศักยภาพและประโยชน์ของการควบคุมการเผาถ่านด้วยฟัซซี่ลอจิก

การนำระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมาใช้ในการควบคุมการเผาถ่านมีศักยภาพอย่างมากในการปรับปรุงประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนี้สามารถควบคุมพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ในเตาเผาได้อย่างต่อเนื่อง เช่น อุณหภูมิ อัตราการไหลของอากาศ และความชื้นของไม้ เพื่อให้กระบวนการเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ การควบคุมอุณหภูมิและอัตราการไหลของอากาศอย่างแม่นยำด้วยระบบฟัซซี่ลอจิกสามารถช่วยลดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการปล่อยอนุภาค PM2.5 และสารมลพิษอื่นๆ การส่งเสริมการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะช่วยลดการปล่อยสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายและอนุภาคต่างๆ สู่บรรยากาศ[4] นอกจากนี้ การควบคุมกระบวนการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทน[2]

การลดการปล่อย PM2.5 จากการเผาถ่านด้วยระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกยังสอดคล้องกับมาตรฐานและข้อบังคับด้านคุณภาพอากาศที่เข้มงวดขึ้นในประเทศไทย ซึ่งรัฐบาลไทยให้ความสำคัญกับการแก้ไขปัญหามลพิษทางอากาศจากแหล่งต่างๆ รวมถึงการเผาในที่โล่งและการปล่อยมลพิษจากอุตสาหกรรม การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้จะช่วยให้ผู้ผลิตถ่านสามารถลดการปล่อย PM2.5 และปฏิบัติตามกฎหมายที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การลดการปล่อยมลพิษยังอาจนำไปสู่ผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจ เช่น การได้รับคาร์บอนเครดิตและการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ถ่านที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.4 การตรวจสอบและควบคุมพารามิเตอร์ด้วยฟัซซี่ลอจิก

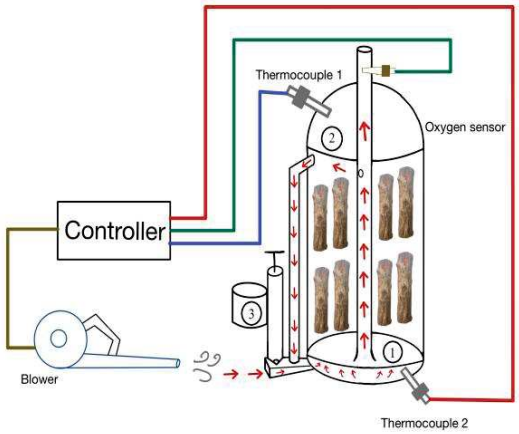
ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับการเผาถ่านจำเป็นต้องตรวจสอบและควบคุมพารามิเตอร์สำคัญหลายประการอย่างต่อเนื่อง พารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่

- **อุณหภูมิ:** การตรวจสอบอุณหภูมิในหลายจุดภายในเตาเผาเพื่อให้แน่ใจว่ามีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ
- **อัตราการไหลของอากาศ:** การควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่เข้าสู่เตาเผาเพื่อควบคุมปริมาณออกซิเจน โดยควบคุมจากกำลังของโบลเวอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม
- **การป้อนเชื้อเพลิงเสริม:** ในการรักษาอุณหภูมิในห้องเผาให้คงที่เพื่อให้เกิดการเผาอย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องมีการใช้เชื้อเพลิงเสริม

เช่นน้ำมันหรือฟืน มาช่วยในการรักษาอุณหภูมิของห้องเผาไหม้

- **ความเข้มข้นของออกซิเจน:** การตรวจสอบความเข้มข้นของออกซิเจนหลังจากเผาไหม้ สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับความสมบูรณ์ของการเผาไหม้

เซ็นเซอร์ที่เหมาะสม เช่น เทอร์โมคัปเปิล และเซ็นเซอร์ออกซิเจน จะถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบพารามิเตอร์เหล่านี้ ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนากฎเกณฑ์ของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก ซึ่งจะกำหนดการทำงานของระบบควบคุมตามสภาวะต่างๆ ในเตาเผา

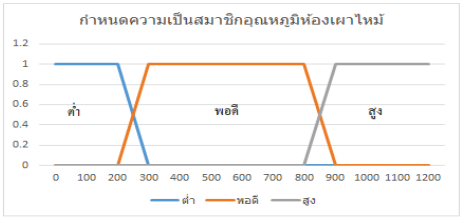


รูปที่ 1 แบบจำลองระบบควบคุมการเผาถ่าน

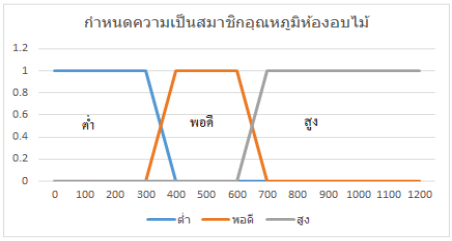
2.5 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซี่

การนำระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกไปใช้ในการเผาถ่านจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งของเซนเซอร์ต่างๆ เช่น เทอร์โมคัปเปิล และเซ็นเซอร์ออกซิเจน โดยทำแหน่งที่ 1 และ 2 ในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นห้องเผาไหม้และห้องอบไม้ตามลำดับ

ในการประยุกต์ใช้ฟัซซี่ลอจิกงานวิจัยนี้เลือกใช้อุณหภูมิจากห้องเผาไหม้ และห้องอบไม้รวมทั้งเซ็นเซอร์ออกซิเจน มาเป็นปัจจัยในการควบคุมด้วยฟัซซี่ รวมถึงการพัฒนาฐานกฎเกณฑ์ฟัซซี่ที่ครอบคลุมและแม่นยำสำหรับสภาวะการเผาไหม้ที่หลากหลาย การประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ดังแสดงในรูปที่ 2 ความเป็นความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องอบไม้ และตารางที่ 1 การควบคุมระดับของโบลเวอร์ด้วยกฎของฟัซซี่ลอจิก



ก



ข

รูปที่ 2 ความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องอบไม้

ตารางที่ 1 การควบคุมระดับของโบลเวอร์ด้วยกฎของฟัซซี่ลอจิก

กฎที่	การเปลี่ยนอุณหภูมิห้องอบ	การเปลี่ยนอุณหภูมิห้องเผาไหม้	การปรับโบลเวอร์
1	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
2	เพิ่มขึ้น	คงที่	คงที่
3	เพิ่มขึ้น	ลดลง	คงที่
4	คงที่	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
5	คงที่	คงที่	คงที่
6	คงที่	ลดลง	คงที่
7	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
8	ลดลง	คงที่	คงที่
9	ลดลง	ลดลง	ลดลง

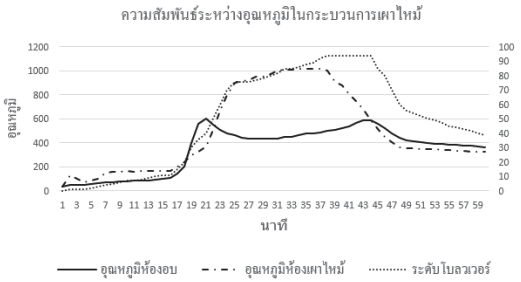
2.6 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

หลังจากได้ออกแบบชุดเตาเผาถ่านแบบไร้ควันและพัฒนาระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว ผลการทำงานของเตาเผาโดย และอุณหภูมิภายในเตาเผาและห้องอบไม้แสดงให้เห็นดังในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ ในการเผาไหม้ของระบบ 1 รอบโดยใช้ฟืนแห้งจากไม้กฐินและไม้ตะขบน้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัม จะใช้เวลาในกระบวนการประมาณ 60 นาที ซึ่งค่าอุณหภูมิในห้องเผาไหม้และห้องอบไม้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4 โดยที่ช่วงอุณหภูมิในการทำงานของ

ห้องเผาไหม้อยู่ในช่วงประมาณ 200- 1000 องศาเซลเซียสและทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องอบฟืนให้อยู่ในช่วงประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีควันออกจากท่อไอเสียของเตา และค่าของเซ็นเซอร์ออกซิเจนที่ตำแหน่งท่อไอเสียแสดงค่าของปริมาณออกซิเจนเหลือจำนวนมากพอหลังจากกระบวนการเผาไหม้



รูปที่ 3 เตาเผาถ่านแบบไร้ควันขณะทำงาน



รูปที่ 4 อุณหภูมิห้องอบ ห้องเผาไหม้ และระดับพลังงานของโบลเวอร์



รูปที่ 5 ถ่านที่ได้จากระบบควบคุมการเผาด้วยฟัซซี่ลอจิก

การทำให้ห้องเผาไหม้สามารถรักษาอุณหภูมิได้สูง เป็นเพราะระบบควบคุมแบบฟัซซีทำการควบคุมปริมาณอากาศโดยแปรผันตามกำลังของโบลเวอร์ให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีในระบบ และห้องเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงนี้สามารถจะสลายพันธะของสารพิษต่างๆรวมทั้ง PM2.5 ทำให้สารดังกล่าวสามารถถูกเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์

ถ่านที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 5 เป็นถ่านที่มีคุณภาพสูงสังเกตุได้จากผิวถ่านจะไม่มีคราบของขี้เถาซึ่งแสดงว่าถ่านได้เกิดการเผาไหม้แบบไร้อากาศอย่างสมบูรณ์

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกในการควบคุมการเผาถ่านแบบไร้อากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเผาไร้อากาศ ลดการปล่อย PM2.5 ทำให้สอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพอากาศที่เข้มงวดมากขึ้นในปัจจุบัน

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนิสิตนักศึกษาทุกท่านที่มีส่วนในความสำเร็จนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] E.B. Dayoub, Z. Toth, G. Soos and A. Anda, "Chemical and Physical Properties of Selected Biochar Types and a Few Application Methods in Agriculture," in Journals Agronomy 2024, vol. 14, issue 11, 2540, doi: https://doi.org/10.3390/agronomy14112540.

[2] J. Sun, Z. Shen, Y. Zhang, Q. Zhang, F. Wang, X. Chang, Y. Lei, H. Xu, J. Cao, N. Zhang, S. Liu and X. Li, “Effects of biomass briquetting and carbonization on PM2.5 emission from residential burning in Guanzhong Plain,” in ELSEVIER Journal, Fuel, vol. 244, pp. 379-387, 2019.

[3] T. Wasakron and S. Ratchaphon, “ Use of Fuzzy Logic to Control Air Intake for Increase in Boiler Efficiency,” in Applied Machanics and Materials, vol. 564, pp. 275-280/ISSN:1662-7482.

[4] M. Nekooei, J. Koto and A. Priyanto, “ A Simple Fuzzy Logic Diagnosis System for Control of Internal Combustion Engines," in Jurnal Teknologi, May, 2015, doi: 10.11113/jt.v74.4652.

[5] H. Gomaa and M. Fathi, “ A Simple Charcoal Kiln,” ICEHM2000, Cairo University, Egypt, Sep, 2000, pp167-174.

ประวัติผู้เขียนบทความ



สุรชาติ เหล็กงาม อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ พลังงานทดแทน ระบบอัตโนมัติหุ่นยนต์ และปัญญาประดิษฐ์

รถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน

Solar Cell and Hybrid Wireless Remote Control Lawn Mower

ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล[1] ประสิทธิ์ ศรีนคร[2] แวอารีฟ แวอาลี[3] อิดริส เร่งหวัง[3] ซุลกิฟลี บาโละ[3] และฟิกรี ดีเยาะ[3]

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

[2]อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

[3]นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง โทรศัพท์ 0-7520-4057-8 Email: p_areekul@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอโครงงานเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน ซึ่งเป็นรถตัดหญ้าขับเคลื่อน 4 ล้อ ด้วยมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์ และใช้มอเตอร์ใบพัดตัดหญ้า 48 โวลต์ โดยรับไฟจากแบตเตอรี่แบบ แห้งขนาด 24 โวลต์ 20 แอมป์ จำนวน 1 ก้อน และแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 24 แอมป์ จำนวน 2 ตัว ที่ต่อขนานกัน มีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 20 วัตต์ 18 โวลต์ 1.11 แอมแปร์ ต่อเข้าไปเลี้ยงไฟฉุกเฉินเพื่อแสดงการทำงานของรถตัดหญ้า ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบนของรถตัดหญ้า ทำมุม 13 องศา กับแนวราบ โดยส่วนประมวลผลและส่วนควบคุมการทำงานของระบบจะใช้ชุดวงจรบอร์ด ขับมอเตอร์ BTS7960 นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบระดับแรงดันของแบตเตอรี่ตลอดเวลา ซึ่งจากผลการทดสอบรถตัดหญ้า พลังงานแสงอาทิตย์ สามารถควบคุมได้ระยะทางไม่เกิน 200 เมตร โดยที่สามารถลดมลภาวะทางอากาศ และประหยัดค่าเชื้อเพลิง

Abstract

This paper presents a project on the design and construction of a lawn mower with a solar cell wireless remote control and integration, which is a 4-wheel lawn mower with a 24-volt DC motor and a 48-volt lawn mower blade motor, powered by a 24-volt, 20-amp dry-cell battery and two 12-volt, 24-amp batteries connected in parallel. A 20-watt, 18-volt, 1.11-amp solar panel is used to provide emergency lighting to indicate the lawn mower's operation, which is installed on top of the lawn mower at an angle of 13 degrees to the horizontal. The processing and control of the system use a BTS7960 motor drive circuit board. In addition, the battery voltage level is monitored at all times. From the results of the solar lawn mower test Can be controlled at a distance of no more than 200 meters, which can reduce air pollution and save fuel costs.

1. บทนำ

ผู้ดำเนินโครงงานเห็นถึงความสำคัญของทรัพยากรธรรมชาติซึ่งในปัจจุบันนั้นเทคโนโลยีของเครื่องตัดหญ้าจะมีลักษณะการใช้งานแบบเครื่องตัดหญ้ารถเข็น และแบบใช้คนสะพายเครื่องตัดหญ้า ซึ่งทรัพยากรที่นำมาใช้ คือ น้ำมัน ซึ่งเป็นพลังงานที่สิ้นเปลือง มีราคาสูง อีกทั้งส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน จากลักษณะการใช้งานข้างต้น ส่งผลให้ผู้ใช้งานเกิดอาการเมื่อยล้าและอาจเกิดอันตรายจากการใช้งานอย่างไม่ระมัดระวัง นอกจากนี้การอยู่กลางแจ้งที่แดดร้อนจัดเป็นเวลานานๆ ทำให้ผู้ใช้งานเกิดอาการหน้ามืดและเป็นลมได้

จากข้อสังเกตถึงปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นที่มาของแนวคิดที่สร้างรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษา และพัฒนาเป็นรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสานอย่างอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพ สูงต่อไป

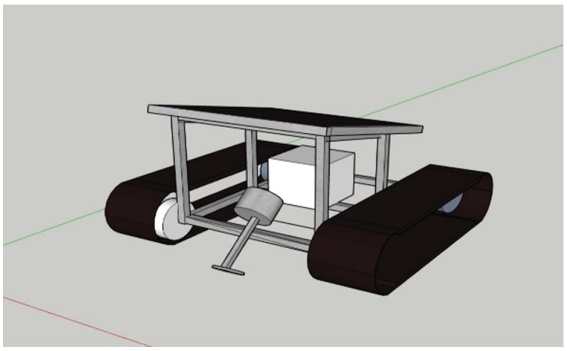
2. ทฤษฎี

พลังงานหมุนเวียน คือ การนำพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำกลับมาใช้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด และ สามารถนำมาต่อยอดกับสิ่งประดิษฐ์แล้วไม่มีผลเสียต่อมลภาวะของโลก ในปัจจุบันเรื่องพลังงานเป็น ปัญหาใหญ่ของโลก และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อมวลมนุษยชาติมากขึ้นทุกที การไฟฟ้าฝ่าย ผลิตแห่ง ประเทศไทยก็เป็นอีกหนึ่งหน่วยงานที่ให้ความสำคัญในการร่วมกันหาหนทางแก้ไข ทำการศึกษาค้นคว้า สำรวจ ทดลอง ติดตามเทคโนโลยีอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการนำพลังงาน ทดแทนและเทคโนโลยีใหม่ๆ ในด้านพลังงานทดแทนเข้ามาใช้ใน ประเทศไทยต่อไป

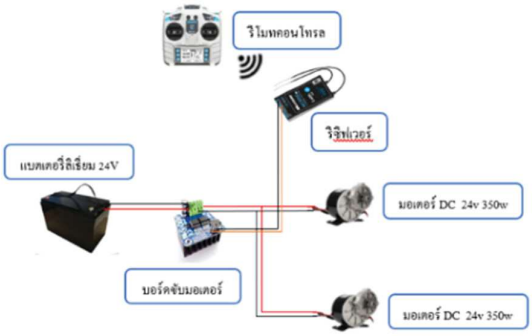
3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบระบบควบคุม

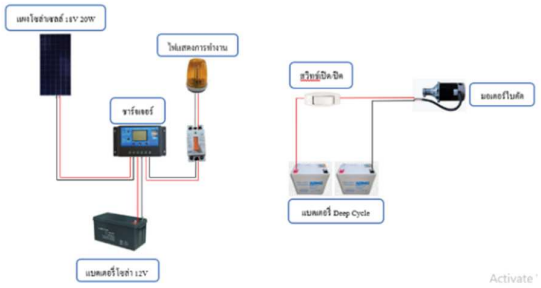
ระบบควบคุมการทำงานของรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน โดยใช้รีโมทบังคับวิทยุที่ส่งสัญญาณไปยังตัวรีซีฟเวอร์ ซึ่งตัวรีซีฟเวอร์จะไปควบคุมบอร์ดขับมอเตอร์ BTS7960 เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้รถเคลื่อนที่ตามต้องการ การออกแบบจะต้องนำอุปกรณ์ที่ต่อร่วมให้สามารถใช้งานได้ เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุด



รูปที่ 1 โครงสร้างรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน



รูปที่ 2 ระบบควบคุมของรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน



รูปที่ 3 ระบบควบคุมการทำงานมอเตอร์ใบตัดและไฟแสดงสถานการณ์ทำงาน

3.2 การคำนวณหาขนาดของแบตเตอร์รี่

ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการออกแบบระบบขับเคลื่อนและระบบใบตัดหญ้านั้นได้เลือกใช้มอเตอร์ DC 24 โวลต์ 350 วัตต์ 2 ตัว และมอเตอร์ DC 48 โวลต์ 5,000 วัตต์ 1 ตัว และ ใช้แบตเตอรี่ 24 โวลต์ 48 แอมแปร์ต่อชั่วโมง 2 ตัวต่อขนานกัน จะได้เท่ากับ 96 แอมแปร์ต่อชั่วโมง



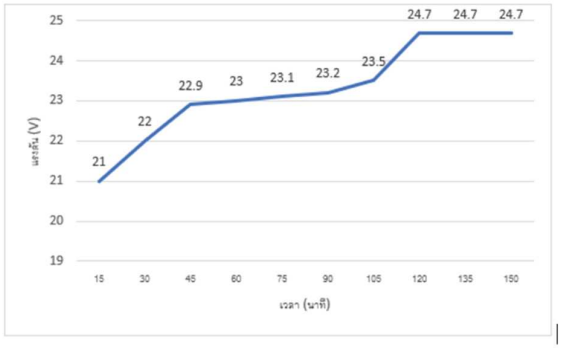
รูปที่ 4 รถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสาน

4. ผลการวิจัย

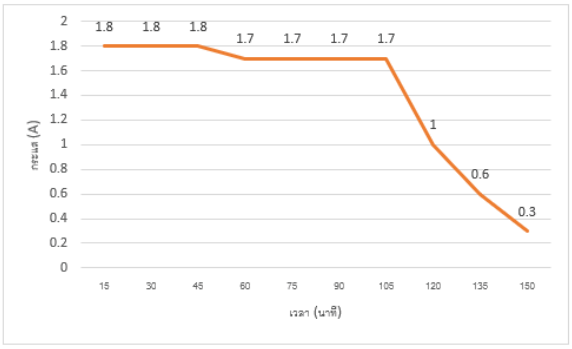
4.1 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่ขับเคลื่อน

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบของระบบการชาร์จแบตเตอรี่ใช้ในการขับเคลื่อนเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขนาดชาร์จไฟจากไม่มีพลังงานในแบตเตอรี่จนแบตเตอรี่เต็ม และทำการเก็บผลบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 4-1

เวลา (นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)
15	21.0	1.8	37.8
30	22.0	1.8	39.6
45	22.9	1.8	41.22
60	23.0	1.7	39.1
75	23.1	1.7	39.27
90	23.2	1.7	39.44
105	23.5	1.7	39.95
120	24.7	1.0	24.4
135	24.7	0.6	14.82
150	24.7	0.3	7.41
เฉลี่ย	23.28	1.41	32.23



ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ลิเธี่ยมขนาด 24 โวลต์ 20 แอมป์ในขณะชาร์จที่เวลาต่างๆ ในช่วงเวลาต่างๆ

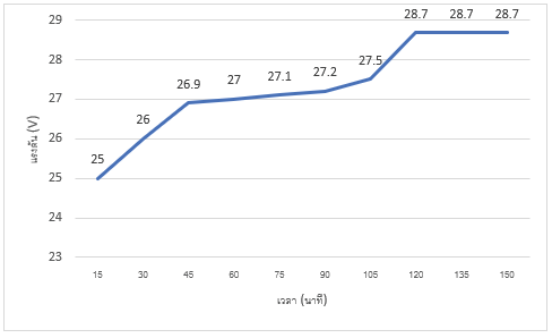


ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ลิเธี่ยมขนาด 24 โวลต์ 20 แอมป์ ในขณะชาร์จที่เวลาต่างๆ ในช่วงเวลาต่างๆ

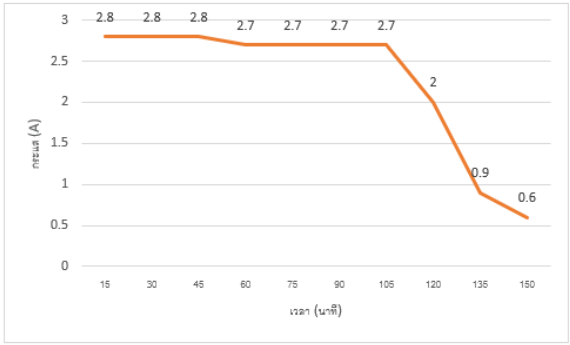
4.2 การทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่มอเตอร์ใบตัด

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบของระบบการชาร์จแบตเตอรี่ของมอเตอร์ใบตัดเพื่อหาแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะชาร์จไฟจากไม่มีพลังงานในแบตเตอรี่จนแบตเตอรี่เต็มครั้งที่ 1 และทำการเก็บผลบันทึกค่าที่ได้ลงในตารางที่ 4-2

เวลา (นาที)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)
15	25.0	2.8	70
30	26.0	2.8	72.8
45	26.9	2.8	75.32
60	27.0	2.7	75.9
75	27.1	2.7	73.17
90	27.2	2.7	73.44
105	27.5	2.7	74.25
120	28.7	2.0	57.4
135	28.7	0.9	25.83
150	28.7	0.6	17.22
เฉลี่ย	27.8	2.27	61.533



ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ลิเธี่ยมขนาด 12 โวลต์ 24 แอมป์ ในขณะชาร์จที่เวลาต่างๆ ในช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ลิเธี่ยมขนาด 12 โวลต์ 24 แอมป์ในขณะชาร์จที่เวลาต่างๆ ในช่วงเวลาต่างๆ

4.3 การทดสอบการขับเคลื่อน

การทดสอบการขับเคลื่อนของรถตัดหญ้า โดยการขับเคลื่อนจะบันทึกผลในแต่ละช่วงเวลา 10 นาที และบันทึกผลกระแสที่ใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 4-3 การทดสอบการขับเคลื่อน

เวลา (นาที)	กระแส (A)
10	1.8
20	3.6
30	5.4
40	7.2
50	9
60	10.8

4.4 การทดสอบการทำงานใบตัดของรถ

การทดสอบการทำงานใบตัดของรถ โดยจะทำการตัดหญ้าและบันทึกผลในแต่ละช่วงเวลา 10 นาที และบันทึกผลกระแสที่ใช้ไปในแต่ละช่วงเวลา

ตารางที่ 4-4 การทดสอบการตัดหญ้า

เวลา (นาที)	กระแส (A)
10	2.8
20	5.6
30	8.4
40	11.2
50	14
60	16.8

จากการทดสอบการตัดหญ้าจะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลาที่ 10 นาที แรกจะกินกระแสไฟฟ้า 2.8 แอมป์ ในช่วงเวลาที่ 20 นาที จะกินกระแสไฟฟ้า 5.6 แอมป์ ในช่วงเวลาที่ 30 นาที จะกินกระแสไฟฟ้า 8.4 แอมป์ ในช่วงเวลาที่ 40 นาที จะกินกระแสไฟฟ้า 11.2 แอมป์ ในช่วงเวลาที่ 50 นาที จะกินกระแสไฟฟ้า 14 แอมป์ ในช่วงเวลาที่ 60 นาที จะกินกระแสไฟฟ้า 16.8 แอมป์ สรุปได้ว่าเมื่อทำการตัดหญ้าแบตเตอรี่ของมอเตอร์ตัดหญ้าจะกินกระแสไฟฟ้าไปเรื่อยๆ

5. สรุปและอภิปรายผล

โดยจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาและได้ออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสานได้มีการทดสอบประสิทธิภาพ และหลักการทำงานของแต่ละส่วนให้มีความสัมพันธ์กัน ก่อนที่จะนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าระบบ ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 24 แอมป์แปร์ต่อชั่วโมง 2 ตัว ต่อกับมอเตอร์ใบตัดขนาด 48 โวลต์ 5,000 วัตต์ และแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ 20 แอมแปร์ต่อชั่วโมง 1 ตัว ต่อกับมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 24 โวลต์ 350 วัตต์ 2 ตัว และแผงโซล่าเซลล์ขนาด 18 โวลต์ ต่อเข้ากับไฟแสดงสถานะการทำงานขนาด 12 โวลต์ โดยรถสามารถใช้ได้นานต่อเนื่อง โดยการทดสอบประสิทธิภาพของรถตัดหญ้าให้ได้ตามที่วางไว้ และได้ทดสอบตัดหญ้าแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน หญ้านวลน้อย หญ้าญี่ปุ่น หญ้าเบอร์มิวดา หญ้าขน หญ้ามาเลเซีย เป็นต้น

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ในการเปรียบเทียบต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์และผสมผสานกับการตัดหญ้าแบบปกติมีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิง รถตัดหญ้าใช้พลังงานไฟฟ้าจากการชาร์จไฟฟ้าในบ้านช่วยในการลดพลังงานเชื้อเพลิงและแรงงานคน ส่วนในการตัดแบบดั้งเดิมต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงและใช้แรงงานคน

6.2 รถขับเคลื่อนตัดหญ้าด้วยรีโมทไร้สายระบบโซล่าเซลล์มีขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 70 เซนติเมตร สามารถตัดได้ไม่เกิน 50 เซนติเมตร และสามารถตัดหญ้าแต่ละชนิดได้ดี เช่น หญ้านวลน้อย หญ้าเบอร์มิวด้า หญ้ามาเลเซีย หญ้าญี่ปุ่น เป็นต้น รถตัดหญ้าใช้งานในพื้นที่เรียบอย่างเช่น สนามฟุตบอล สนามหญ้าหน้าบ้าน เป็นต้น

6.3 เพิ่มตัวส่งสัญญาณเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ตัดหญ้าเพื่อง่ายต่อการใช้งาน เพิ่มระยะควบคุมรถตัดหญ้าเพื่อให้ได้ควบคุมตัดหญ้าในพื้นที่ที่กว้างกว่าเดิม

6.4 ความแตกต่างกันระหว่างการมีระบบโซล่าเซลล์กับผสมสานการมีระบบโซล่าเซลล์กับผสมผสา นจะช่วยในเรื่องของการทำงานให้มีประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้นและ ส่งเสริมเทคโนโลยีเกี่ยวกับพลังงานทดแทน

6.5 การทดสอบของรถตัดหญ้าแต่ละครั้งใช้รูปแบบเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] กระทรวงพลังงาน.(2559). **ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย จาก** : http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com (17 มกราคม 2568)

[2] ต้นแบบรถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (นายวรรณรัตร์ สันตาวา นายอภิสิทธ์ พรหมเมือง และอาจารย์ จันทิรา เจือกโว้น) ปี พ.ศ. 2563.
เข้าได้จาก : ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง (23 มีนาคม 2568)

[3] รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2566 – Pollution Control Department
เข้าถึงได้จาก : https://www.pcd.go.th/publication/32171/ (10 มกราคม 2568)

[4] รถตัดหญ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ควบคุมด้วยรีโมทคอนโทรล
เข้าได้จาก : https://www.technologychaoban.com/young-farmer/article_42049 (5 กุมภาพันธ์ 2568)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชื่อ: นายปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล
คณะวิศวกรรศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรังฃ E-mail: p_areekul@yahoo.com



ชื่อ: นายประสิทธิ์ ศรีนคร
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง E-mail: prasit.s@rmutsv.ac.th



ชื่อ: นายแวอารีฟ แวอาลี
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง E-mail waearif.w@rmutsvmail.com



ชื่อ: นายอิดริส เร่งหวัง
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง E-mail: aiddris.r@rmutsvmail.com



ชื่อ: นายซุลกิฟลี บาโละ
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง E-mailsulkiflee.b@rmutsvmail.com



ชื่อ: นายฟิกรี ดีเยาะ
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง E-mail: fikri.d@rmutsvmail.com

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วย ระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน

Parcel Security Locker by Hybrid Power

ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล[1] สุรศักดิ์ เกตบุญนาค[2] ธนภูมิ มูลิกัณฑ์[3] และเภาพิภัสร์ ลิ่มสายหัว[3]
[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[2]อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
[3]นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง โทรศัพท์ 0-7520-4057-8 Email: p_areekul@yahoo.com

บทคัดย่อ

โครงงานตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน ได้รับการออกแบบให้มีขนาด 0.66 เมตร x 0.76 เมตร x 1.36 เมตร โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้สามารถรักษาความปลอดภัยสำหรับพัสดุภายในตู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบจะใช้แหล่งพลังงานจากหลายแหล่ง ได้แก่ ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์, พลังงานจากแผงโซล่าเซลล์ขนาด 40 วัตต์ และแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ โดยมีการติดตั้งกล้องเพื่อตรวจจับภาพตลอดเวลา รวมทั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับควันที่สามารถแจ้งเตือนภัยได้ โดยใช้บอร์ด ESP32 ที่ประมวลผลข้อมูลผ่านโปรแกรม Arduino ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ตู้รักษาความปลอดภัยนี้จะสามารถทำงานได้ตลอดเวลาโดยอาศัยพลังงานจากแผงโซล่าเซลล์และไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ร่วมกัน โดยใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยประมาณ 0.7 แอมป์ โครงงานนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง และมีศักยภาพในการพัฒนาและขยายผลเพื่อเสริมสร้างความปลอดภัยในด้านอื่นๆ ในอนาคต

Abstract

The project of a parcel security cabinet with an integrated electrical system has been designed with dimensions of 0.66 meters x 0.76 meters x 1.36 meters, with the objective of ensuring the security of parcels within the cabinet. The system utilizes multiple energy sources, including 220 V AC, a 40 W solar panel, and a 12 V 40 A battery. It is equipped with a camera for continuous image monitoring and smoke detection sensors that can trigger alerts, using an ESP32 board to process data through the Arduino program. The outcome is that the security cabinet operates continuously, utilizing both energy from the solar panel and 220 V AC simultaneously, with an average current consumption of approximately 0.7 A. This project is fully functional and has the potential for further development and expansion to enhance security in other areas in the future

1. บทนำ

ในปัจจุบันการสั่งพัสดุออนไลน์นั้นได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากความสะดวกสบายบริการทางเลือกการขนส่งและความปลอดภัยในการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ผู้คนหันมาสั่งซื้อพัสดุออนไลน์แทนที่จะออกไปซื้อเองกัน เพื่อเป็นการประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางกันเพิ่มมากขึ้น

แต่ถึงในขั้นการขนส่งนั้นจะมีความปลอดภัย ขั้นตอนการรับพัสดุนั้นกลับมีบางครั้งที่พัสดุบางชิ้นเกิดการสูญหายและยิ่งมีโอกาศเกิดเหตุการณ์แบบนี้มากกับพื้นที่ส่วนรวมไม่ว่าจะเป็นเกิดการหยิบพัสดุผิดชิ้น การที่ผู้ส่งนั้นส่งในสถานที่ไม่ตรงกับที่ผู้รับต้องการหรือไม่ทราบว่าพัสดุชิ้นนั้นมาถึงแล้วในบางเหตุการณ์ ทำให้เกิดความเสียหายทางทรัพย์สินและหาผู้รับผิดชอบไม่ได้ ตัวอย่างปัญหาที่ทำให้ผู้วิจัยเห็นได้ชัดที่สุดคือช่วงก่อนหน้านี้ได้เกิดเหตุการณ์พัสดุหายหรือการหยิบพัสดุผิดขึ้นบ่อยครั้งภายในหอพักมีนกร ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง อีกทั้งในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมากกลุ่มผู้วิจัยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ การอนุรักษ์พลังงาน พลังงานทดแทน และการจัดการพลังงานมาด้วยเป็นระยะเวลาหนึ่ง กลุ่มผู้วิจัยจึงได้คิดค้นนวัตกรรมที่จะช่วยลดปัญหาของการรับพัสดุออนไลน์และช่วยรักษาความปลอดภัยให้กับพัสดุ โดยการสร้างตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน ที่นอกจากจะช่วยในเรื่องของการรับพัสดุแล้วยังสามารถรักษาความปลอดภัยให้กับพัสดุภายใน เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นในภายหลัง ไม่ว่าจะเป็น การลักขโมย เหตการณ์ไฟไหม้ หรือหยิบพัสดุผิดชิ้น เป็นต้น ตัวตู้จะมีการใช้แหล่งพลังงานจากหลายแหล่งพลังงานเพื่อเป็นการศึกษาเรื่องพลังงานทางเลือกและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายที่อาจจะเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งตู้ตัวนี้ในพื้นที่นั้น ๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พัสดุ

พัสดุ คือ สิ่งของหรือสินค้าที่ถูกบรรจุในบรรจุภัณฑ์และส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยมักจะใช้ในการขนส่งผ่านทางไปรษณีย์หรือบริษัทขนส่งต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า หนังสือ หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ หรืออาจจะเป็น

เอกสารที่ต้องการส่งไปยังผู้รับด้วยก็ได้ ในบางครั้ง พัสดุก็สามารถหมายถึงสิ่งที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ เช่น กล่องพัสดุ หรือพัสดุขนาดใหญ่ที่ต้องการการขนส่งแบบพิเศษก็ได้

2.2 พลังงานทดแทน

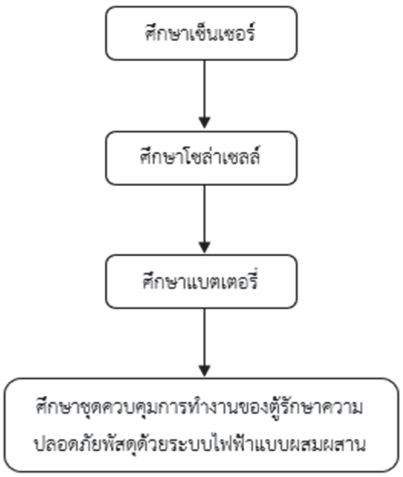
พลังงานทดแทน คือ พลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล อาทิ ถ่านหิน ปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งกำลังจะหมดไปในอนาคตอันใกล้ อีกทั้งยังปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมหาศาล ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกและปัญหาโลกร้อน [1] โดยทั่วไปแล้ว พลังงานทดแทนจะหมายถึงพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติและสามารถใช้ทดแทนพลังงานเดิมได้อย่างไม่จำกัด ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง สามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานและช่วยลดปัญหามลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] –[4].

2.3 ระบบควบคุม IoT

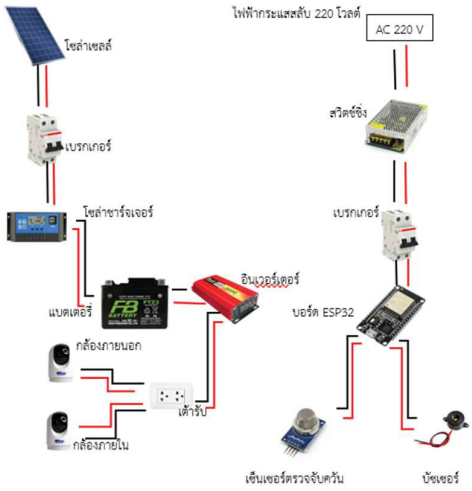
IoT หรือ Internet of Things(อินเตอร์เน็ตในทุกสิ่ง) คือ ระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ระบบ IoT นี้มีความสำคัญในการเชื่อมโยงอุปกรณ์ในโลกดิจิทัล [5] อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต ทำให้เกิดการควบคุมและการจัดการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่ง IoT มีจุดประสงค์ในการช่วยให้ผู้บริโภคใช้ชีวิตได้ง่ายขึ้น สะดวกสบาย และเพื่อสุขภาพที่ดีขึ้น

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

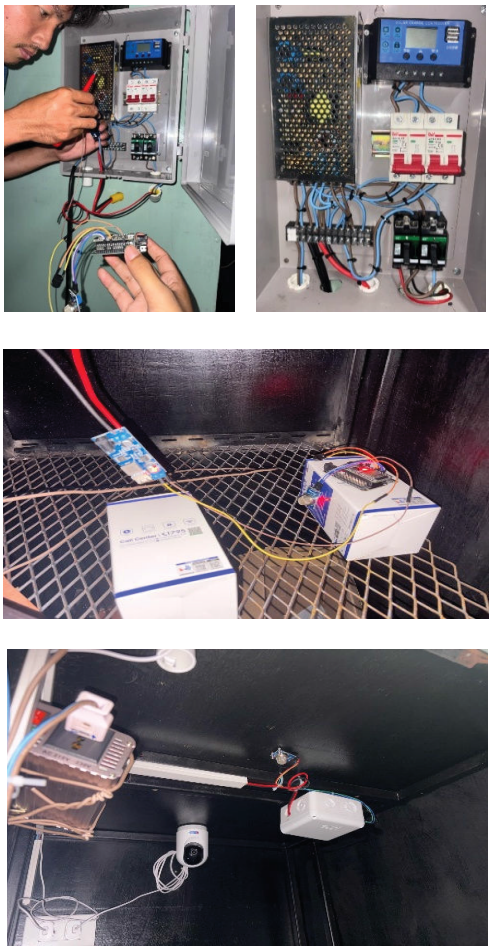
3.1 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุม



รูปที่ 1 ไดอะแกรมศึกษาข้อมูลของตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุ



รูปที่ 2 ระบบควบคุม



รูปที่ 3 การติดตั้งระบบควบคุมและการทำงาน

3.2 การเขียนโปรแกรม Arduino สำหรับเซ็นเซอร์

```
sketch_mar14a.ino
#define MQ2_PIN 35  // ขา Analog ของ MQ-2 (ใช้ A0 ใน Arduino)
#define BUZZER_PIN 25  // ขา Buzzer
#define LED_PIN 26  // ขา LED แจ้งเตือน

int threshold = 1000;  // กำหนดค่าระดับควันที่ทำให้ Buzzer และ LED ทำงาน


void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(MQ2_PIN, INPUT);
    pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
}

void loop() {
    int sensorValue = analogRead(MQ2_PIN);  // อ่านค่าจากเซ็นเซอร์
    Serial.print("MQ-2 Value: ");
    Serial.println(sensorValue);

    if (sensorValue > threshold) {  // ถ้ามีควันมากกว่าค่าที่กำหนด
        digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);  // เปิดเสียง Buzzer
        digitalWrite(LED_PIN, HIGH);  // เปิด LED แจ้งเตือน
    } else {
        digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);  // ปิดเสียง Buzzer
        digitalWrite(LED_PIN, LOW);  // ปิด LED แจ้งเตือน
    }

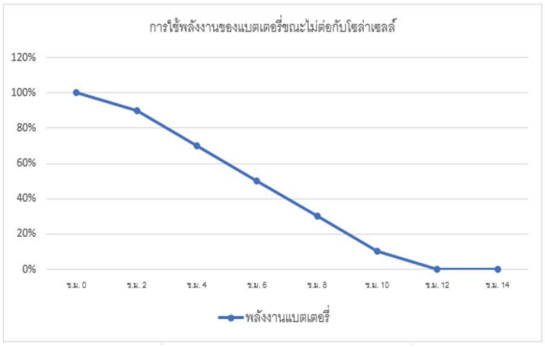
    delay(1000);  // อ่านค่าทุกๆ 1 วินาที
}
```

รูปที่ 4 หน้าจอการออกแบบโปรแกรม Arduino

4. ผลการวิจัย

4.1 การทดสอบการใช้พลังงานของแบตเตอรี่

ในการทดสอบการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ มีเงื่อนไขการทดลอง คือ จ่ายพลังงานให้กับวงจรไฟฟ้าภายในตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน โดยที่ยังไม่ต้องต่อแบตเตอรี่เข้ากับโซล่าเซลล์เพื่อชาร์จเพื่อดูและบันทึกผลว่าแบตเตอรี่ใช้งานได้กี่ชั่วโมง



รูปที่ 5 ผลการทดสอบการใช้พลังงานของแบตเตอรี่

4.2 การทดสอบการชาร์จไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์เข้าสู่แบตเตอรี่

ในการทดสอบการชาร์จไฟฟ้าจากโซล่าเซลล์เข้าสู่แบตเตอรี่นั้นจะใช้การคำนวณเพื่อหาเวลาที่ใช้ในการชาร์จไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่จนเต็ม โดยหาได้ดังนี้

ข้อมูลที่มีอยู่ คือ แบตเตอรี่ขนาด 12 V 40 A
แผงโซล่าเซลล์ขนาด 40 W
วิธีการคำนวณ คือ แบตเตอรี่ 12 V 40 Ah = 12 x 40 = 480 Wh
โซล่าเซลล์ขนาด 40 W จะใช้เวลาในการชาร์จ 480/40 = 12 ช.ม.
หากคิดค่าสูญเสียใน โซล่าชาร์จเจอร์ อีก 10%
จะใช้เวลาในการชาร์จ 480/30 = 16 ช.ม.

4.3 การทดสอบการใช้ไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V

ในการทดสอบการใช้ไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะใช้การคำนวณเพื่อหาการใช้พลังงานไฟฟ้าในวงจรของตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน โดยหาได้ดังนี้

ข้อมูลที่มีอยู่ คือ ค่า W ในวงจร 12 x 0.7 = 8.4 W
ใช้งานเป็นเวลา 24 ช.ม.
การใช้พลังงาน คือ 8.4 x 24 = 201.6/1000 = 0.2 หน่วย

4.4 การทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์จับควันและบัซเซอร์

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ในการตรวจจับควันและแจ้งเตือนของบัซเซอร์

ปริมาณควันที่ใช้	เซ็นเซอร์ทำงาน	เซ็นเซอร์ไม่ทำงาน	หมายเหตุ
ควันยากันยุง	✓		จำเป็นต้องจ่อควันใกล้ๆ เซ็นเซอร์
ควันเผากระดาษ	✓		จำเป็นเผาในปริมาณที่เยอะ
ควันเผากระดาษลัง	✓		
ควันเผายางรถยนต์	✓		

4.2 การทดสอบการทำงานของกล้องวงจรปิด

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการทำงานของกล้องวงจรปิดของกล้องภายนอก

ช่วงเวลา	สถานะการทำงาน	หมายเหตุ
กลางวัน	ปกติ	
กลางคืน (มีแสงสว่าง)	ปกติ	
กลางคืน (ไม่มีแสงสว่าง)	ปกติ(มองเห็นในที่มืด)	

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการทำงานของกล้องวงจรปิดของกล้องภายใน

ช่วงเวลา	สถานะตู้	สถานะการทำงาน	หมายเหตุ
กลางวัน	เปิดตู้	ปกติ	
กลางวัน	ปิดตู้	ปกติ	
กลางคืน	เปิดตู้	ปกติ	
กลางคืน (ไม่มีแสงสว่าง)	เปิดตู้	ปกติ (มองเห็นในที่มืด)	
กลางคืน	ปิดตู้	ปกติ (มองเห็นในที่มืด)	

5. สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากชุดตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพและรูปแบบของพลังงานแสงอาทิตย์ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อช่วยลดปัญหากรณีของการขาดแคลนพลังงานในอนาคต และช่วยบรรเทามลพิษต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานในปัจจุบัน จากผลการทำสอบในการชุดศึกษาและหาประสิทธิภาพของระบบตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน ซึ่งใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จากโซล่าเซลล์นำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปเป็นพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบของตู้รักษาความปลอดภัยพัสดุด้วยระบบไฟฟ้าแบบผสมผสาน ทั้งนี้ ในการทดลอง การสับเปลี่ยนพลังงานของอุปกรณ์ภายในวงจร ทำให้จำเป็นต้องเปลี่ยนการออกแบบและรูปแบบการทำงานใหม่ ตลอดจนไม่สามารถออกแบบตามความต้องการได้ทั้งหมด ซึ่งสามารถวางแผนและแก้ไข ในการเลือกใช้อุปกรณ์สับเปลี่ยนพลังงานภายในให้ดีขึ้น และ เปลี่ยนวัสดุภายนอกให้แข็งแรงกว่าเดิมเพื่อความปลอดภัยมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแบตเตอรี่(ออนไลน์)
เข้าถึงได้จาก : uatucm473973.pdf
(เข้าค้นหาเมื่อ 22 มีนาคม 2568)

[2] ระบบโซล่าเซลล์แบบไหนเหมาะกับเรา 2565(ออนไลน์)
เข้าถึงได้จาก : https://solarcellguru.com/
(เข้าค้นหาเมื่อ 22 มีนาคม 2568)

[3] ระบบควบคุม(ออนไลน์)
เข้าถึงได้จาก : ระบบควบคุม Control Systems.pdf
(เข้าค้นหาเมื่อ 22 มีนาคม 2568)

[4] ระบบควบคุมอัตโนมัติในงาน IoT : เปลี่ยนโลกด้วยการเชื่อมต่ออัตโนมัติ(ออนไลน์)
เข้าถึงได้จาก : https://www.imiconsystem.com/
(เข้าค้นหาเมื่อ 23 มีนาคม 2568)

[5] อเนก พรมอินทร์ นายธนาธรณ์ ขวัญเหม นายนนทวัฒน์ สายสุวรรณ์ เครื่องบีบอัดกระป๋อง อัตโนมัติ โดยใช้พลังงานร่วม Automatic Canning Machine ฉบับสมบูรณ์พลังงานทดแทน (ออนไลน์)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ชื่อ: นายปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง
E-mail: p_areekul@yahoo.com



ชื่อ: นายสุรศักดิ์ เกตบุญนาค
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
วิทยาเขตตรัง
E-mail: surasak.k@rmutsv.ac.th



ชื่อ: นายธนภูมิ มูสิกัณฑ์
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: thanapoom.m@rmutsvmail.com



ชื่อ: นายเภาพิภัสร์ ลิ่มสายหั้ว
นักศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: paopipat.l@rmutsvmail.com

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

Design of Hybrid Smart Microgrid Systems for Enhanced Energy Resilience and Efficiency: Case Studies in Water Quality Monitoring Stations

Seksan Wongsom [1,*] Jarun Khonrang [1], Pairoj Duangnakhorn [1], Seksan Winyangkul [1] and Kamol Boonlom [2]

[1,*]Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University, Chiangrai, Thailand
[2] School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds, United Kingdom
E-mail: wongsom0011@gmail.com *

Abstract

This study presents the development of a hybrid smart microgrid system for remote water quality monitoring stations. The system features a 150 W, 24 VDC photovoltaic (PV) array as the primary power source, supported by a battery backup and an Automatic Transfer Switch (ATS) that enables seamless switching to grid power when solar energy is insufficient. System sizing was based on load requirements, solar availability, and efficiency considerations, leading to the implementation of a 120 Ah battery bank and a capacitor-based voltage regulation circuit to mitigate voltage dips during source transitions. Experimental evaluations confirmed the system's reliability, with the power source transitions occurring smoothly within 1.6 ms. The system consistently prioritized solar energy when available, thereby minimizing dependence on the electrical grid. The proposed microgrid design offers a dependable and energy-efficient solution for autonomous environmental monitoring in remote locations.

Keywords: Smart microgrid systems, water quality monitoring stations, Energy Resilience, Smart energy management systems, Energy sustainability.

1. Introduction

The increasing global demand for sustainable and resilient energy solutions has driven the evolution of smart micro grid systems, which integrate renewable energy sources, energy storage, and intelligent control mechanisms. Unlike conventional power grids, microgrids operate independently or in coordination with the main grid, providing localized, reliable, and efficient energy management [1].

A smart microgrid utilizes distributed energy resources (DERs) such as solar photovoltaics (PV) and battery storage, along with advanced control systems and real-time data analytics to optimize power generation, distribution, and consumption. By leveraging smart energy management systems (EMS) and the Internet of Things (IoT), modern microgrid enhance energy efficiency, stability, and sustainability [2], [3].

One of the key advantages of smart microgrid systems is their ability to improve energy resilience and reliability, particularly in remote, off-grid, or disaster-prone regions where traditional power infrastructure is unreliable or infeasible. Additionally, microgrid facilitate demand-side management (DSM) and peak load reduction [4].

Water quality monitoring stations play a vital role in detecting, analyzing, and addressing environmental and public health issues by monitoring essential parameters such as pH, dissolved oxygen, and turbidity. To ensure uninterrupted operation, reliability, and resilience, especially in remote or off-grid areas, these stations should be powered by micro smart grid systems rather than relying solely on conventional power grids [5].

This research explores the development and optimization of a hybrid smart microgrid that integrates solar energy, battery storage, and grid connectivity to enhance energy efficiency and resilience. The proposed model is grounded in load flow analysis, linear programming, and closed-loop control principles to improve energy distribution and system stability. Through real-world case studies and simulations, this study aims to advance intelligent, cost-effective, and sustainable microgrid solutions for future energy infrastructures.

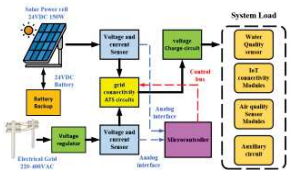


Fig. 1. A block diagram of the micro-smart grid

2. Design Principles of Hybrid Smart Microgrid Systems

This section outlines the design principles of hybrid smart microgrid systems, focusing on key components such as power supply sizing, energy storage capacity, grid

connectivity, and voltage regulation during transitions between power sources.

Fig. 1 illustrates the architecture of a micro-smart grid designed for water quality monitoring stations. The system incorporates a 150W, 24VDC solar photovoltaic (PV) power supply as the primary energy source. A backup battery system stores excess energy and acts as an auxiliary power source when solar generation is insufficient. In cases where both the solar and battery power sources are unable to provide adequate energy, the system utilizes electricity from the main grid as the final backup.

To ensure continuous and efficient operation, the voltage and current of the solar PV system and grid power supply are monitored using voltage sensors and Hall-effect current sensors. These sensors are interfaced with a microcontroller, which processes the acquired signals and transmits control commands to an Automatic Transfer Switch (ATS). The ATS dynamically selects the most suitable power source based on system conditions.

A voltage regulation circuit ensures stable voltage during power source switching, preventing load disruption and enhancing the system's reliability and efficiency.

2.1 The solar power source and storage system

The total power demand of the station consists of several components: a water quality multi-sensor consuming 30W, Internet of Things (IoT) connectivity modules requiring approximately 10W, air quality sensors drawing 25W, and an auxiliary circuit consuming 10W. To enhance system stability and accommodate fluctuations in load current, a design margin of 10% is added to the total power consumption. This allowance is calculated as shown in (1) [5].

$$P_{c(total)} = (P_{Load}) + ((P_{Load}) \times \frac{10}{100}) \quad (1)$$

$$P_{load} = P_{SM} + P_{IoT} + P_{AQ} + P_{AUX}$$

P_{SM} is the power consumption of water quality sensors

P_{IoT} is the power consumption of the IoT modules.

P_{AQ} is the power consumption of the air quality modules.

P_{AUX} is the power consumption of the auxiliary circuits.

The final design calculation estimates the total power consumption of the load to be approximately 82.5 W.

In the design and installation process, the available solar power can be estimated by considering locations with clear skies and no sunlight obstruction during the day. The calculation is based on the Maximum Solar Hours (PSH), which is assumed to be 12 PSH (). The required solar panel capacity is determined by using the maximum solar power hours (PSH) of 82.5 hours per day and an efficiency factor of 65%, reflecting actual operating conditions. As illustrated in Fig. 2, the required solar energy can be calculated using (2) [1].

When designing the solar panel capacity, it is essential to consider the total power consumption of all loads in the system. Given that the solar panel operates at 65% efficiency, it must be sized appropriately to supply sufficient power to meet the system's energy demands. This relationship is expressed in (2).



Fig. 2. shows the mapping of the calculated solar cell panel

$$P_{SR} = \frac{P_{load}(Watt/h)}{0.65} \quad (2)$$

P_{SR} is the power of the solar cell request.

At 65% efficiency, the designed solar panel must provide 126.92 W of power to meet the system's energy demands. Considering the required power capacity and commercially available solar panel sizes, a 150 W solar panel is selected as the most suitable option, balancing performance, feasibility, and cost-effectiveness.

In determining the appropriate battery capacity for the system, the total energy required to sustain the load is first calculated. The battery serves as the primary power source when needed, ensuring uninterrupted operation.

The daily energy demand is adjusted based on the system's voltage conversion efficiency, which is considered to be 90% for high-quality conversion. This requirement is computed use (3) [1].

$$P_{total/h} = \frac{P_{ltotal(daily)}(Watt/h)}{\eta_{VC}} \quad (3)$$

η_{VC} is an effective assumption of 90%.

Therefore, the battery must have a minimum energy capacity of 91.66 watt-hours to adequately support the system's power requirements.

To prolong battery life, it is essential to avoid discharging the battery to 100% each day. To achieve this, the depth of discharge (DOD%) should be limited to a maximum of 30%, as indicated in (4) [1].

$$C_b = \frac{\left(E_{query} / DoD\%\right)}{V_S} \quad (4)$$

D0D% is the depth of discharge; C_b refers to battery capacity; E_{query} is the energy demand.

Based on the design calculations, the required battery capacity is determined to be approximately 12.73 Ah. Accordingly, for the water quality monitoring station, a 24 VDC, 40 Ah battery is selected and connected in parallel to achieve a total capacity of 24 VDC, 120 Ah. Using the system's current consumption calculated from (5), the estimated operational time is approximately 10 hours. This duration ensures that the system can reliably operate through nighttime hours exceeding 8 hours, after which solar energy generation resumes and begins supplying power to the system [1].

$$T_d = \frac{C_{\max}}{C_b} \tag{5}$$

T_d is the used time duration; $C_{\max}$ represents the maximum capacity of the system battery; C_b is the battery capacity.

2.2 Automatic grid transfer switch (ATS)

This section describes the Automatic Transfer Switch (ATS) system, which enables seamless switching between solar power (with battery backup) and grid electricity. The solar PV array and battery bank serve as the primary power sources, with the grid as a backup during insufficient solar generation or battery depletion. The ATS optimizes cost efficiency by prioritizing renewable energy use. The schematic of the ATS circuit is seen in Fig. 3.

The ATMEGA128 microcontroller continuously monitors voltage and current from both the solar power source and the electrical grid via analog input channels. A voltage sensor module obtains voltage readings, while the ACS724 current sensor module acquires current measurements.

The microcontroller calculates the real-time power output from the solar power source and, if it detects a drop in power below 130 W—potentially due to inadequate sunlight during nighttime or overcast conditions—it initiates a transfer. This is achieved by sending a digital output signal to control a solid-state relay, thereby switching the power supply from the solar source to the electrical grid to maintain uninterrupted system operation.

To ensure continuous and stable power delivery, it is essential to design voltage regulation circuits capable of maintaining the system's voltage level during the operation of the ATS. The switching process of the ATS may introduce a brief voltage drop, primarily due to the inherent delay time of approximately 2 milliseconds associated with the solid-state relay. Such transient voltage dips can adversely affect the performance of all connected load circuits. Therefore, in the system design, it is critical to calculate an appropriate capacitor value that prevents the voltage from falling below 80% of the nominal supply during this interval, thereby ensuring uninterrupted and reliable system operation. The capacitor value can be calculated using (6) [2].

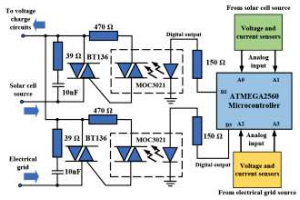


Fig. 3. Diagram of ATS system in research

$$C_g = \frac{I \times t}{V_s - V_f} \tag{6}$$

C_g is the capacitor discharge; V_s refers to input voltage; V_f is Minimum Allowed Voltage.

Based on the system requirements, the required capacitance to maintain the voltage above 80% of the nominal 24 VDC during a 2- millisecond power interruption under a 130 W load was calculated using the constant current discharge model, yielding an estimated value of approximately 3390 µF. Considering commercially available capacitor ratings, a 4700 µF capacitor was selected for implementation in the design to ensure adequate voltage support and system stability during transient switching events.

3. Experimental results

This section presents the experimental evaluation of the designed micro smart grid system, focusing on two key aspects: the average daily power output of the solar cell array of the ATS during scenarios where the solar power supply is insufficient to meet the system load.

The analysis includes measured data on solar energy generation over a single day, along with the system's response to supply fluctuations. The ATS operation, triggered under conditions of reduced solar input, is examined to assess its effectiveness in seamlessly transferring the load to the backup power source. The experimental setup and results are illustrated in Fig. 4.

Based on the observed power profile, the solar panel begins generating power at approximately 6:00 AM, reaching its peak average output of around 237 W at noon. The actual power output of the solar panel deviates from the manufacturer's rated specifications due to variations in incident sunlight throughout the day.

After midday, the power output gradually declines, reaching its minimum by 8:00 PM. Within the smart microgrid system, a threshold is set such that the system switches to solar power when the output exceeds 130 W. This transition typically occurs around 8:00 AM. Prior to this time, and again from 4:00 PM to 8:00 AM the following day, the system draws power from the electrical grid to ensure stable operation.

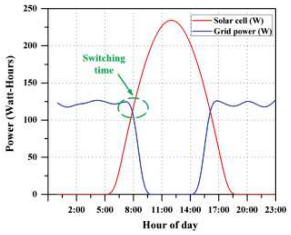


Fig. 4. The power consumption of microgrid operation in 1 day

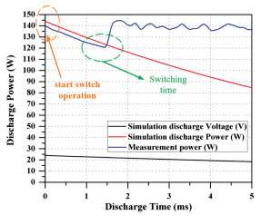


Fig. 5. The power consumption of microgrid operation in 1 day

Fig. 5 illustrates the capacitor discharge power during the transition to solar power. As shown in the graph, the capacitor discharges over a period of approximately 1.6 milliseconds before the delivered power drops below the 130 W threshold. We simulated this behavior using Keysight ADS and validated it through experimental measurements, both demonstrating consistent results.

The measured data confirm that the system successfully transitions power sources within the 1.6 ms window, allowing the load to receive uninterrupted power before the system ceases operation due to insufficient supply from the solar panel.

4. Conclusion

This study presents a hybrid smart microgrid system for water quality monitoring stations, utilizing a solar PV array as the primary source, with battery backup and an automatic transfer switch (ATS) for seamless grid transition. Solar panels and battery sizing were optimized using realistic efficiency, solar hours, and discharge limits. Voltage and current sensors, managed by a microcontroller, enable real-time monitoring and switching. A capacitor-based voltage regulation circuit ensures system stability during transitions, providing uninterrupted and reliable power delivery.

Experimental results validated the system's effectiveness, with the solar panel reaching a peak output of 237 W and switching to solar occurring after 8:00 AM once output exceeded 130 W. The capacitor ensured smooth transitions within 1.6 ms, confirming simulation and real-world performance. Overall, the hybrid microgrid offers a reliable, energy-efficient solution for remote environmental monitoring with uninterrupted operation.

5. Acknowledgement

This work was supported by Chiangrai Rajabhat University and the National Research Council of Thailand, Grant No. FF68-1-021.

References

[1] Khonrang, J.; Boonlom, K.; Siri, A.; and Klinhnu, J. (2021) The Design and Development of Micro Grid Electrical Power Supply for Seismo Sensor with An Artificial Perceptron Neural Network. Review of International Geographical Education (RIGEO), 11(9), 2711-2721. Doi: 10.48047/rigeo.11.09.238.

[2] K. Boonlom, J. Khonrang, S. Rungraungsilp, T. Amsdon, I. Robertson and N. Somjit, "Advancing In-Pipe Robot Communication with High-Speed OWC Transceiver Front-End Circuit: Experimental Insights and Prospects," 2024 21st International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Khon Kaen, Thailand, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECTI-CON60892.2024.10595010.

[3] K. Boonlom et al., "Optimization of Heatsink Design for Enhanced Thermal Management in LED-Based Optical Wireless Communication Systems for In-Pipe Inspection Robots," 2024 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C), Bangkok, Thailand, 2024, pp. 310-315, doi: 10.1109/RI2C64012.2024.10784399.

[4] K. Boonlom *et al.*, "Active Pre-Equalizer for Broadband Optical Wireless Communication Integrated with RF Amplifier," *2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*, Bangkok, Thailand, 2022, pp. 251-254, doi: 10.1109/RI2C56397.2022.9910315.

[5] R. Viratikul, K. Boonlom, I. Robertson, T. Amsdon, P. Janpugdee and N. Somjit, "Design and Evaluation of Optical Wireless Communication Systems for Underwater IoT Applications," 2024 11th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Leeds, United Kingdom, 2024, pp. 1- 6, doi: 10.1109/WINCOM62286.2024.10655875.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบตรวจสอบบรรจุภัณฑ์ด้วยการประมวลผลภาพ

Development of an Image Processing-Based Packaging Inspection System

ทัศพันธุ์ สุวรรณทัต[1*] และ พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี[2]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
E-mail: tassaphan_su@rmutto.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการใช้ระบบวิชั่นสำหรับการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ ช่วยเพิ่มคุณภาพในการผลิต เพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับของเสีย ลดการสูญเสียเวลา และสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ทันทีภายในไลน์ผลิต งานวิจัยนี้ใช้ระบบวิชั่นในการตรวจสอบลวดลายและข้อมูลบนบรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยเพิ่มคุณภาพสินค้าในไลน์การผลิต สามารถตรวจจับและแยกแยะของเสียจากกระบวนการผลิต นำของเสียที่เกิดจากการผลิตออกมาซ่อมแซมก่อนถึงค่อยปล่อยผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ออกขายสู่ตลาด และยังมีการเก็บข้อมูลผลการตรวจสอบไว้ในฐานข้อมูล ทั้งข้อมูลข้อมูลรูปภาพและผลการประมวลผลภาพ ผลการวิจัยได้ทดสอบระบบกับไลน์ผลิตจริงระยะเวลา 3 เดือน ผลการทดสอบพบว่าระบบมีความถูกต้องในการตรวสอบร้อยละ 98.30 ร้อยละ 99.60 และร้อยละ 99.40 ตามลำดับ และเมื่อระบบนี้แจ้งเตือนเมื่อมีการผลิตที่ผิดพลาด พนักงานจะย้อนกลับไปแก้ไขกระบวนการผลิตส่งผลให้ไม่เกิดของเสียจากการผลิต

คำสำคัญ: ระบบวิชั่น, การควบคุมคุณภาพ, ระบบตรวจจับกระบวนการผลิต

Abstract

This research aims to utilize a vision system for product quality control, enhancing production quality, increasing the efficiency of defect detection, reducing time loss, and enabling real-time error correction within the production line. The vision system is used to inspect patterns and information on packaging to improve product quality in the production line. It can detect and distinguish defective items from the production process, allowing defective products to be repaired before releasing the final products to the market. Additionally, the system stores inspection data including images and image processing results in a database. The system was tested in a real production environment over a period of three months. The test results showed that the system achieved inspection accuracy rates of 98.30%, 99.60%, and 99.40%, respectively. By implementing this system to issue alerts when production errors occur, it allows corrective actions to be taken, ultimately achieving a no defective result.

Keywords: Machine Vision System , Quality Control , Manufacturing Process Detection System

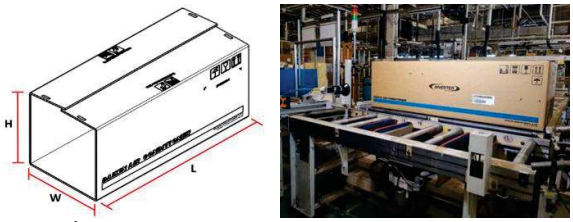
1. บทนำ

ในปัจจุบันการแข่งขันทางด้านผลิตภัณฑ์มีสูงอย่างโดยเฉพาะเรื่องคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การนำระบบวิชันเข้ามาช่วยในการตรวจสอบและประเมินผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตมีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย [1], [2], [3] การตรวจสอบผลิตภัณฑ์โดยพนักงานแบบเดิมมีข้อจำกัด เช่น หากตรวจสอบทุกชิ้นงานจะใช้เวลานานในการตรวจสอบ หรือหากใช้การสุ่มตรวจซึ่งจะลดเวลาได้แต่ไม่สามารถตรวจสอบทุกชิ้นงาน การเก็บข้อมูลอาจช้าและตกหล่นเนื่องจากบางส่วนเป็นการบันทึกด้วยกระดาษและไม่สามารถเก็บรูปภาพผลิตภัณฑ์เพื่อการตรวจสอบย้อนหลังได้ เพื่อแก้ปัญหานี้ผู้วิจัยได้เสนอระบบตรวจสอบผลิตภัณฑ์ด้วยระบบวิชัน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการผลิต ระบบนี้จะถ่ายรูปและประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบและวิเคราะห์ความถูกต้องของผลิตภัณฑ์บันทึกประวัติการตรวจสอบทั้งหมดไว้ในฐานข้อมูลทำให้เข้าถึงข้อมูลที่เก็บไว้ได้อย่างรวดเร็ว ที่สำคัญคือระบบนี้สามารถตรวจสอบคุณภาพของการผลิต เนื่องจากมีความแม่นยำและเที่ยงตรงกว่าใช้คนในการตรวจสอบทำงานได้สม่ำเสมอและไม่มีความเหนื่อยล้าเหมือนกับมนุษย์ซึ่งเป็นสาเหตุใหญ่ของความผิดพลาด นอกจากนี้ระบบยังสามารถตรวจสอบชิ้นงานได้ทุกกระบวนการผลิตตั้งแต่เริ่มแรกหรือบางกระบวนการผลิตที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปตรวจสอบได้ ทำให้สามารถป้องกันความเสียหายได้ก่อนการส่งออก

2. การศึกษาและการออกแบบ

2.1 การศึกษารูปแบบผลิตภัณฑ์

ก่อนที่จะทำการเลือกขนาดของกล้องและเลนส์ และออกแบบโครงสร้างการติดตั้ง จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการตรวจสอบ ได้แก่ความกว้าง ความยาว และความสูงของชิ้นงาน เพื่อใช้ในการกำหนดค่าความละเอียดที่เหมาะสมของกล้อง หากเป็นชิ้นงานที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงมาก ก็สามารถเลือกใช้กล้องที่มีต้นทุนต่ำกว่าเพื่อประหยัดต้นทุน นอกจากนี้ขนาดของชิ้นงานยังมีผลต่อการเลือกเลนส์กล้อง โดยจะต้องคำนวณทางยาวโฟกัสที่เหมาะสม เพื่อให้ได้มุมมองที่พอดีและการโฟกัสที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบชิ้นงาน โดยการหาขนาดของมุมมองภาพ (Field of View: FOV) สามารถกำหนดได้จากระยะทำงาน (Working Distance: WD) ซึ่งคือระยะทางจากกล้องไปยังชิ้นงาน ในการติดตั้งจริงต้องพิจารณาพื้นที่ที่มีอยู่และเลือกระยะห่างให้เหมาะสมกับการมองเห็น



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพด้วยระบบวิชั่น

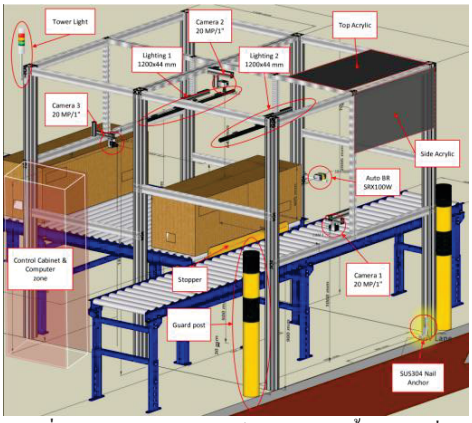
2.2 ฮาร์ดแวร์ของระบบ

2.2.1 โครงสร้าง

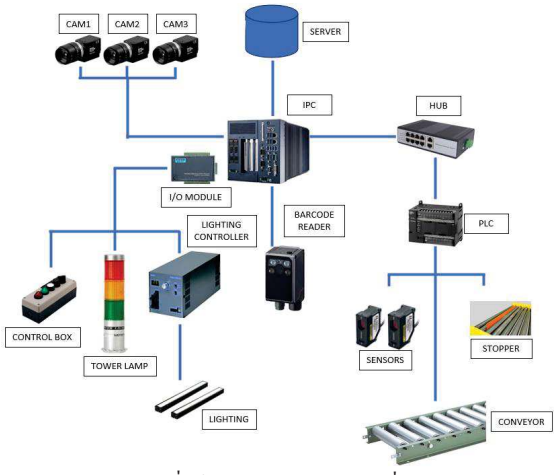
หลังจากที่ได้ทำการคำนวณกำหนดระยะโฟกัสและ ได้ระยะตรวจจับของกล้องแล้ว ข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้ในการออกแบบโครงสร้างของระบบการตรวจสอบได้ โดยจะต้องพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างกล้องและชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อให้การถ่ายภาพมีความคมชัดและสามารถตรวจสอบรายละเอียดของชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง ระยะกล้องที่ได้จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งที่กล้องจะต้องติดตั้งรวมถึงการจัดวางอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้การถ่ายภาพเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด การใช้ระยะกล้องในการออกแบบโครงสร้างจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของระบบทั้งหมด เพื่อให้มั่นใจว่าการออกแบบจะสามารถตรวจสอบชิ้นงานได้ในลักษณะที่ต้องการ พร้อมทั้งช่วยลดความผิดพลาดในการเลือกใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสมขนาดที่ได้จากการคำนวณระยะกล้องทั้ง 3 ตำแหน่งและข้อจำกัดต่างๆ ของหน้างาน จะได้ขนาดโครงสร้างคือ กว้าง 1,920 มิลลิเมตร ยาว 2,500 มิลลิเมตร และสูง 2,000 มิลลิเมตร โครงสร้างที่ออกแบบไว้แสดงในรูปที่ 2

2.2.2 การออกแบบระบบวิชั่นและระบบควบคุม

ไดอะแกรมของระบบวิชั่นและระบบควบคุมแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3 โดยได้ออกแบบให้ใช้กล้องจำนวน 3 ตัวของ OMRON สำหรับตรวจจับกล่องผลิตภัณฑ์ด้านหน้า ด้านหลัง และด้านบน รวมทั้งเซนเซอร์อ่านบาร์โค้ด 1 ตัว เชื่อมต่อมายังคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม และคอมพิวเตอร์มีการติดตั้งโมดูลดิจิตอลอินพุทและเอาท์พุท สำหรับเชื่อมต่อกับกล่องคอนโทรลสวิทช์ ทาวเวอร์แลมป์ และตัวควบคุมระบบไฟส่องสว่างเพื่อลดผลกระทบของแสงในระบบเปิด คอมพิวเตอร์อุตสาหกรรมนี้จะเชื่อมต่อกับพีแอลซี OMRON ด้วยโปรโตคอล Ethernet ซึ่งพีแอลซีจะมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบลำเลียง และมีการส่งข้อมูลไปยังเซอร์เวอร์เพื่อจัดเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล



รูปที่ 2 การออกแบบโครงสร้างสำหรับติดตั้งระบบวิชั่น

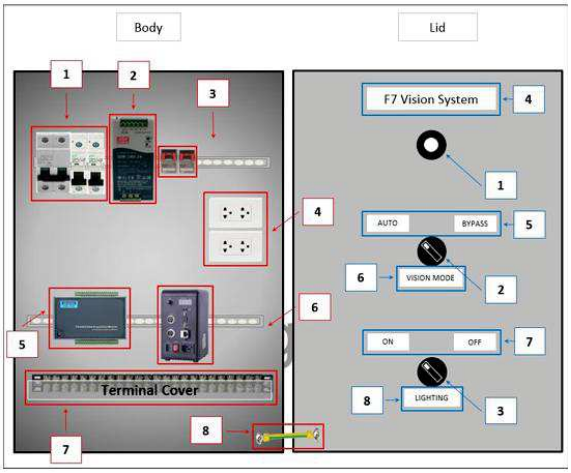


รูปที่ 3 ไดอะแกรมของระบบวิชั่น

2.2.3 การออกแบบตู้ควบคุม

ตู้ควบคุมสำหรับระบบวิชั่นจะเลือกใช้ตู้ควบคุมชนิดป้องกันฝุ่นและสิ่งสกปรกที่อาจส่งผลต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และช่วยจัดระเบียบอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการบำรุงรักษา ภายในตู้ควบคุมประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟ ชุดควบคุม สวิตช์ เบรกเกอร์ ฟิวส์ พัดลมระบายอากาศ ระบบสายดิน และไฟแสดงสถานะ กล้องจะถูกติดตั้ง

ภายนอกตู้โดยเดินสายเข้าไปยังอุปกรณ์ภายในส่วนชุดประมวลผลและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะถูกจัดวางให้มีการระบายอากาศที่ดี แหล่งจ่ายไฟและพีแอลซีจะติดตั้งบนราง เบรกเกอร์และฟิวส์จะอยู่บริเวณด้านบนของตู้เพื่อให้เข้าถึงได้ง่าย พัดลมระบายอากาศจะติดตั้งด้านข้างของตู้เพื่อช่วยควบคุมอุณหภูมิ การออกแบบตู้ควบคุมแสดงดังรูปที่ 4



NO.	ITEM
1	Circuit Breaker
2	Power supply
3	Relay
4	Service Socket
5	USB-4761
6	Lighting Controller
7	Terminal Block
8	Ground Body-Lid

NO.	ITEM
1	Power Lamp
2	Selector switch (Vision Mode)
3	Selector switch (Lighting)
4	Name Plate (F7 Vision System)
5	Name Plate (Auto-Bypass)
6	Name Plate (Vision Mode)
7	Name Plate (On-Off)
8	Name Plate (Lighting)

รูปที่ 4 การออกแบบตู้ควบคุม

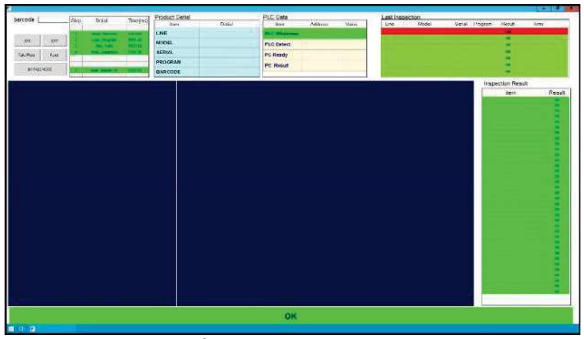
2.2.4 การออกแบบหน้าโปรแกรมและการพัฒนาโปรแกรม

การออกแบบหน้าโปรแกรมและพัฒนาโปรแกรมจะอ้างอิงจากโปรแกรมหลักของจุดอื่นในกระบวนการผลิต พร้อมทั้งทำการดัดแปลงและปรับปรุงเพิ่มเติมจากข้อจำกัดของระบบเดิม โปรแกรมตรวจจับพัฒนาจาก COGNAX VisionPro เดิมที่สามารถตรวจสอบได้เพียง 2 ด้าน และมีข้อจำกัดในการรันโปรแกรมการตรวจสอบ แต่ในระบบใหม่นี้ต้องการเพิ่มการตรวจสอบเป็น 3 ด้าน รวมถึงพัฒนา UI เพิ่มเติมเพื่อแสดงผลข้อมูลให้ครบถ้วนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5

3. การติดตั้งและทดสอบ

3.1 ติดตั้งโครงสร้างและทดสอบการทำงาน

การติดตั้งที่หน้างานจริงจะดำเนินการตามแผนที่กำหนดไว้ โดยเริ่มจากการนำโครงสร้างไปวางในพื้นที่ใกล้เคียงก่อน เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง จากนั้นทำการเคลียร์พื้นที่ให้พร้อมสำหรับการดำเนินงาน รวมถึงการฝึกอบรมพนักงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องก่อนเริ่มการติดตั้ง เพื่อ



รูปที่ 5 การออกแบบโปรแกรม

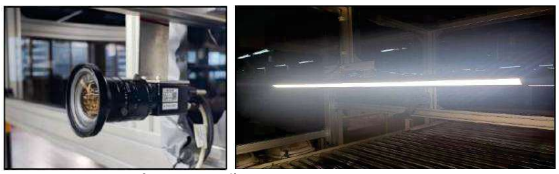
ตรวจสอบความพร้อมและลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น โดยมีการวางแผนการติดตั้งดังนี้

1. การติดตั้งโครงสร้าง โครงสร้างที่จะทำการติดตั้งมีขนาดใหญ่แต่สามารถยกเอียงและทำการตั้งครอบลงบนสายพานที่อยู่ในไลน์ผลิต



รูปที่ 6 การติดตั้งโครงสร้าง

2. ติดตั้งกล้องและระบบไฟส่องสว่าง และการเดินสายไฟสัญญาณไปยังส่วนควบคุม



รูปที่ 7 การติดตั้งกล้องและระบบส่องสว่าง

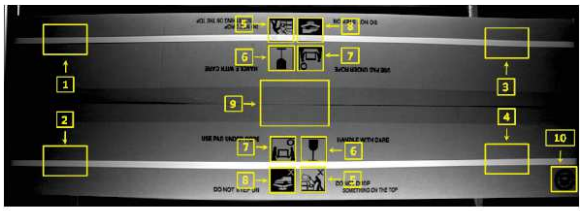
3. กำหนดจุดตรวจสอบภาพ โดยถ่ายรูปภาพที่ต้องทำการตรวจสอบแล้วกำหนดจุดตรวจสอบในแต่ละด้าน โดยระบุรายละเอียดของสิ่งที่ต้องตรวจสอบ อ้างอิงจากปัญหาที่เคยเกิดขึ้นเพื่อให้การตรวจสอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 7

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์

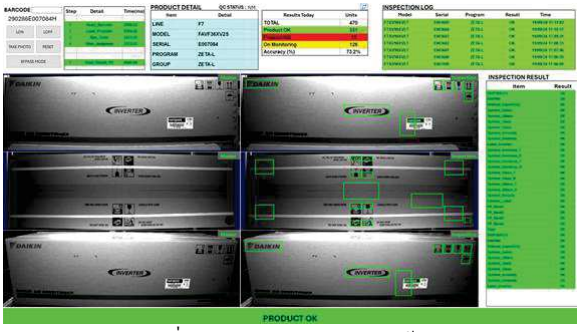
ผลจากการทดสอบการตรวจสอบจุดตรวจสอบ สัญลักษณ์ บนกล่องสินค้าสามารถตรวจสอบได้ทุกจุดตรวจสอบที่กำหนด โดยผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งระบบสามารถตรวจสอบทุกจุดตรวจสอบและ

แจ้งผลการทดสอบได้ครบถ้วน ทั้งนี้หากมีการวางตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ไม่ถูกต้องระบบจะมีการแจ้งเตือนให้พนักงานควบคุมการผลิตทราบ



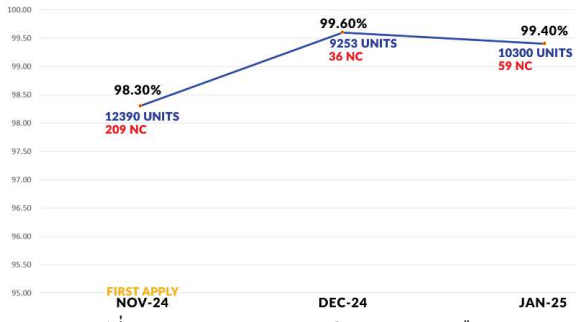
No.	Item	Tool
1	PP Band 1	PMAlign
2	PP Band 2	PMAlign
3	PP Band 3	PMAlign
4	PP Band 4	PMAlign
5	Symbol Do Not Drop	PMAlign
6	Symbol Fragile	PMAlign
7	Symbol 2 Person Lift	PMAlign
8	Symbol Do Not Step On	PMAlign
9	Tape	Blob
10	Symbol Recycle	PMAlign

รูปที่ 7 การกำหนดจุดตรวจสอบคุณภาพ

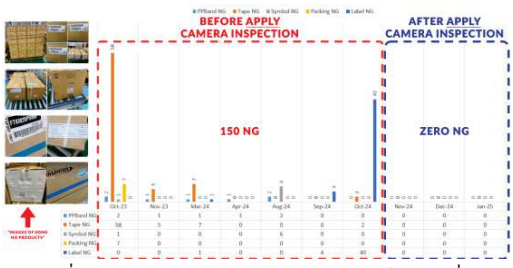


รูปที่ 8 ผลการตรวจสอบคุณภาพด้วย

โดยผู้วิจัยได้ทดสอบระบบกับการผลิตจริงระยะเวลา 3 เดือน ผลการทดสอบพบว่าระบบให้ความถูกต้องในการตรวจสอบร้อยละ 98.30 ร้อยละ 99.60 และร้อยละ 99.40 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 และเมื่อนำระบบนี้แจ้งเตือนเมื่อมีการผลิตที่ผิดพลาดย้อนกลับไปแก้ไขกระบวนการผลิตส่งผลให้เกิด ZERO NG ขึ้นอีก ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ผลการทดสอบกับการผลิตระยะเวลา 3 เดือน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้ระบบวิชั่น

4. สรุป

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพของสินค้า โดยใช้ระบบการตรวจสอบด้วยกล้องเพื่อตรวจสอบกล่องสินค้าที่ผลิตภายในไลน์การผลิต เพื่อป้องกันไม่ให้สินค้าที่มีข้อผิดพลาดหลุดออกไปถึงมือลูกค้า นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลจากแผนที่ผลิตผิดพลาดมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของข้อผิดพลาดในการผลิต ซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

[1] บีอิ้ง แซ่อัง และวุฒิพงษ์ คำวิลัย, “ระบบวิชั่นสำหรับการอ่านเลขซีเรียลบนสไลด์เดอร์บาร์ในฮาร์ดดิสก์และบาร์โค้ดบนตัวยึดจับ" วารสาร Engineering and Technology Horizon., Vol. 40, No. 3, 2566, หน้า 810-815, doi:10.55003/ETH.400311.

[2] ธนยศ อริสริยางศ์, ธีรพล คุ้มเสริ์จ และธีรวัฒน์พรหมเมือง, “ระบบวิชั่นฝังตัวแบบเปิดเผยต้นฉบับสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม4.0” วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, 2567, หน้า 14-22.

[3] ทวีวงศ์ อัครเลิศเศรษฐ, นภัสดล สิงหะตา และบุญช่วย เจริญผล, “การจำแนกประเภทขวดเพื่อรีไซเคิลด้วยระบบวิชั่นและแขนหุ่นยนต์” วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, 2566, หน้า 13-20.



ทัศพันธุ์ สุวรรณทัต อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก งานวิจัยที่สนใจ ระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ แมชชีนวิชั่น และปัญญาประดิษฐ์



พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก งานวิจัยที่สนใจ IoT, Data Science, Energy

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาแรงดันไฟฟ้าของนวัตกรรมผนังเตาอบชุบโลหะด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริก

Study of Voltage in the Innovative of a Metal Heat Treatment Furnace Wall with Thermoelectric System

รตบงกช แสนจุ้ม[1*] ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช[2] และ ศักดาวุฒิ บุญตั้ว[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
E-mail: ratabongkot_sa@rmutto.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากนวัตกรรมผนังเตาอบชุบโลหะด้วยระบบเทอร์โมอิเล็กทริก โดยทำการออกแบบและสร้างต้นแบบเตาอบที่ติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกบริเวณผนังเตา ซึ่งใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาแตกต่างกันคือ 5 และ 10 มิลลิเมตร เป็นวัสดุนำความร้อน จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ ผลต่างของอุณหภูมิ และความหนาของแผ่นอะลูมิเนียม ผลการศึกษาพบว่า ผนังเตาที่ติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 มิลลิเมตร สามารถให้ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 11.59 โวลต์ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีผลต่างอุณหภูมิ 60.57 องศาเซลเซียส (โดยด้านร้อนมีอุณหภูมิ 143.97 และด้านเย็น 83.40 องศาเซลเซียส) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความหนาของวัสดุและผลต่างอุณหภูมิมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามระบบจะทำงานได้เต็มประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อรักษา ΔT ให้สูง และยังมีข้อจำกัดเรื่องการเสื่อมสภาพของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้ความร้อนสูงซ้ำๆ จึงพิจารณาเงื่อนไขการใช้งานและการออกแบบระบบระบายความร้อนควบคู่ไปด้วย

คำสำคัญ: เทอร์โมอิเล็กทริก, แรงดันไฟฟ้า, ความร้อนเหลือทิ้ง

Abstract

This research aims to study the voltage generated by the thermoelectric wall innovation in a metal plating furnace. A prototype furnace was designed and constructed with thermoelectric modules installed on its walls. Aluminum plates of two different thicknesses, 5 mm and 10 mm, were used as thermal conductors. Voltage generation was tested under various conditions, and factors affecting system performance such as temperature difference and aluminum thickness were analyzed. The results revealed that the thermoelectric wall with a 10 mm thick aluminum plate produced the highest voltage of 11.59 volts when the temperature difference was 60.57 °C (with the hot side at 143.97 °C and the cold side at 83.40 °C). The study indicates that both the thickness of the conductive material and the temperature gradient significantly affect voltage generation. This innovation shows potential for efficient conversion of waste heat into electrical energy in industrial processes. However, the system will only achieve full efficiency if a high T is maintained, and it is also subject to limitations due to the degradation of thermoelectric materials under repeated high-heat exposure; therefore, operating conditions and cooling-system design must be considered in tandem.

Keywords: Thermoelectric, Voltage, Waste heat

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีพลังงานทางเลือกได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากทรัพยากรพลังงานดั้งเดิม เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เริ่มลดน้อยลง ประกอบกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานเหล่านี้ [1] จึงเกิดแนวโน้มในการพัฒนาระบบผลิตพลังงานที่สะอาดและมีประสิทธิภาพ หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความสนใจคือระบบเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric System) ซึ่งสามารถแปลงพลังงานความร้อนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงผ่านหลักการของ Seebeck Effect [2] ข้อดีของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกคือไม่ต้องใช้ชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ทำให้มีความทนทาน ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย และสามารถติดตั้งในพื้นที่ที่มีแหล่งความร้อนเหลือทิ้ง เช่น โรงงานอุตสาหกรรม เตาอบ หรือระบบทำความร้อนต่างๆ [3 -4] โดยเฉพาะในกระบวนการชุบโลหะซึ่งใช้เตาอบที่มีการปล่อยความร้อนออกจำนวนมาก หากสามารถนำความร้อนส่วนนี้กลับมาใช้ประโยชน์ได้ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานให้กับระบบโดยรวม [5]

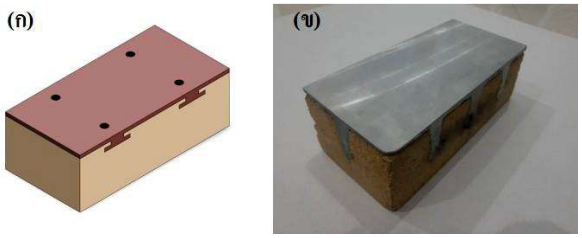
ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาเตาอบชุบโลหะต้นแบบที่ติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกบริเวณผนังเตา โดยเลือกใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่มี

ความหนาต่างกันเป็นตัวนำความร้อนเพื่อศึกษาผลของความหนาที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งทำการวัดแรงดันไฟฟ้าในสภาวะที่มีผลต่างอุณหภูมิแตกต่างกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความหนาของแผ่นนำความร้อน และประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบ

การศึกษานี้ไม่เพียงแต่มีเป้าหมายในการวัดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แต่ยังเป็นแนวทางในการออกแบบและประยุกต์ใช้นวัตกรรมเทอร์โมอิเล็กทริกในอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งมีศักยภาพในการประหยัดพลังงาน ลดต้นทุน และส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนในอนาคต

2. การออกแบบและติดตั้งผนังเตาระบบเทอร์โมอิเล็กทริก

2.1 ออกแบบผนังเตา



รูปที่ 1 (ก) ออกแบบผนังเตาในโปรแกรม Solid Works และ (ข) ผนังเตาที่หลอมอะลูมิเนียมขนาดความหนาแตกต่างกัน

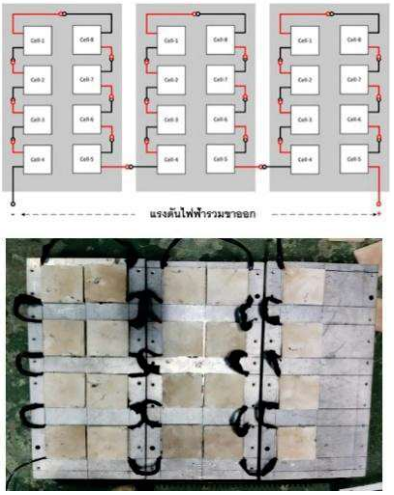
ทำการออกแบบผนังเตาโดยใช้โปรแกรม Solid Works ดังรูปที่ 1 (ก) โดยได้ออกแบบให้ผิวของผนังเตาด้านนึงสามารถติดตั้งอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกได้ จากนั้นทำการหลอมอะลูมิเนียมเข้ากับผนังเตาและทำการปาดให้ผิวของอะลูมิเนียมเรียบ โดยกำหนดความหนา 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ด้วยเครื่อง milling ดังรูปที่ 1 (ข)

2.2 ติดตั้งชุดเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับผนังเตา

แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกถูกติดตั้งบนอะลูมิเนียมที่ยึดแน่นอยู่กับโครงสร้างผนังของเตา โดยมีการต่อวงจรไฟฟ้าแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้ารวมที่ได้จากระบบ (ดังรูปที่ 2)

2.3 ติดตั้งผนังเตาระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับเตาอบชุบ

ทำการติดตั้งผนังเตาระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับเตาอบชุบโลหะจำนวน 2 ด้าน พร้อมทั้งติดตั้งแผงระบายความร้อน (heat sink) เพื่อช่วยระบายความร้อนทางด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก อันเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการสร้างแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2 แผนผังการต่อวงจรแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกบนผนังของเตาอบชุบ

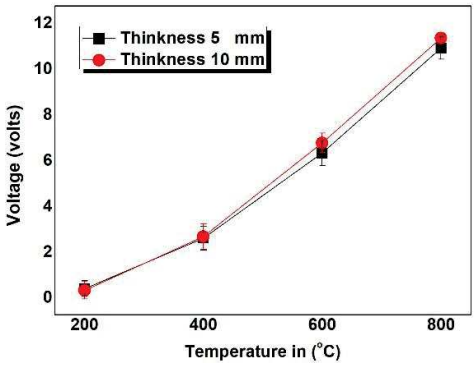
3. ผลการทดลอง

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพการผลิตแรงดันไฟฟ้าของเตาอบชุบระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิต่างๆ

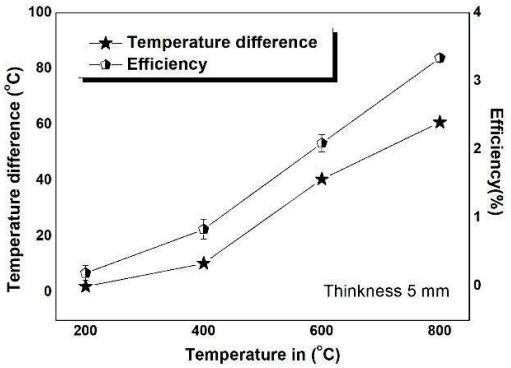
Thickness (mm)	Temp (in:°C)	Temp (Hot:°C)	Temp (Cold:°C)	ΔT (°C)	Voltage (Volt)	η (%)
5.00	200	40.22	38.17	2.05	0.63	0.19
	400	55.48	45.13	10.35	2.84	0.83
	600	85.25	44.78	40.47	6.56	2.09
	800	117.37	56.53	60.83	11.15	3.34
10.00	200	44.42	39.80	4.62	0.56	0.17
	400	75.62	58.22	17.40	2.91	1.00
	600	109.85	74.55	35.30	7.00	2.27
	800	143.97	83.40	60.57	11.59	3.47

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของเตาอบชุบ (Temp in) เพิ่มขึ้นจาก 200 องศาเซลเซียส เป็น 800 องศาเซลเซียส ทั้งในวัสดุที่มีความหนา 5 และ 10 มิลลิเมตร ค่าอุณหภูมิด้านร้อน (Hot) และความต่างอุณหภูมิ (ΔT) จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงาน (Dพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับวัสดุที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร พบว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มจาก 0.63 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็น 11.15 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ขณะที่ประสิทธิภาพเพิ่มจาก 0.19 % เป็น 3.34 % ส่วนวัสดุที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 11.59 โวลต์ และประสิทธิภาพสูงสุด 3.47 % ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 1

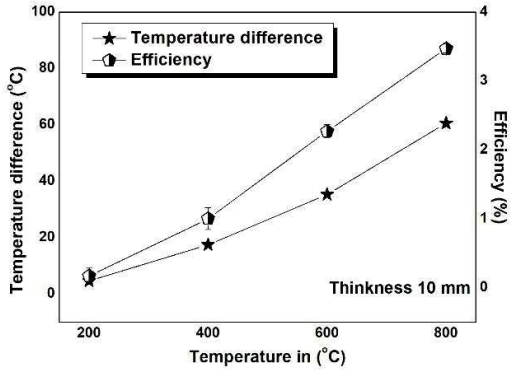
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของเตาอบชุบโลหะ สำหรับแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความหนาแตกต่างกัน ซึ่งเห็นได้ชัดว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในลักษณะแนวโน้มเชิงเส้น โดยที่วัสดุทั้งสองชนิดมีพฤติกรรมสอดคล้องกัน และวัสดุที่หนากว่าเริ่มให้แรงดันสูงกว่าที่อุณหภูมิระดับสูง ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างของวัสดุ โดยเฉพาะความหนา มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการสร้างแรงดันไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิเตาอบชุบที่สูงขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานจากความร้อนได้ และความหนาของวัสดุส่งผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทพลังงานในระบบเทอร์โมอิเล็กทริกอย่างชัดเจน



รูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้าเทียบกับอุณหภูมิภายในเตาอบชุบโลหะ ที่ความหนาของแผ่นอะลูมิเนียมต่างกัน



รูปที่ 4 ผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อน-เย็นและร้อยละประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเทียบกับอุณหภูมิภายในเตาอบชุบโลหะ ที่ความหนาอะลูมิเนียม 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 ผลต่างของอุณหภูมิด้านร้อน-เย็นและร้อยละประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเทียบกับอุณหภูมิภายในเตาอบชุบโลหะ ที่ความหนาอะลูมิเนียม 10 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในเตาอบชุบเพิ่มขึ้นจาก 200 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส ค่าความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นอะลูมิเนียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งในกรณีของวัสดุที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร โดยวัสดุที่มีความหนามากกว่าให้ค่า ΔT ที่สูงกว่าในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เห็นว่าแผ่นอะลูมิเนียมที่หนากว่าสามารถรักษาอุณหภูมิด้านร้อนไว้ได้ดีกว่า และลดการสูญเสียความร้อนผ่านการนำความร้อนลงด้านเย็น

ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเทอร์โมอิเล็กทริกโดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิ สามารถคำนวณได้จากสมการเชิงทฤษฎี ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 [6]

$$\eta = \eta_c \frac{M-1}{M+\left(\frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (1)$$

โดย M สามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$M = \sqrt{1+Z} \quad (2)$$

โดยค่า หาได้จากสมการที่ (3)

L : E ; (3)

ประสิทธิภาพทางคาร์โนต์หาได้จากสมการที่ (4)

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (4)$$

η คือ ประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกในการผลิตไฟฟ้า
η_c คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัฏจักรคาร์โนต์
T_c คือ อุณหภูมิทางด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก, K
T_h คือ อุณหภูมิทางด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก, K
Z คือ คุณสมบัติของเทอร์โมอิเล็กทริก
T_m คือ ค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น, K

เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของเตาอบชุบ ซึ่งแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกับ T โดยวัสดุที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิกลางถึงสูง ซึ่งเกิดจากการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าได้มากขึ้น เนื่องจากมี T สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (เช่น 200 องศาเซลเซียส) วัสดุที่บางกว่า (5 มิลลิเมตร) มีประสิทธิภาพเริ่มต้นสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องมาจากมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนไปยังด้านเย็นได้เร็วกว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในระบบ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โครงสร้างที่หนากว่าจะเริ่มแสดงความได้เปรียบในการกักเก็บความร้อน และสร้างความต่างศักย์ได้ต่อเนื่องและเสถียรกว่า [7-8]

4. สรุป

การทดลองนี้ศึกษาผลของความหนาแผ่นอะลูมิเนียม (5 และ 10 มิลลิเมตร) ต่อประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกเจนเนอเรเตอร์ในการแปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้อุณหภูมิของเตาอบชุบโลหะเป็นแหล่งความร้อน ตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส พบว่าแรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สำหรับความหนา 5 มิลลิเมตร แรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 11.15 โวลต์ และประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 3.34 % ส่วนความหนา 10 มิลลิเมตร ให้แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 11.59 โวลต์ และประสิทธิภาพสูงสุด 3.47% ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

วัสดุที่บางกว่าแสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเริ่มต้นสูงกว่าเล็กน้อยในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากถ่ายเทความร้อนได้รวดเร็วกว่า ขณะที่วัสดุที่หนากว่าแสดงความได้เปรียบในช่วงอุณหภูมิสูง ด้วยการกักเก็บความร้อนและสร้างแรงดันไฟฟ้าได้เสถียรกว่า แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและโครงสร้างวัสดุมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะของผนังเตาระบบเทอร์โมอิเล็กทริก นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากระบบเทอร์โมอิเล็กทริกที่มาจากการเก็บเกี่ยวพลังงานความร้อนเหลือทิ้งจากเตาอบชุบในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กนั้นสามารถบูรณาการกับไมโครกริดของโรงงานโดยเชื่อมต่อระบบจัดเก็บพลังงาน (ESS) จากผนังเตาระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ให้ทำหน้าที่เป็นแหล่งสำรองพลังงานสำหรับเซนเซอร์ สวิตช์ควบคุม และโหลดสำคัญในกรณีไฟดับ ลดการพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้าภายนอกได้

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยพื้นฐาน Fundametal Fund (FF) ปี 2567 และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์ข้อมูลพลังงานแห่งชาติ. (2565). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย. กระทรวงพลังงาน.

[2] Goldsmid, H. J. (2010). *Introduction to thermoelectricity* (Vol. 121, p. 46). Berlin: Springer.

[3] Scherrer, H., Rowe, D. M., Kajikawa, T., Matsubara, K., Issi, J. P., Goldsmid, H. J., ... & Morgunov, I. V. (2018). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano.*

[4] อาจรี ศุภสุธีกุล. (2553). การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กตริก. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, *2*(3), 14–26.

[5] Zhao, D., & Tan, G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering, 66*(1), 15–24.

[6] มติ นรารมย์, & ปวัตวงศ์ บำรุงขันท์. (2018). การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกจากเตาย่าง. *Journal of Engineering and Innovation*, *11*(2), 100-108.

[7] Yin, Y., & Tiwari, A. (2021). Understanding the effect of thickness on the thermoelectric properties of $Ca_3Co_4O_9$ thin films. *Scientific Reports*, *11*(1), 6324.

[8] Fan, P., Zheng, Z.-H., Cai, Z.-K., Chen, T.-B., Liu, P.-J., Cai, X.-M., Zhang, D.-P., Liang, G.-X., & Luo, J.-T. (2013). The high performance of a thin-film thermoelectric generator with heat flow running parallel to film surface. *Applied Physics Letters, 102*(3), 033904. https://doi.org/10.1063/1.4788817

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็น โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Design and Development of a Monitoring and Alert System for Cold Room Equipment Using Internet of Things Technology

ณรงค์ นันทกุศล[1] สาคร ปันตา[1] สามารถ ยะเชียงคำ[1] ศตวรรษ บูรณา[1] สุริยา เทียมตามณี[1] ปริญญา สมยี่[2] และ กิตตินัน สระสวย[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา E-mail: kittinun.s@rmutl.ac.th
[2]มูลนิธิโครงการหลวง ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรโครงการหลวง ชนกาธิเบศรดำริ E-mail: parinyasomyee@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการห้องเย็นในศูนย์พัฒนาโครงการหลวง ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์ DHT22 สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น และเซนเซอร์ PZEM-004T สำหรับวัดค่าทางไฟฟ้า โดยข้อมูลจะถูกประมวลผลผ่านบอร์ด ESP32 และส่งผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังแพลตฟอร์ม Node-RED เพื่อแสดงผลและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Telegram ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน ±0.2°C และความชื้นเฉลี่ย 0.55%RH ขณะที่แรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.08% และ 0.64% ตามลำดับ ระบบสามารถแจ้งเตือนสถานะผิดปกติได้ภายในเวลาไม่เกิน 3 วินาที จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบจัดการห้องเย็นในพื้นที่เกษตรบนพื้นที่สูง ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้คือการพัฒนาต่อให้รองรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสอย่างสมบูรณ์ และเชื่อมต่อกับระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ห้องเย็น, ระบบแจ้งเตือน

Abstract

This research presents the development of a monitoring and alert system for cold room equipment using Internet of Things (IoT) technology to enhance management efficiency in Royal Project Agricultural Research and Development Center. The system integrates a DHT22 sensor for temperature and humidity measurement and a PZEM-004T sensor for electricity monitoring. Data is processed by an ESP32 microcontroller and transmitted via the MQTT protocol to the Node-RED platform for visualization and abnormal condition alerts through the Telegram application. Experimental results demonstrate high accuracy, with a temperature deviation of no more than ±0.2°C and an average humidity deviation of 0.55%RH. Voltage and current measurements showed mean errors of 0.08% and 0.64%, respectively. The alert system responded accurately within three seconds, indicating its suitability for real-world cold room management in highland agricultural zones. Future recommendations include enhancing compatibility with three-phase electrical systems and integration with automatic control systems for improved flexibility and functionality.

Keywords: Internet of Things (IoT), Cold Room, Monitoring and Alert System

1. บทนำ

มูลนิธิโครงการหลวงมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของเกษตรกรในพื้นที่สูง โดยเฉพาะในด้านการส่งเสริมการเพาะปลูกพืชผักและผลไม้คุณภาพสูง [1] ซึ่งส่งผลต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจและความยั่งยืน ซึ่งระบบห้องเย็นมีความสำคัญในการรักษาคุณภาพและยืดอายุผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยช่วยรักษาคุณภาพของผลผลิตให้คงทนและสามารถส่งไปยังตลาดได้ในระยะยาว แต่ในปัจจุบันศูนย์พัฒนาโครงการหลวงมีทั้งหมด 39 ศูนย์ ส่วนใหญ่อยู่ในระดับความสูงเกินกว่า 800 เมตรจากระดับน้ำทะเลประสบปัญหาด้านการบริหารจัดการห้องเย็น เนื่องจากมีอุณหภูมิที่ไม่คงที่และการควบคุมความชื้นที่ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้ผลผลิตเกิดความเสียหาย และมีการเน่าเสียเร็วขึ้น [2]

จากปัญหาดังกล่าวได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลผลิตและประสิทธิภาพโดยรวมของมูลนิธิโครงการหลวง ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และลดความเชื่อมั่นของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์จากมูลนิธิโครงการหลวง ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นในการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะห้องเย็นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการ ซึ่งการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ในการประมวลผลและตรวจติดตามสภาพการทำงานของห้องเย็นร่วมกับการใช้โปรโตคอล MQTT ซึ่งเป็นโปรโตคอลสำคัญในการสื่อสารใน

ระบบ IoT (Internet of Things) สามารถติดตามสถานะห้องเย็นได้อย่างสะดวก รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ และลดความจำเป็นในการตรวจสอบด้วยบุคลากรโดยตรง

ด้วยการพัฒนาระบบตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะห้องเย็นนี้ จะส่งผลดีทั้งในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน การลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และการส่งเสริมการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการทำงาน ซึ่งจะยกระดับมาตรฐานการทำงานของมูลนิธิโครงการหลวงและเพิ่มความยั่งยืนให้กับชุมชนในพื้นที่สูง

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยหลายชิ้นได้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ในการตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมในสถานที่ต่างๆ เช่น ห้องเซิร์ฟเวอร์ ฟาร์มเพาะเห็ด และห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งได้ใช้เซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (DHT11, DHT22) และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (NodeMCU ESP8266) ร่วมกับแพลตฟอร์มและแอปพลิเคชันต่างๆ เช่น Blynk, Line Notify และ Android Studio เพื่อตรวจวัดและส่งข้อมูล

การแจ้งเตือนโดยใช้แพลตฟอร์ม Blynk ผ่าน Line Notify เมื่ออุณหภูมิสูงเกินกำหนด ช่วยให้ตรวจสอบสะดวก แก้ไขปัญหาได้รวดเร็ว ลดความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ในห้องเซิร์ฟเวอร์ [3] นอกจากนี้แพลตฟอร์ม Android Studio ระบบสามารถตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ส่งแจ้งเตือนเมื่อค่าผิดปกติ ช่วยให้เกษตรกรสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมในการเพาะเห็ดได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ผลผลิตดีขึ้น [4] ในขณะที่การติดตั้งเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อวัตถุประสงค์ที่จะรักษาค่าคงที่และป้องกันความเสียหายของเครื่องมือวิทยาศาสตร์ [5] โดยระบบสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟ 110-220VAC หรือ DC 12V ควบคุมอุณหภูมิได้ระหว่าง -20°C ถึง 80°C และความชื้น 0-100% RH มีความแม่นยำสูง ในการทดสอบเก็บข้อมูล 30 วัน พบว่าค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ช่วยให้ผลวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์แม่นยำยิ่งขึ้น

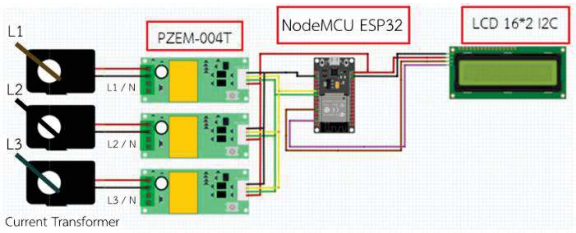
ผลลัพธ์ของงานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบและควบคุมสภาพแวดล้อมแบบตามเวลาจริง (Real time) ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาได้อย่างรวดเร็วและป้องกันความเสียหาย ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในงานเพื่อการตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นภายในศูนย์พัฒนาโครงการหลวงได้

3. วิธีการดำเนินงาน

การออกแบบเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในงานวิจัยนี้ ได้คำนึงถึงความถูกต้องและความแม่นยำของเซนเซอร์ การเชื่อมต่อและการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ และระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติ โดยส่วนประกอบหลักจะมี 3 ส่วน ประกอบด้วย 1). เซนเซอร์ในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าและเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น 2). ระบบประมวลผลในการแจ้งเตือนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ห้องเย็นและแสดงข้อมูลต่างๆ 3). ระบบการสื่อสารโปรโตคอลแบบ MQTT เพื่อใช้ในการเชื่อมต่อสถานะต่างๆ โดยใช้แพลตฟอร์มโปรแกรม Node-RED

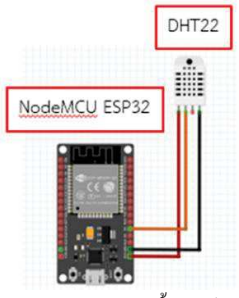
3.1 การออกแบบระบบเซนเซอร์

การออกแบบระบบเซนเซอร์เครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยการวัดค่าทางไฟฟ้าของระบบห้องเย็นในศูนย์พัฒนาโครงการหลวงโดยส่วนมากจะเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์ PZEM-004T เป็นเซนเซอร์ที่สามารถวัดค่าต่างๆ เกี่ยวกับการใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า AC ซึ่งใช้สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส ดังนั้นจึงออกแบบให้เซนเซอร์ PZEM-004T สามารถวัดค่าโดยเฉพาะค่าพลังงานไฟฟ้า 3 เฟสได้ โดยแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบเครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า 3 เฟสของอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้เซนเซอร์ PZEM-004T

ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นในห้องเย็น เลือกใช้เซนเซอร์ DHT22 เป็นเซนเซอร์สำหรับการวัดอุณหภูมิและความชื้นที่มีความแม่นยำเหมาะสำหรับใช้กับสภาพแวดล้อมในห้องเย็นตามรูปที่ 2



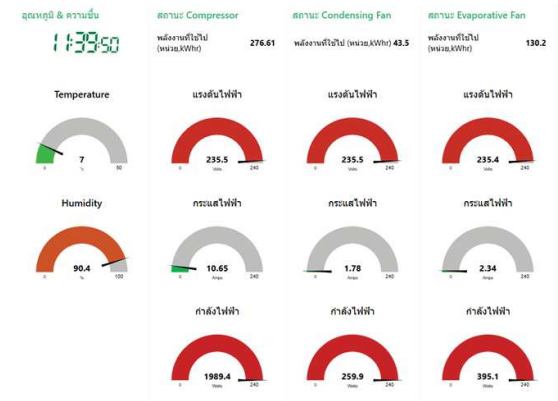
รูปที่ 2 การวัดอุณหภูมิและความชื้นในห้องเย็น (DHT22)

3.2 การออกแบบระบบประมวลผลการทำงาน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 ในการประมวลผลจากเซ็นเซอร์โดยการทำงานมีดังนี้ 1). เซ็นเซอร์ DHT22 ใช้ในการวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเย็น 2). เซ็นเซอร์ PZEM-004T ใช้ในการวัดค่าทางไฟฟ้าประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้า (Voltage), กระแสไฟฟ้า (Current), กำลังไฟฟ้า (Power) และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (Energy Consumption) ของอุปกรณ์ในห้องเย็น โดยข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ทั้งสองจะถูกส่งผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังเซิร์ฟเวอร์ เพื่อใช้ในการติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของอุปกรณ์ห้องเย็นในระบบ IoT ซึ่งในการโปรแกรมจะอ้างอิงชุดคำสั่งพื้นฐานจาก Library ที่รองรับอุปกรณ์เซนเซอร์

3.3 การออกแบบระบบการแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็น

การออกแบบระบบการแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นโดยใช้แพลตฟอร์มโปรแกรม Node-RED และการส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Telegram โดยระบบจะทำการตรวจสอบสถานะจากเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น PZEM-004T และ DHT22 จากนั้นส่งข้อมูลเหล่านี้ไปยังเซิร์ฟเวอร์ผ่านโปรโตคอล MQTT และใช้แพลตฟอร์มโปรแกรม Node-RED เพื่อดึงข้อมูล จากนั้นทำการประมวลผลเมื่อตรวจพบสถานะที่ไม่ปกติจะส่งการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ผ่านแอปพลิเคชัน Telegram ซึ่งการแสดงผลค่าต่างๆ จะผ่านเว็บไซต์มีลักษณะของแผงควบคุม (Dashboard) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผังการแสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ห้องเย็นบนแพลตฟอร์มโปรแกรม Node-RED

4. ผลการทดลอง

การทดลองความคลาดเคลื่อนและการทำงานของเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็น แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้

4.1 การวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน

ในการทดลองโดยการวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องเย็นของอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับการใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้น ยี่ห้อ EBRO รุ่น EBI 20-T1 โดยทำการวัดทุก 1 ชั่วโมงตั้งแต่เวลา 08:00- 16:00 น. ผลของการวัดอุณหภูมิห้องเย็นเป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิภายในห้องเย็น

เวลา	อุณหภูมิห้องเย็น (°C)		ความคลาดเคลื่อน (°C)
	EBRO รุ่น EBI 20-T1	เซนเซอร์ DHT22	
08:00 น.	7.0	6.9	0.1
09:00 น.	7.1	6.9	0.2
10:00 น.	6.9	6.8	0.1
11:00 น.	7.1	6.9	0.2
12:00 น.	7.0	6.8	0.2
13:00 น.	7.0	6.9	0.1
14:00 น.	6.9	6.7	0.2
15:00 น.	7.0	6.8	0.2
16:00 น.	7.0	6.9	0.1

จากผลค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดค่าอุณหภูมิภายในห้องควบคุมทำความเย็นไม่เกิน $\pm$ 0.2 °C ซึ่งอยู่ใน Class B ตามมาตรฐาน IEC 60751 และผลการวัดความชื้นห้องเย็นเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความชื้นภายในห้องเย็น

เวลา	ความชื้นห้องเย็น (%RH)		ความคลาดเคลื่อน (%)
	EBRO รุ่น EBI 20-T1	เซนเซอร์ DHT22	
08:00 น.	87.6	88.1	0.57
09:00 น.	88.9	89.7	0.90
10:00 น.	84.5	83.8	0.34
11:00 น.	89.3	88.9	0.45
12:00 น.	84.9	84.1	0.94
13:00 น.	89.4	89.0	0.45
14:00 น.	82.8	82.6	0.24
15:00 น.	87.2	86.9	0.34
16:00 น.	88.7	88.1	0.68

ผลความคลาดเคลื่อนของค่าความชื้นภายในห้องเย็นอยู่ที่ 0.55 %RH ซึ่งอยู่ใน Accuracy class 1 ซึ่งเหมาะสำหรับห้องเย็น

4.2 การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเทียบกับอุปกรณ์มาตรฐาน

หัวข้อนี้เป็นการทดลองวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเทียบกับแคลมป์มิเตอร์แบบดิจิตอลยี่ห้อ Kyoritsu วัดค่าที่ตู้ควบคุมของห้องควบคุมทำความเย็น ทำการวัดทุก 1 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 08:00- 16:00 น.

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แสดงผลบนแพลตฟอร์มโปรแกรม Node-RED มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 0.08% และผลค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยจากการวัดค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.64%

4.3 การแจ้งเตือนสถานะผิดปกติผ่านแอปพลิเคชัน Telegram

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการทำงานภายใต้เงื่อนไขการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ได้แก่ 1) อุณหภูมิสูงกว่า 7 °C หรือต่ำกว่า 0 °C 2) ความชื้นต่ำกว่า 90%RH 3) แรงดันไฟฟ้าสูงเกิน 240 V หรือต่ำกว่า 200 V 4) กระแสไฟฟ้าต่ำหรือเกิดไฟฟ้าดับ โดยมีผลการทดลองตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลทดลองการแจ้งเตือนสถานะผิดปกติ

แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	ความชื้น	อุณหภูมิ	สถานะแจ้งเตือน
230V	10A	0 %RH	5°C	แจ้งเตือน
230V	10A	90 %RH	7°C	ไม่แจ้ง
230V	0A	95 %RH	7°C	แจ้งเตือน
0V	0A	50 %RH	27°C	แจ้งเตือน

ผลการแจ้งเตือนมีลักษณะแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Telegram ซึ่งติดตั้งบนโทรศัพท์มือถือ ตามรูปที่ 4 ซึ่งสามารถทำการแจ้งเตือนได้ถูกต้องครบตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และใช้เวลาที่แสดงผลการแจ้งเตือนไม่เกิน 3 วินาทีหลังจากเกิดเหตุการณ์ที่จำลองสถานการณ์ไว้



รูปที่ 4 การแจ้งเตือนการทำงานที่ผิดปกติบนแอปพลิเคชัน Telegram

5. สรุป

จากการพัฒนาเครื่องตรวจสอบและแจ้งเตือนสถานะอุปกรณ์ห้องเย็นด้วยเทคโนโลยี IoT พบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง โดยเซนเซอร์ DHT22 สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้นมีค่าคลาดเคลื่อนเพียง ±0.2°C และ 0.55%RH ตามลำดับ ส่วนเซนเซอร์ PZEM-004T ที่ใช้วัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.08% และ 0.64% ตามลำดับ และสามารถแจ้งเตือนเหตุผิดปกติผ่านแอป Telegram ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วภายใน 3 วินาที สามารถนำไปใช้งานจริงในศูนย์พัฒนาโครงการหลวงเพื่อลดความเสียหายของผลผลิต และลดภาระบุคลากรในการตรวจสอบ อย่างไรก็ตาม ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือการพัฒนาให้รองรับระบบไฟฟ้า 3 เฟสอย่างสมบูรณ์แบบ การเพิ่มความสามารถในการเก็บข้อมูลระยะยาวเพื่อวิเคราะห์แนวโน้ม และการเชื่อมต่อกับระบบควบคุมอัตโนมัติอื่นๆ เพื่อให้เกิดการตอบสนองแบบตามเวลาจริงอย่างสมบูรณ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิโครงการหลวง ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรโครงการหลวง ชนกาธิเบศรดำริ ที่สนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] มูลนิธิโครงการหลวง. (2567). รายงานประจำปี 2567 มูลนิธิโครงการหลวง [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ : 1 มีนาคม 2568]. สืบค้นจาก: https://royalproject.org/pubs/annualreport/.

[2] สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง. (2024). บทความอุณหภูมิในการเก็บรักษาพืชผัก [ออนไลน์]. [สืบค้นเมื่อวันที่ : 10 สิงหาคม 2567] สืบค้นจาก: https://www.hrdi.or.th/articles/Detail/1505.

[3] พาขวัญ พัดเย็นใจ และ ชนุดม เอกเตชวุฒิ (2560). ระบบการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เพื่อการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านจากระยะไกล. การประชุมวิชาการระดับชาติการจัดการเทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 2, มหาสารคาม, 2559.

[4] สิรวิชญ์ โตหมื่นไวย และคณะ. (2563). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและค่าความชื้นผ่านสมาร์ทโฟน กรณีศึกษาฟาร์มเห็ดสุริยนต์ อำเภอนครชัยศรี จังหวัดนครปฐม," ใน งานประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 3. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

[5] นิรวิทธ์ สุวพัฒน์ และคณะ. (2564). เครื่องตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น. *การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ครั้งที่ 4*. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม.

ตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมการทำงานผ่านเทคโนโลยีไอโอที

Hot air Herb Drying Cabinet Control Operations Through IoT Technology

ภราดร เรืองกูล สายัณ ละอองโชค อธิโรจน์ มะโน และอภิรักษ์ เสือเดช
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
E-mail: parador@rmutsv.ac.th sayan.l@rmutsv.ac.th, athirot.m@rmutsv.ac.th, apirak.su@rmutsv.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาตู้อบลมร้อนสำหรับอบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนผ่านเทคโนโลยี IoT โดยควบคุมการทำงานและแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และสามารถแสดงผลบนหน้าจอของตู้อบแห้งสมุนไพรได้อีกด้วย การอบแห้งสมุนไพรใช้พลังงานความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรดและติดตั้งพัดลมเพื่อเป่าลมร้อน โดยตู้อบนี้อบแห้งสมุนไพรสี่ชนิด ได้แก่ พริก ใบเตย ตะไคร้ และขิง ในระหว่างกระบวนการอบแห้งสามารถตรวจสอบสถานะและควบคุมการทำงานของตู้อบได้ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และยังสามารถสั่งการทำงานได้โดยใช้สวิตช์ควบคุมที่ตัวตู้อบได้โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นตัวประมวลผลเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งสมุนไพรให้อยู่ในช่วง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส และยังสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายไร้สาย (WiFi) ได้

คำสำคัญ: ตู้อบแห้งสมุนไพร แอพพลิเคชันบลิงค์ ฮีตเตอร์อินฟาเรด

Abstract

This paper presents the development of a hot air herb drying oven controlled by IoT technology. Hot air herb drying, operation control, and results display are managed via the Blynk application. The results are also shown on the display screen of the herb drying oven. Dried herbs are produced using heat energy from infrared heaters equipped with fans to blow the hot air. This oven is used to dry four types of herbs: chili, pandan leaves, lemongrass, and ginger. During the drying process, the oven's operation and status can be checked via the Blynk application, and it can also be operated using the control switch on the oven. An ESP32 microcontroller controls the temperature inside the herbal drying cabinet and maintains it between 40 and 60 degrees Celsius, enabling connection to a wireless network (WiFi)

Keywords: Herbal drying cabinet, Blynk Application, Infrared Heater

1. บทนำ

สมุนไพรไทยมีคุณประโยชน์มากมายหลายประการ ในการรักษาโรคและดูแลสุขภาพร่างกายให้ระบบการทำงานของร่างกายที่สมดุลย์ โดยในเขตพื้นที่โซนเอเชียเป็นเมืองร้อนมีสมุนไพรที่มีคุณค่าในการรักษาโรค เช่น พริก ขา ตะไคร้ ฟ้าทะลายโจร มะระขี้นก และอื่นๆ ในบางครั้งผลผลิตต่างๆ เหล่านี้มีมาก จึงต้องมีกระบวนการเก็บรักษาให้สมุนไพรสามารถใช้งานได้นานมากยิ่งขึ้น เช่น การตากแห้ง การอบ การแช่เย็น กระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ถนอมและเก็บรักษาสินค้าทางการเกษตรไม่ให้เน่าเสียคงสภาพเก็บใช้งานได้นานมากขึ้น เป็นการอบแห้งเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ถนอม และเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งจะมีความชื้นลดลงทำให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลง ผลิตภัณฑ์ไม่เน่าเสียง่าย [1] อีกทั้งยังเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เทคนิคในการอบแห้งสามารถทำได้โดยอาศัยแหล่งพลังงานต่างๆ เช่น แสงอาทิตย์ รังสีอินฟราเรด พลังงานลมร้อน พลังงานจากแสงอาทิตย์ในการอบแห้ง เป็นต้น

ในการแปรรูปสมุนไพร ด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมและลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้ ทำให้คุณภาพของสมุนไพรยังคงเหมือนเดิม [2] มีวิธีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม [3] เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาเครื่องอบสมุนไพรโดยใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟาเรด [4] คลื่นอินฟราเรดมีความยาวคลื่น แสงประมาณ 5-10 ไมครอน ซึ่งวัตถุต่างๆ สามารถดูดซับคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นขนาดนี้ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร ห้องอบสี งานบรรจุหีบห่อ อบขึ้นรูปพลาสติก ฮีตเตอร์ลักษณะนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้มีความร้อนในการอบชิ้นงานที่สม่ำเสมอ

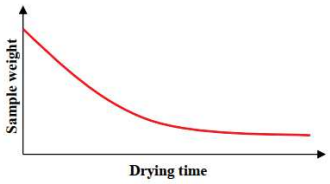
ในบทความนี้นำเสนอมีการพัฒนาตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อน ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถสั่งการทำงานผ่านสวิตช์ควบคุมที่ตัวตู้อบได้ มีไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32 (ESP32) เป็นตัวประมวลควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งสมุนไพร และ

ควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอทีที่อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อน ควบคุมการทำงานและแสดงผลผ่านแอพพลิเคชันบลิงค์

2.ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการอบแห้ง

กระบวนการอบทั่วไปเพื่อไล่ความชื้นภายในผลผลิต ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุส่งผล ให้ผลผลิตเกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยการถ่ายเทขึ้นกับความเข้มข้นหรือปริมาณสารว่ามีมากน้อยเพียงใดในระหว่างการอบดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผลผลิตไปตามเวลา สังเกตว่าในช่วงแรกของการอบ น้ำหนักของผลผลิตจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปน้ำหนักมีเปลี่ยนแปลงลดลงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 1



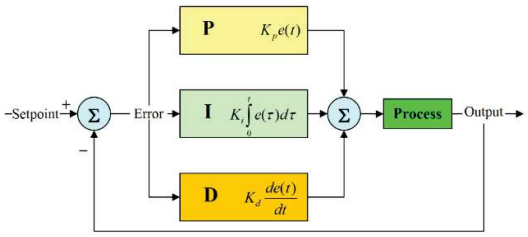
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักผลผลิตกับระยะเวลาอบ

2.2 ระบบควบคุมพีไอดี (Proportional Integral Derivative)

ตัวควบคุมที่พบมากในอุตสาหกรรม มีโครงสร้างการทำงานที่ไม่สลับซับซ้อน [5] ง่ายต่อการออกแบบและกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับตัวควบคุมทำได้ง่าย ตัวควบคุมพีไอดี โดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ P (proportional) ทำหน้าที่ปรับสัดส่วนสัญญาณ I (integral) ทำหน้าที่อินทิเกรตสัญญาณ และ D (Derivative) ทำหน้าที่ อนุพันธ์สัญญาณ กลไกทั้งสามจะกระทำกับสัญญาณแล้วถูกรวบรวมเข้าด้วยกัน

$$u(t) = Kp\,.\,e(t) + Ki.\int e(t)dt + Kd.\frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

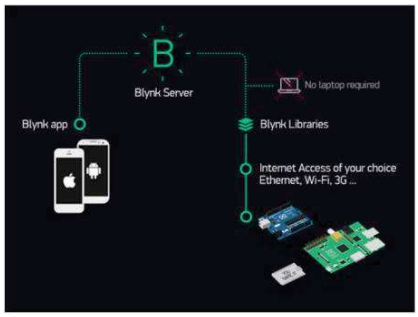
เมื่อ u(t) คือ สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม
E คือ ค่าความผิดพลาด (Error)
Kp คือ เกนสัดส่วน (Proportion Gain)
Ki คือ เวลาในการอินทิเกรต (integral time)
Kd คือ เวลาที่ใช้ในการอนุพันธ์ (Derivative Time)



รูปที่ 2 แผนผังแสดงการควบคุมพีไอดีทั่วไป

2.3 แอพพลิเคชันบลิงค์

แอพพลิเคชันบลิงค์ (Blynk) ถูกออกแบบมาสำหรับอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) สามารถควบคุมฮาร์ดแวร์ได้จากระยะไกล สามารถแสดงข้อมูลเซ็นเซอร์ เก็บข้อมูล จำลองข้อมูล และทำสิ่งดีๆ อื่นๆ ได้มากมายแสดงลักษณะการทำงานของแอพพลิเคชัน Blynk แสดงดังรูปที่ 3

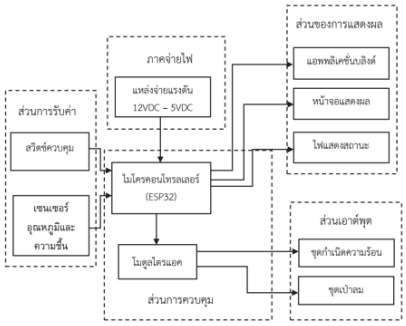


รูปที่ 3 หลักการทำงานของแอพพลิเคชันบลิงค์

3. โครงสร้างของตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที

3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงาน

การออกแบบตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอทีต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32 (ESP32) ในการส่งของมูลผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ตเพื่อแสดงข้อมูลอุณหภูมิ ระยะเวลาการทำงานรวมทั้งสามารถตั้งค่าช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาในอบแห้ง และมีสวิตช์ควบคุมกรณีผู้ใช้งานไม่ได้ใช้งานแอพพลิเคชันสามารถปรับสวิตช์ในการตั้งค่าอุณหภูมิและระยะเวลาในอบแห้งได้



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที



รูปที่ 5 ตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที

3.2 การคำนวณขนาดฮีตเตอร์

การเลือกขนาดฮีตเตอร์ให้เหมาะสมกับตู้อบสามารถคำนวณจากปริมาตรของตู้อบได้ เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์

$$PW=\frac{CF(ft^3)\times T(^\circ F)}{3000\times \text{Heat up Time(hr)}} \qquad (2)$$

เมื่อ

CF คือ ปริมาตรตู้อบ (ลูกบาศก์ฟุต)

T(°F) คือ อุณหภูมิที่ต้องการ - อุณหภูมิเริ่มต้น (°F)

3000 คือ ค่าคงที่

Heat up Time คือ ระยะเวลาที่ต้องการ (ชั่วโมง)

จากการวัดปริมาตรของตู้อบนี้ มีขนาด 10.17 ลูกบาศก์ฟุต สามารถคำนวณขนาดฮีตเตอร์ได้ ดังสมการที่ 2 โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศา

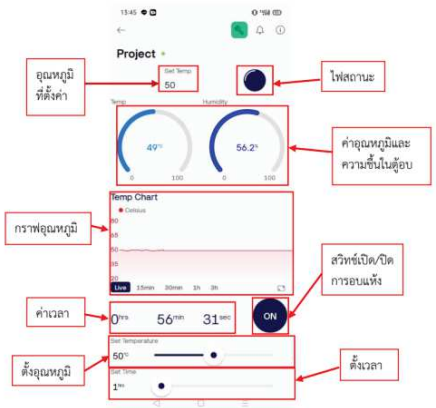
$$PW=\frac{10.17(ft^3)\times (140-77)(^\circ F)}{3000\times 0.166(hr)}$$

$$PW=1.286 \quad KW$$

จากที่คำนวณหาขนาดกำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์สรุปได้ว่าถ้าต้องการทำอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสต้องใช้ฮีตเตอร์ที่มีขนาด 1,286 วัตต์ โดยเลือกใช้ฮีตเตอร์ขนาด 1,400 วัตต์ เนื่องจากทางตลาดมีขาย และเผื่ออุณหภูมิให้เกินกว่าที่กำหนด

3.3 การออกแบบชุดแสดงผลผ่านแอปพลิเคชันบลิงค์

หน้าต่างแอพพลิเคชันบลิงค์ ที่แสดงการทำงานของตู้อบแห้งสมุนไพรโดยหน้าต่างจะแสดงค่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ค่าอุณหภูมิจริงและความชื้นในตู้อบการ์ดแสดงอุณหภูมิแบบเรียลไทม์และเวลาของเครื่องที่ทำงาน



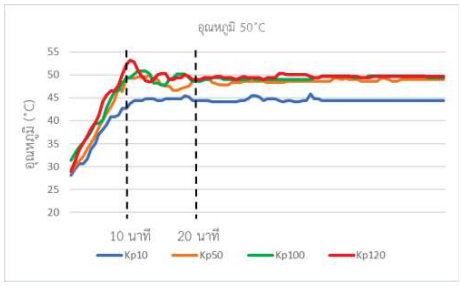
รูปที่ 6 หน้าต่างแอปพลิเคชันตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที

4.1 การทดสอบวัดอุณหภูมิโดยทำการปรับค่า Kp Ki และ Kd

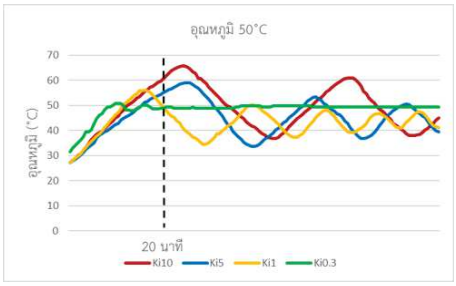
การทดสอบวัดอุณหภูมิโดยทำการปรับค่า Kp, Ki และ Kd ในโปรแกรมการทำงานควบคุมอุณหภูมิโดยหลักการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ โดยการทดลองจะควบคุมอุณหภูมิคงที่อยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการปรับค่า Kp และตามด้วย Ki และ Kd ไปตามลำดับ และดูค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 1 ชั่วโมง

เห็นได้ว่าที่ Kp เท่ากับ 10 อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้จะอยู่ที่ 45 องศาเซลเซียสห่างจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้อยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสแต่เมื่อปรับ

ค่า Kp 50 80 และ 120 จะเห็นได้ว่าสามารถทำอุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียสได้โดยที่ Kp เท่ากับ 120 ในช่วง 10 นาทีแรกจะทำอุณหภูมิเกินกว่า 50 องศาอยู่ที่ 4 องศาเซลเซียสและค่อยๆลดลงมาคงที่ 10 นาทีต่อมา



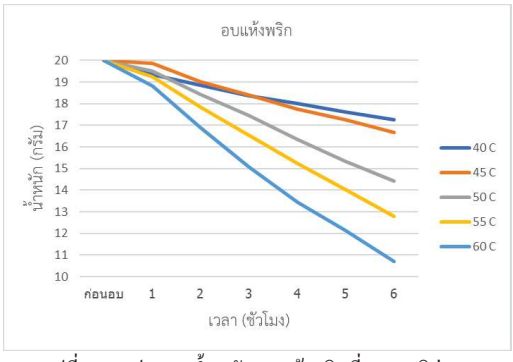
รูปที่ 7 ค่าอุณหภูมิช่วงต่างๆ เมื่อมีการปรับค่า Kp



รูปที่ 8 ค่าอุณหภูมิช่วงต่างๆ เมื่อมีการปรับค่า Ki

4.2 ผลการทดสอบการอบพริกที่อุณหภูมิต่างๆ

น้ำหนักอบแห้งพริกที่อุณหภูมิ 40 45 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลาอบแห้ง 6 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียสน้ำหนักของพริกมีอัตราการลดที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสขึ้นไปน้ำหนักของตัวพริกมีอัตราการลดอย่างรวดเร็วโดยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 9 กราฟแสดงน้ำหนักอบแห้งพริกที่อุณหภูมิต่างๆ

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่สนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

6. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อนควบคุมผ่านเทคโนโลยีไอโอที แสดงผลข้อมูลการอบผ่านแอพพลิเคชันบลิงค์ และแสดงผลผ่านหน้าจอแอลซีดีที่หน้าเครื่องโดยจะนำสมุนไพรสำหรับอบแห้งมา 4 ชนิด คือพริก ใบเตย ตะไคร้ และขิง มาทำการอบที่อุณหภูมิช่วง 40-60 องศาเซลเซียส วิธีการควบคุมอุณหภูมิใช้แบบพีไอดี ที่มีความเสถียรภาพทำให้คุณภาพการอบมีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาสมุนไพร

เอกสารอ้างอิง

[1] สุภวรรณ ฏิระวิณิ ชย์กุล, จุฑารัตน์ ทะสะระ,จุไรรัตน์ สุริยงค์, ปิยาภรณ์ ปานกำเนิด และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล. (2556). การอบแห้งใบเตยและตะไคร้เพื่อผลิตเป็นชาชงสมุนไพรด้วยแหล่งพลังงานความร้อนหลายรูปแบบ , ใน ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ระดับชาติ ครั้งที่ 14 (น. 570-577) และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 6 ประจำปี 2556. สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ

[2] อาริยา โสภาจารย์, สุห์ดี นิเซ็ง, ธีรยุทธ โทยาน และ ธีรภัทร ฤทธิผลิน.(2563) ศึกษาการอบชาสมุนไพรใบพลูด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์อินฟราเรดโดยใช้ไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยปีที่ 12, ฉบับที่ 1 หน้า 171-179, 2563.

[3] สายัณ ละอองโชค, ณัฏฐ์ สมจิตร, ธนกร สุจริยา, และภราดร เรืองกูล(2567). ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีดับบลิวเอ็มภายในตู้อบแห้งสมุนไพรด้วยลมร้อน ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 .(น.372-375). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[4] Piyush Tiwari, Amarsihn Desai and Mahesh Chavan.“Drying Herbs with a Smart Dehydrator.” 2022 14th International Conference on Software Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA), pp. 329-333.

[5] พรจิต ประทุมสุวรรณ. (2561). การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาชุดการเรียนการสอนทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส

Development of a Three-phase to Single-phase Cycloconverter Laboratory Training Kit

เอกนรินทร์ เถิงจาง[1] อนนท์ นำอิน[1] และ สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์ [1*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
E-mail: surasak@rmutl.ac.th [*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาชุดการเรียนการสอนทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นเฟสเดียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถศึกษาการทำงานของวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ได้ในทางปฏิบัติ ระบบประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D สำหรับสร้างสัญญาณเกตควบคุมไทริสเตอร์ โดยแบ่งการทำงานเป็นสองฝั่ง ได้แก่ กลุ่มคอนเวอร์เตอร์ด้านบวกสำหรับสร้างแรงดันขาออกขั้วบวก และกลุ่มคอนเวอร์เตอร์ด้านลบสำหรับสร้างแรงดันขั้วลบ ชุดทดลองสามารถปรับความถี่และปรับมุมจุดชนวนเกตแรงดันเอาต์พุตได้ตามความต้องการให้เหมาะสมกับโหลด ทำให้นักศึกษาสามารถทดลองและเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลที่ได้จากชุดทดลองจริง ซึ่งช่วยส่งเสริมการเรียนรู้และเข้าใจการทำงานของวงจรแปลงความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ไซโคลคอนเวอร์เตอร์, การแปลงความถี่, ชุดทดลอง, ไมโครคอนโทรลเลอร์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

Abstract

This paper presents the design and development of a three-phase to single-phase cycloconverter experimental module aimed at supporting practical learning. The system uses a TMS320F28379D microcontroller to generate gate signals for thyristor control, with two converter groups: the positive group generating a positive output voltage, and the negative group generating a negative voltage. The experimental setup allows adjustment of frequency and gate firing angle according to load requirements. This enables students to compare simulation results with practical outcomes, thereby improving their understanding of AC-to-AC frequency conversion.

Keywords: Cycloconverter, Frequency Conversion, Experimental Module, Microcontroller, Power Electronics

1. บทนำ

ชุดการเรียนการสอนแบบทดลอง หรือชุดทดลอง (Laboratory Kit or Experimental Module) มีจำเป็นสำหรับสร้างความรู้ความเข้าใจ ทักษะ ความสามารถ เจตคติ และคุณลักษณะของนักศึกษา เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ช่วยสอนภาคปฏิบัติเพื่อพิสูจน์ทฤษฎี ฝึกทักษะทางความคิดและทักษะทางวิศวกรรมด้วยการปฏิบัติทดลอง โดยใช้อุปกรณ์จำลองสถานการณ์จริงให้เหมาะสมกับการเรียนการสอนในห้องทดลอง และเหมาะสมกับเวลาในชั่วโมงการเรียนภาคปฏิบัติ [1]

ระบบวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง มีบทบาทสำคัญต่อการใช้ระบบไฟฟ้ากำลังและควบคุมอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ การควบคุมความถี่ของโหลด และการใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าความถี่ต่ำ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นรายวิชาชีพเฉพาะของนักศึกษาระดับอาชีวศึกษาหรือระดับปริญญาตรีที่ต้องจัดให้มีการเรียนการสอนทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ [1]

ชุดทดลองระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง รวมถึงชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ที่มีการออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อการเรียนรู้ของนักศึกษาในการทำความเข้าใจหลักการทำงาน ตลอดจนการประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรมศาสตร์ สามารถเรียนรู้ได้โดยง่าย มีความสะดวกในใช้งานภาคปฏิบัติเนื่องจากอุปกรณ์ระบบควบคุมอยู่ในตู้เดียวกันแยกจากอุปกรณ์ระบบกำลังอยู่ในตู้เดียวกันอีกตู้หนึ่ง มีความสะดวกและมีความปลอดภัยสำหรับการเรียนการสอนภาคปฏิบัติ ปัจจุบันมีการนำเข้าจากต่างประเทศเข้ามาใช้ในการเรียนการสอนในวิทยาลัยอาชีวศึกษาและมหาวิทยาลัยในประเทศไทยจำนวนมาก ชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์กำลังจากต่างประเทศมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับการพัฒนาขึ้นเองภายในประเทศ [1] [2]

นอกจากนี้ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรแปลงความถี่ไฟฟ้ากำลังให้มีค่าความถี่ต่ำกว่า สำหรับใช้ในอุปกรณ์เครื่องกลไฟฟ้าที่ต้องการ

ปรับความถี่ไฟฟ้าในการทำงานอุตสาหกรรม เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับอุตสาหกรรมหนัก เป็นต้น ชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะเฉพาะ เช่น ระบบไฟฟ้าขาเข้าแบบหนึ่งเฟส หรือแบบสามเฟส โครงสร้างวงจรไฟฟ้าของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบไฟฟ้าขาออกหนึ่งเฟสหรือสามเฟส เป็นต้น ซึ่งชุดทดลองอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จำหน่ายในท้องตลาดจะมีแบบการทดลองด้านนี้น้อยไม่เจาะจงหรือเรียนรู้ได้ลึกซึ้งได้มาก [2][3][4]

การศึกษานี้ เป็นการพัฒนาชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นเฟสเดียว โดยการออกแบบและสร้างเป็นชุดทดลองการเรียนการสอนในหัวข้อไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่มีระบบไฟฟ้าขาเข้าเป็นระบบสามเฟสและมีระบบไฟฟ้าขาออกเป็นระบบหนึ่งเฟส

การศึกษานี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาชุดลองใช้เองภายในประเทศ ส่งเสริมการลดการนำเข้าชุดทดลองที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ การออกแบบชุดทดลองให้ความเฉพาะเจาะจงมีความลึกซึ้งต่อการเรียนรู้และการประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

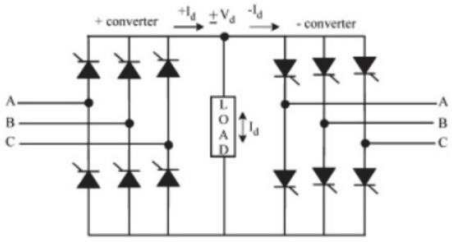
2. ชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส

ชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส มีส่วนประกอบแบ่งเป็นสองส่วน คือ วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส (Three-phase to Single-phase Power Switch Topology) และวงจรควบคุมสัญญาณขับเกต (Gate-driver Module) ดังต่อไปนี้

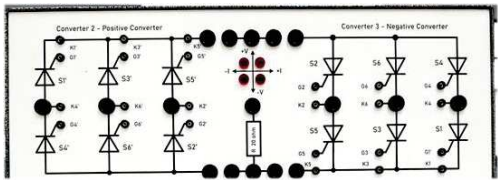
2.1 วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส

วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส มีโครงสร้างวงจรไฟฟ้ากำลังขาเข้าเป็นวงจรเรียงกระแสสามเฟสที่ใช้เอสซีอาร์ (SCR Three-phase Rectifier) เพื่อรองรับระบบไฟฟ้าขาเข้าสามเฟส และมีโครงสร้างวงจรไฟฟ้ากำลังขาออกเป็นกระแสตรงในแต่ละคอนเวอร์เตอร์ โดยให้แรงดันกลุ่มบวก และแรงดันกลุ่มลบ สลับกันไป โดยสามารถควบคุมความกว้างพัลส์ได้ จึงทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตตกคร่อมโหลดเป็นแบบหนึ่งเฟสที่สามารถปรับความถี่ได้ บทความนี้เลือกใช้วงจรทดลองคอนเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 2 แสดงแผงหน้าปัดชุดวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟสที่พัฒนาขึ้น โดยแผงหน้าปัดสร้างขึ้นจากพีวีซีหนา 8 มม. พิมพ์ลายวงจร การต่อไฟฟ้าระบบกำลังมีการแยกโดดจากการไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลงแรงดันต่ำ ติดตั้งปลั๊กต่อสายไฟฟ้า แบบนิรภัยขนาด 4 มม. (4 mm Safety Socket) สำหรับระบบกำลัง ส่วนระบบควบคุมต่อสายไฟฟ้าแบบเซฟตี้ ขนาด 2 มม. ทำให้ระบบกำลังไม่สับสนกับระบบควบคุม จึงปลอดภัยต่อการทดลองภาคปฏิบัติ



รูปที่ 1 วงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟส



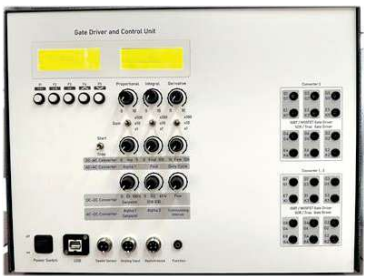
รูปที่ 2 แผงหน้าปัดชุดวงจรสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

2.2 วงจรควบคุมสัญญาณขับเกต

วงจรควบคุมสัญญาณขับเกตที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ออกแบบโดยผู้เขียนเพื่อใช้สำหรับควบคุมสัญญาณขับเขตสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังหลายรูปแบบ คือ สามารถขับเกตเอสซีอาร์ จำนวน 12 ตัวพร้อมกัน ขับไตรแอค จำนวน 3 ตัวพร้อมกัน ขับไอจีบีทีหรือมอสเฟส จำนวน 6 ตัวไซคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสเป็นหนึ่งเฟสที่พัฒนาขึ้นพร้อมกัน โดยสามารถเลือกขับเกต ให้ตรงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า คือ วงจรเรียงกระแส วงจรอินเวอร์เตอร์ วงจรคอนเวอร์เตอร์กระแสตรง-กระแสตรง และคอนเวอร์เตอร์กระแสสลับ-กระแสสลับ ซึ่งผู้เขียนได้ขึ้นคำขอจดอนุสิทธิบัตร ตามคำขอเลขที่ 24030021 ลงวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 สำหรับการศึกษานี้ [5]

วงจรควบคุมสัญญาณขับเกตสำหรับระบบไซโคลคอนเวอร์เตอร์พัฒนาขึ้นโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F28379D สร้างสัญญาณเกตการทำงานของสวิตช์ โดยสัญญาณเกตจะแยกเป็นกลุ่มคอนเวอร์เตอร์ด้านบวกจำนวน 6 พัลส์เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตช่วงบวกที่สามารถกำหนดคาบเวลาได้ และกลุ่มคอนเวอร์เตอร์ด้านลบจำนวน 6 พัลส์เพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตช่วงลบที่สามารถกำหนดคาบเวลาได้ ทำให้สามารถปรับลดความถี่ของแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการได้

ชุดทดลองสัญญาณขับเกตสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลังประกอบด้วยจอแอลซีดี สวิตช์กดติดปล่อยดับ โพเทนทิโอมิเตอร์ ขั้วสัญญาณเกต แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดควบคุมสัญญาณเกต

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสแปลงเป็นหนึ่งเฟส มีกระบวนการเริ่มต้นด้วย การศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงาน การศึกษาวิธีจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB การออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/Simulink การทดสอบสัญญาณขับเกต การออกแบบวงจรพิมพ์ลายสำหรับระบบกำลังและชุดขับเกต การประกอบชุดวงจรขับเกต การประกอบวงจรกำลัง และการทดสอบระบบ ดังรูปที่ 5

ชุดทดลองไซโคลคอนเวอร์เตอร์สามเฟสแปลงเป็นหนึ่งเฟสที่พัฒนาขึ้นได้แสดงวงจรกำลังดังรูปที่ 2 และวงจรขับเกตรูปที่ 3 เมื่อนำชุดทดลองทั้งสองส่วนมาต่อร่วมกันแสดงได้ดังรูปที่ 6 ประกอบด้วยชุดควบคุมสัญญาณเกตและชุดวงจรกำลังของไซโคลคอนเวอร์เตอร์

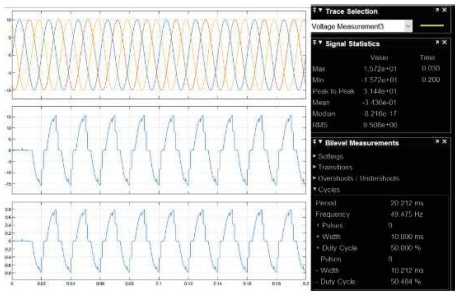
ชุดควบคุมมีหน้าที่หลักในการสร้างสัญญาณ เพื่อสั่งให้ไทริสเตอร์ในวงจรกำลังเปิดและปิดตามลำดับเฟสและความถี่ที่กำหนด

ชุดวงจรกำลังเป็นส่วนที่ ทำการแปลงพลังงานไฟฟ้าโดยทำงานภายใต้คำสั่งของชุดควบคุม เมื่อชุดควบคุมส่งสัญญาณให้ไทริสเตอร์ทำงาน วงจรกำลังจะเปลี่ยนความถี่ของไฟฟ้าจากสามเฟสให้กลายเป็นหนึ่งเฟสที่มีความถี่ต่ำลงตามต้องการ

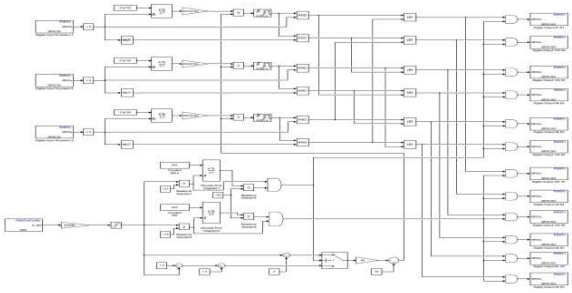
ในการทดลองจะเปรียบเทียบผลการจำลองและผลทดลองวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ความถี่ที่ 50Hz, 25Hz, 16.67Hz, 12.5Hz และ 6.52Hz โดยใช้ แหล่งจ่ายที่ 17 V_{LL} ความถี่ 50Hz และโหลดตัวต้านทานที่ 20 โอห์ม

4. ผลและอภิปราย

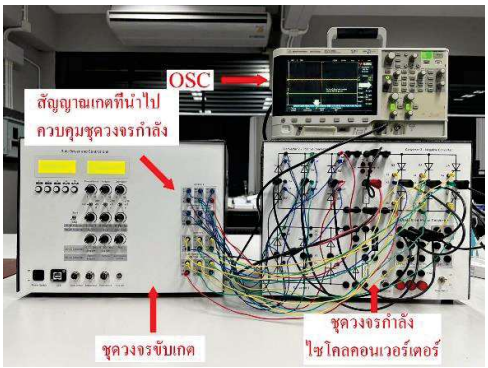
ผลการทดลองประกอบด้วย การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลทดลองวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ ความถี่ที่ 50Hz, 25Hz, 16.67Hz, 12.5Hz และ 6.52Hz โดยใช้ แหล่งจ่ายที่ 17 V_{LL} ความถี่ 50Hz และโหลดตัวต้านทานที่ 20 โอห์ม ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 ผลการ Simulation ที่ความถี่ 50 Hz



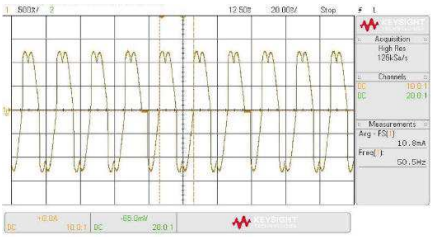
รูปที่ 5 การควบคุมวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ผ่านโปรแกรม Simulink



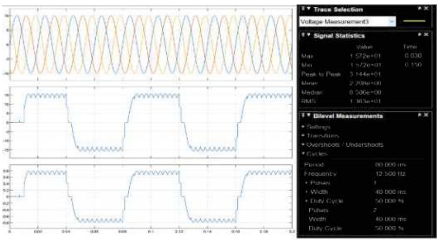
รูปที่ 6 การทดลองวงจรควบคุมและวงจรกำลัง

วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่พัฒนาขึ้น สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้โหลดความต้านทาน 20 โอห์ม ที่ระดับความถี่ 50 Hz

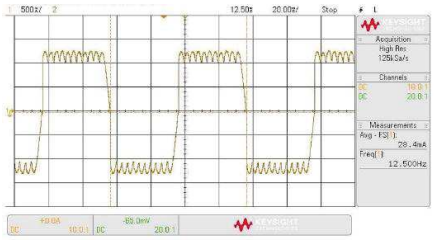
รูปที่ 4 แสดงผลการจำลองการทำงานของวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดเงื่อนไขการทำงานเมื่อใช้ แหล่งจ่ายที่ 17 V_{LL} ความถี่ 50Hz เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ระดับความถี่ 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 7 ผลทดลองสอดคล้องกับ [3-4]



รูปที่ 7 ผลจากการทดลอง ที่ความถี่ 50 Hz



รูปที่ 8 ผลการ Simulation ที่ความถี่ 12.5 Hz



รูปที่ 9 ผลจากการทดลอง ที่ความถี่ 12.5 Hz

รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 12.5 Hz

ชุดทดลองสามารถแสดงพฤติกรรมของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจน [5] อีกทั้งการใช้ชุดทดลองนี้ยังช่วยให้นักศึกษาสามารถเข้าใจวงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์ได้ดีขึ้น [6] และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ จะเห็นได้ว่าชุดทดลองนี้สามารถเป็นทางเลือกที่ต้นทุนต่ำและเหมาะสมกับสถานศึกษาที่มีงบประมาณจำกัด [7][8]

6. สรุป

ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจำลองและสร้างสัญญาณเกตได้อย่างถูกต้องผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ F28379D LaunchPad™ development kit for C2000™ Delfino™ MCU [5] อีกทั้งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่และแรงดันของสัญญาณได้อย่างยืดหยุ่น [6] ซึ่งช่วยให้นักศึกษาเข้าใจหลักการแปลงความถี่ของพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสสลับได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าชุดทดลองนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าและเหมาะสมกับการใช้งาน ในสถานศึกษาที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Perez, J. Balcells, M. Lamich, N. Berbel, J. Zaragoza and J. Mon, "Training kit for power electronics teaching," *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 3541-3545.

[2] A. Aghabeigi Heris, M. Sadeghi and E. Babaei, "A new topology for the three-phase to three-phase cycloconverters," *2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, Tehran, Iran, 2011, pp. 489-494.

[3] E. Haque, T. F. A. Nayna and F. Ahmed, "A pragmatic approach for quality enhancement in classroom teaching of engineering education in developing countries: A case study on power electronics," 2016 Future Technologies Conference (FTC), San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 349-354.

[4] J. Zhang, G. P. Hunter and V. S. Ramsden, "A single phase input cycloconverter driving a three phase motor," 1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, Brighton, UK, 1993, pp. 128-132 vol.5.

[5] สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์, อนนท์ นำอิน, และเอกนรินทร์ เถิงจาง, "ชุดทดลองสัญญาณขับเกตสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง," คำขอรับอนุสิทธิบัตร คำขอเลขที่ 24030021 วันรับคำขอ 15/07/2567, 8 หน้า.

[6] M. A. Goffar Khan, M. A. Malek and M. M. Hasan, "Experimental Analysis of Modified Single Phase Cycloconverter," 2019 3rd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE), Rajshahi, Bangladesh, 2019, pp. 113-116.

[7] Q. -C. Zhong, Y. Wang, Y. Dong, B. Ren and M. Amin, "Go Real: Power Electronics From Simulations to Experiments in Hours: Versatile Experimental Tool for Next Generation Engineers," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 7, no. 3, pp. 52-61, Sept. 2020.

[8] S. Setiyono and B. Dwinanto, "Performance Comparison Modeling Between Single-phase Cycloconverters and Three-phase Cycloconverters Using Matlab Simulink Tools", J. Ilm. Tek. Elektro Komput. Dan Inform, vol. 7, no. 2, pp. 217–229, Jul. 2021.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อมสำหรับเกษตรแนวตั้งในเขตเมือง

Multi-environment Control System for Urban Vertical Agriculture

อภิรักษ์ เสือเดช กฤตภาส หนูคง ศุภณัฏฐ์ แก้วประสิทธิ์ เสนอ สะอาด และ สุนทร รุ่งเรืองใบหยก*
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย E-mail: sunthorn.r@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

การขยายตัวของเมืองและการเพิ่มขึ้นของประชากรในเขตตัวเมืองส่งผลให้พื้นที่สำหรับการทำการเกษตรมีข้อจำกัด การทำการเกษตรในเมืองจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ บทความนี้นำเสนอต้นแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบหลายสภาพแวดล้อมสำหรับการเกษตรแนวตั้งในเขตเมืองโดยมีลักษณะเป็นตู้เพาะเลี้ยงหลายชั้นที่ควบคุมสภาพแวดล้อมอัตโนมัติ ระบบประกอบด้วยภาคอินพุต (วัดอุณหภูมิและความชื้น) ภาคประมวลผล และภาคเอาต์พุต (ควบคุมอุปกรณ์และแสดงผล) พร้อมการเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันบลิ้งค์ (Blynk) เพื่อการควบคุมและตรวจสอบข้อมูลจากระยะไกล ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เกิน ±0.3 องศาเซลเซียส และ ±4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้อย่างมีเสถียรภาพ ระบบนี้จึงสามารถลดการใช้พื้นที่การทำเกษตรแบบหลายสภาพแวดล้อมในเมืองได้ อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดในการควบคุมปริมาณแสงและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชบางประเภทได้

คำสำคัญ: ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้น, เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, เกษตรในเมือง

Abstract

The expansion of urban areas and the increasing urban population have resulted in limited space for urban agriculture. Therefore, the concept of innovative urban agriculture is an attractive alternative. This paper presents a prototype of multi-environment temperature and humidity control system for urban vertical farming, characterized by a multi-layer cultivation cabinet with automated environmental control. The system consists of three main components: an input section (temperature and humidity measurement), a processing section, and an output section (environmental control device activation and LCD display). Additionally, it can be connected to the Blynk application for remote control and data monitoring. The experimental results demonstrate that the system can control temperature and humidity, with an average error of ±0.3 degrees Celsius and ±4 percent, respectively. Furthermore, the system responds to environmental changes with stability. This system helps in reducing the land required for urban agriculture. However, it has limitations in controlling light intensity and carbon dioxide levels, which may affect the growth of certain plant types.

Keywords: Temperature and Humidity Control System, Internet of things Technology, Urban Agriculture

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการขยายตัวของเขตตัวเมืองอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประชากรเข้าสู่พื้นที่ตัวเมืองอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [1, 2] ส่งผลให้พื้นที่สำหรับการเพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์ในเขตเมืองมีข้อจำกัด เช่น ในอาคารพักอาศัยประเภทตึกแถวหรือคอนโดมิเนียม ด้วยเหตุนี้ ความสนใจในการทำเกษตรกรรมในเขตเมืองจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีวัตถุประสงค์หลากหลายทั้งการบริโภคในครัวเรือน การค้า และการเป็นงานอดิเรก อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อมในเขตตัวเมืองมักประสบปัญหาความไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกหรือเลี้ยงสัตว์ ข้อจำกัดด้านพื้นที่ และความต้องการในการควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้นซึ่งอาจต้องอาศัยอุปกรณ์หรือระบบควบคุมที่ซับซ้อน นอกจากนี้ การขาดแคลนเวลาในการดูแลอันเนื่องมาจากการปฏิบัติงานนอกพื้นที่พักอาศัย ส่งผลให้การดูแลเป็นไปอย่างไม่ทั่วถึง ดังนั้นระบบควบคุมสภาพแวดล้อมที่สามารถตอบสนองความต้องการและลดภาระในการดูแลจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชุมชนเมืองที่มีพื้นที่จำกัด

การขยายตัวของเมืองทำให้เกิดความต้องการทำการเกษตรในเมืองโดยมีการนำเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่ง [2] รวมถึงการทำการเกษตรในเมืองเพื่อความยั่งยืน [3] ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการทำ

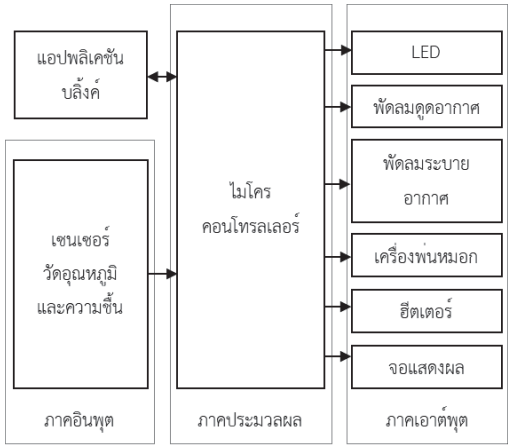
การเกษตรอัจฉริยะโดยช่วยควบคุมสภาพแวดล้อมทางการเกษตรได้อย่างแม่นยำและอัตโนมัติ เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือน [4, 5] นอกจากนี้ เกษตรแนวตั้งยังเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยใช้พื้นที่แนวตั้งในการเพาะปลูกและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ตลอดจนสามารถผลิตอาหารใกล้แหล่งบริโภค [6] อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมทางการเกษตรในปัจจุบันมักถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมเพียงสภาพแวดล้อมเดียว ซึ่งไม่เพียงพอต่อการปลูกพืชหรือเลี้ยงสัตว์ที่ต้องการสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การพัฒนาระบบควบคุมแบบอัจฉริยะที่สามารถจัดการหลายสภาพแวดล้อมได้พร้อมกันจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนในการทำการเกษตร

บทความนี้จึงนำเสนอต้นแบบระบบควบคุมควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบหลายสภาพแวดล้อมโดยมีลักษณะเป็นตู้เพาะเลี้ยงแบบหลายชั้นในรูปแบบการเกษตรแนวตั้งเพื่อรองรับการเพาะเลี้ยงในเขตเมืองหรืออาคารสูงที่มีพื้นที่จำกัดพร้อมทั้งใช้เทคโนโลยีไอโอทีเพื่อควบคุมและจัดการระบบจากระยะไกล

2. การออกแบบระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อม

2.1 หลักการทำงาน

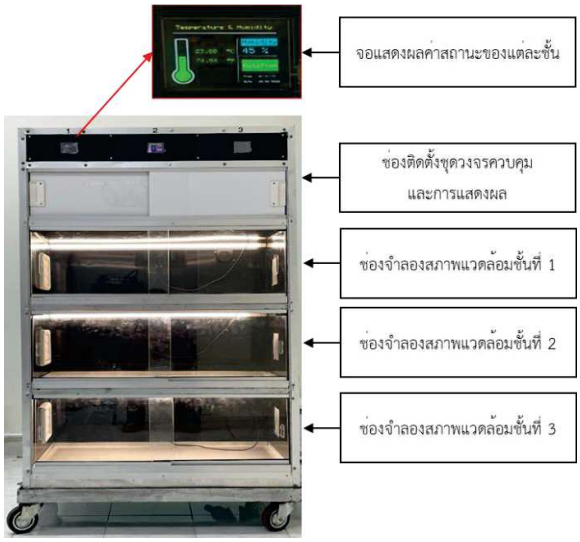
ระบบควบคุมนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ภาคอินพุต (เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น) ภาคประมวลผล (ไมโครคอนโทรลเลอร์) และภาคเอาต์พุต (พัดลมดูดและระบายอากาศ เครื่องพ่นหมอก ฮีตเตอร์ แถบไฟ LED และจอแสดงผล) นอกจากนี้ระบบยังมีการเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อม

2.2 โครงสร้าง

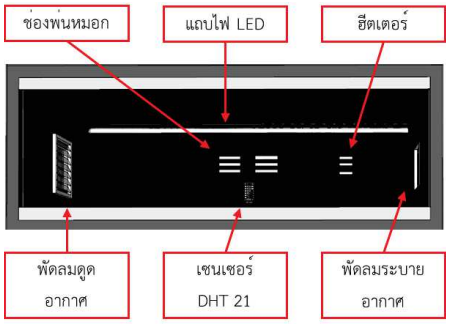
ระบบควบคุมนี้มีโครงสร้างหลัก 4 ชั้น โดยชั้นบนสุดติดตั้งชุดวงจรควบคุมและจอแสดงผล ส่วน 3 ชั้นล่างเป็นพื้นที่ปิดเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2 โดยแต่ละชั้นประกอบด้วยเซนเซอร์ DHT21 พัดลม ฮีตเตอร์ ช่องพ่นหมอก และแถบไฟ LED โดยอุปกรณ์เหล่านี้ทำงานร่วมกันอย่างอัตโนมัติเพื่อปรับและรักษาสภาพแวดล้อมภายในแต่ละชั้นตามค่าที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อม

2.3 วงจรควบคุมการทำงาน

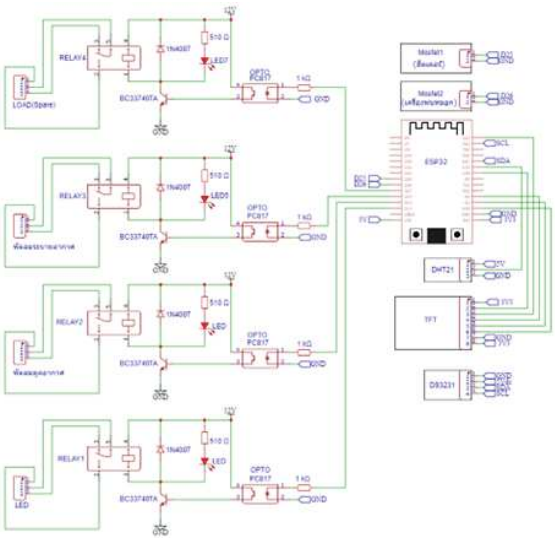
ระบบควบคุมนี้แปลงไฟ AC 220V เป็น DC 12V และ 5V เพื่อจ่ายให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยมีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหน่วยประมวลผลในการควบคุมอุปกรณ์ผ่านชุดวงจรรีเลย์ (ควบคุมพัดลมและแถบไฟ LED) ชุดวงจร MOSFET (ควบคุมฮีตเตอร์และเครื่องพ่นหมอก) และจอแสดงผล ระบบนี้ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างอัตโนมัติตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้โดยมีแผนผังวงจรไฟฟ้า ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อมในแต่ละชั้น

2.4 โปรแกรมการทำงาน

การควบคุมอุณหภูมิของระบบเริ่มจากการอ่านค่าอุณหภูมิและเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนด หากค่าอุณหภูมิน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะสั่งให้พัดลมระบายอากาศและพัดลมดูดอากาศหยุดทำงานพร้อมทั้งเปิดการทำงานของฮีตเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ ในทางตรงกันข้าม หากค่าอุณหภูมิไม่น้อยกว่าเกณฑ์ ระบบจะสั่งให้พัดลมระบายอากาศและพัดลมดูดอากาศทำงานเพื่อลดอุณหภูมิและฮีตเตอร์จะหยุดทำงาน หลังจากนั้นระบบจะแสดงค่าอุณหภูมิทางจอแสดงผลและวนกลับไปเริ่มต้นกระบวนการใหม่เพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ดังรูปที่ 5 ทั้งนี้ ระบบควบคุมที่นำเสนอมีการควบคุมสองตัวแปรพร้อมกันคือ อุณหภูมิและความชื้น โดยใช้หลักการทำงานตามแผนผังนี้เช่นเดียวกัน โดยการแทนที่ตัวแปรอุณหภูมิด้วยความชื้น เปลี่ยนฮีตเตอร์เป็นเครื่องพ่นหมอกแทนเพื่อปรับระดับความชื้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และเปลี่ยนการทำงานของพัดลมดูดอากาศให้ทำงานในกรณีที่ความชื้นน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 4 แผนผังวงจรไฟฟ้าและการต่อวงจรใช้งานในแต่ละชั้น

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

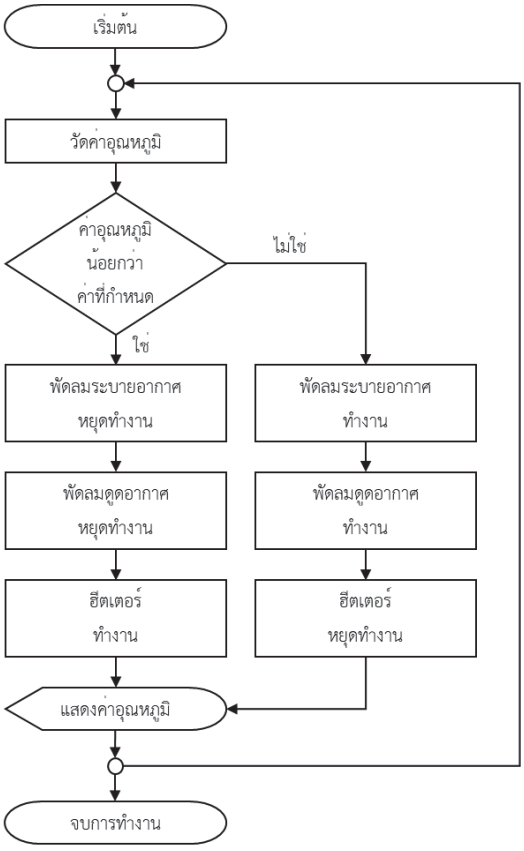
การทดลองนี้เป็นการจำลองการใช้งานจริงโดยควบคุมและติดตามระบบผ่านแอปพลิเคชันพร้อมกำหนดให้แต่ละชั้นของตู้เพาะเลี้ยงเป็นสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การทำงานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) ดังรูปที่ 6 แสดงการควบคุมสภาพแวดล้อมโดยมีโหมดสำหรับตั้งค่าอุณหภูมิและความชื้นผ่านจุดเลื่อนพร้อมแสดงค่าที่วัดได้ตามเวลาจริง และมีการตั้งเวลาเปิดปิดแถบไฟ LED ผลการทดลองพบว่าผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบ ปรับการตั้งค่าต่างๆ ได้ และระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการ

3.2 การทดลองควบคุมอุณหภูมิ

ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายนาทีของแต่ละชั้นในระบบในช่วงเวลา 0–30 นาที เส้นทึบแสดงค่าอุณหภูมิจริง และเส้นประแสดงค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ตั้งไว้ (ชั้น 1 ถึงชั้นที่ 3 คือ 30, 28 และ 26 °C ตามลำดับ) ดังรูปที่ 7 ผลการทดลองพบว่า ชั้นที่ 1 ใช้เวลาปรับอุณหภูมิ 8 นาทีและเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่นาทีที่ 10 หลังจากเกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ในทำนองเดียวกันชั้นที่ 2 และ 3 ปรับอุณหภูมิโดยใช้เวลา 4 และ 2 นาที และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวที่นาทีที่ 7 และ 6 ตามลำดับ อุณหภูมิในทุกชั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามลักษณะการทำงานของฮีตเตอร์ที่ให้ความร้อนแบบต่อเนื่อง ทั้งนี้ ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในช่วงที่อยู่ตัว โดยอยู่ในช่วง ±0.3°C



รูปที่ 5 ผังงานระบบควบคุมหลายสภาพแวดล้อม



รูปที่ 6 ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ของระบบ

3.3 การทดลองควบคุมความชื้น

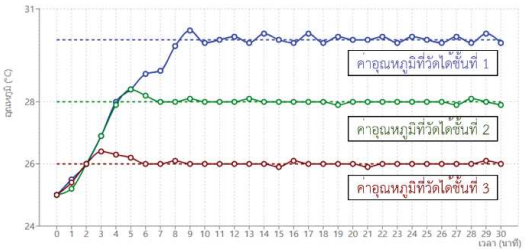
ผลการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์รายนาทีของแต่ละชั้นในระบบในช่วงเวลา 0–30 นาที เส้นทึบแสดงค่าอุณหภูมิจริง และเส้นประแสดงค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ตั้งไว้ (ชั้น 1 ถึงชั้นที่ 3 คือ 72, 66 และ 60 % ตามลำดับ) ดังรูปที่ 8 ผลการทดลองพบว่า ชั้นที่ 1 เพิ่มความชื้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น หลังจากนั้นค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะค่อย ๆ เพิ่มค่าความชื้นจนเข้าสู่ค่าเป้าหมาย อย่างไรก็ตามค่าความชื้นทั้งสามชั้นยังมีความไม่เสถียรโดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ±4% เนื่องจากการควบคุมเครื่องพ่นหมอกและพัดลมเป็นระบบเปิดปิดจึงไม่สามารถปรับระดับการทำงานได้อย่างละเอียดทำให้เกิดความผันผวนได้

4. สรุป

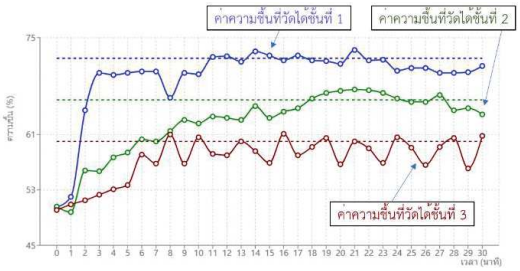
บทความนี้นำเสนอระบบควบคุมสำหรับการเกษตรแนวตั้งในเขตเมืองเพื่อแก้ไขข้อจำกัดด้านพื้นที่และรองรับการควบคุมแบบหลายสภาพแวดล้อม โดยต้นแบบเป็นตู้เพาะเลี้ยงแบบสามชั้นที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้โดยอัตโนมัติพร้อมทั้งเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อการควบคุมและตรวจสอบระยะไกล ระบบสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ระบบยังมีข้อจำกัดในการควบคุมความชื้นอย่างละเอียด รวมถึงปริมาณแสงและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชบางประเภทได้ ในอนาคตมีแนวทางพัฒนาระบบโดยประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์หรือระบบควบคุมแบบ PID ร่วมกับการใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำเพื่อเพิ่มเสถียรภาพและเสริมระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติในการทำงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้พื้นที่ตลอดจนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้ดำเนินการวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 7 ผลการควบคุมอุณหภูมิของแต่ละชั้น



รูปที่ 8 ผลการควบคุมความชื้นของแต่ละชั้น

เอกสารอ้างอิง

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Urbanisation Prospects 2018*, [Online].Available: https://population.un.org/wup/countryprofiles?country=Thailand , [27 มีนาคม 2568]

[2] N. N. Thilakarathne, H. Yassin, M. S. A. Bakar and P. E. Abas, "Internet of Things in Smart Agriculture: Challenges, Opportunities and Future Directions," 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE), Brisbane, Australia, 2021, pp. 1-9, doi: 10.1109/CSDE53843.2021.9718402.

[3] G. A. Azunre, O. Amponsah, C. Peprah, S. A. Takyi, and I. Braimah, "A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse," Cities, vol. 93, pp. 104-119, 2019, doi: 10.1016/j.cities.2019.04.006.

[4] ธีรวัฒน์ ชื่นอัศดงคต และ ศรายุทธ์ จิตรพัฒนากุล. (2565). การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิผ่านสมาร์ทโฟนสำหรับโรงเรือนปลูกผักสลัด. *วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 17(3), 33-46.

[5] วิเชียร ดวงสีเสน. (2565). การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนปลูกเมล่อน. *สักทอง : วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 9(1), 39-50.

[6] เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม. (2561). เรื่องน่ารู้ : การทำเกษตรกรรมแนวตั้ง (Vertical Farming). *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 22(1), 56-63.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบตรวจจับและติดตามสุกรในฟาร์มด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

Development of a Pig Detection and Tracking System in Farms Using Deep Learning Techniques

วิวรรธน์ สุเหร็น[1*], ธวัช ชูชิต[1], ธนวัฒน์ ศรีรักษา[2], ธีรยุทธ ทองทวี[3], ศุภชัย แก้วพวง[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
E-mail: wiwat.s@tsu.ac.th[1*], supachai.ka@tsu.ac.th[1*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจจับและติดตามสุกรในฟาร์มด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) รวมถึงการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเน้นการตรวจจับและติดตามพฤติกรรมของสุกรแบบเรียลไทม์ (Real-Tine) ซึ่งมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปศุสัตว์ เนื่องจากสามารถช่วยในการเฝ้าระวังสุขภาพสัตว์ ลดต้นทุนแรงงาน และเพิ่มประสิทธิภาพด้านบริหารจัดการภายในฟาร์ม สำหรับการพัฒนาระบบตรวจจับและติดตามสุกรทดสอบโดยใช้อัลกอริทึม YOLOv11s-seg ซึ่งใช้ตรวจสอบความแม่นยำ (***P***) ความลึก (***R***) และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (***mAP*0.5**) เพื่อประเมินการแบ่งส่วนภาพของอัลกอริทึม YOLOv11 ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ Yolov11s-seg, Yolov11n-seg และ Yolov11m-seg รวมทั้งใช้อัลกอริทึมสำหรับติดตาม BoT-SORT และ ByteTrack เพื่อประเมินค่า **MOTA** และ **MOTP** จากผลการทดสอบพบว่าการใช้อัลกอริทึม YOLOv11s-seg มีความแม่นยำและรวดเร็วกว่า YOLOv11n-seg และ YOLOv11m-seg ซึ่งมีค่าความแม่นยำ (***P***) เท่ากับ 98% และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (***mAP0.5***) เท่ากับ 95.8% รวมทั้งการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมสำหรับติดตามร่วมกับ YOLOv11s-seg ซึ่งมีค่า MOTA สูงสุด 80.3% และ MOTP 79.6% ด้วยเหตุนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจจับและติดตามพฤติกรรมของสุกรแบบเรียลไทม์และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, การเรียนรู้เชิงลึก, การติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ

Abstract

This article discusses the creation of a system for detecting and tracking pigs on farms, utilizing Artificial Intelligence (AI) and Deep Learning technologies. The main goal is to facilitate real-time observation of pig behavior, which is vital for the livestock sector as it aids in monitoring animal health, lowering labor expenses, and improving the efficiency of farm management. The detection and tracking system utilized the YOLOv11s-seg algorithm for its development and testing. This algorithm's segmentation performance was assessed based on precision (***P***), recall (***R***), and mean average precision (***mAP0.5***) metrics. Three variations of the YOLOv11 algorithm YOLOv11s-seg, YOLOv11n-seg, and YOLOv11m-seg were compared. Furthermore, tracking algorithms like BoT-SORT and ByteTrack were utilized to assess the system's tracking performance with **MOTA** (Multiple Object Tracking Accuracy) and **MOTP** (Multiple Object Tracking Precis. The experimental findings demonstrate that the YOLOv11s-seg algorithm surpasses both YOLOv11n-seg and YOLOv11m-seg regarding accuracy and processing speed, with a precision of 98% and a mean average precision (***mAP0.5***) of 95.8%. In addition, when used alongside the tracking algorithms, YOLOv11s-seg produced the highest MOTA of 80.3% and MOTP of 79.6%. The developed system is confirmed to effectively detect and track pig behavior in real-time with high accuracy and operational efficiency based on these findings.

Keywords: Artificial Intelligence (AI), Deep Learning, Multiple Object Tracking (MOT)

1. บทนำ

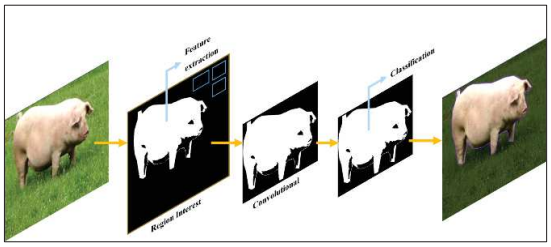
อุตสาหกรรมการเลี้ยงสุกรถือเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งเป็นผู้ผลิตและส่งออกผลิตภัณฑ์จากเนื้อสุกรรายใหญ่ในภูมิภาคเอเชีย การจัดการฟาร์มสุกรอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการลดต้นทุน เพิ่มผลผลิต และยกระดับคุณภาพ อย่างไรก็ตาม การบริหารจัดการฟาร์มขนาดใหญ่ยังคง

ประสบกับปัญหาหลายประการ เช่น การติดตามพฤติกรรมของสุกร ความสามารถในการตรวจจับสุกรที่ล้มป่วย ซึ่งมีผลต่อทั้งคุณภาพของผลผลิตและต้นทุนการดำเนินงาน [1] ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) โดยเฉพาะในด้านเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ทำให้การนำระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยเสริมประสิทธิภาพในการบริหารจัดการฟาร์มปศุสัตว์ เทคนิคเหล่านี้สามารถตรวจจับและติดตามวัตถุจากภาพและวิดีโอแบบเรียลไทม์ได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะสถาปัตยกรรม YOLO (You Only Look Once) ซึ่งเป็นหนึ่งในโมเดลการตรวจจับวัตถุที่ได้รับความนิยม นอกจากนั้นยังมีความรวดเร็วและความแม่นยำสูง [2-3]

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจจับวัตถุในระดับพิกเซล (Image Segmentation)

ในปัจจุบันการแบ่งส่วนภาพ (Image Segmentation) ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วจากการเติบโตของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ามาของเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ภาพได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง และการเทคนิคที่สำคัญอย่าง Instance Segmentation ซึ่งเกิดจากการร่วมกันระหว่างการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) และการแบ่งส่วนวัตถุในระดับพิกเซล (Semantic Segmentation) โดยถูกพัฒนาต่อยอดจากกระบวนการดึงคุณลักษณะ (Feature Extraction) และระบุตำแหน่งบริเวณที่สนใจ (Region of Interest: ROI) ต้องอาศัยการทำงานด้วยตัวเอง (hand-crafted features) ซึ่งมีข้อจำกัดทั้งในด้านความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 หลักการของ Mask R-CNN

การเข้ามาของ โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNNs) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ โดยสามารถเรียนรู้คุณลักษณะจากข้อมูลภาพได้โดยอัตโนมัติและแม่นยำยิ่งขึ้น ทำให้ถูกพัฒนาต่อยอดมาเป็นโมเดล Mask R-CNN โดยสามารถระบุตำแหน่งวัตถุผ่านกรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Box) การจำแนกประเภทวัตถุ (Classification) และการสร้างหน้ากาก (Mask) เพื่อระบุรูปร่างของวัตถุในระดับพิกเซลอย่างละเอียด โดยระบบจะนำข้อมูลคุณลักษณะจากหลายระดับของภาพ (Multi-scale Feature Maps) มาสร้างเป็นเวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature Vector) ที่มีขนาดคงที่และเข้าสู่ฟังก์ชัน SoftMax เพื่อแปลงค่าคุณลักษณะเชิงเส้นเป็นความน่าจะเป็น (Probability) สำหรับการจำแนกวัตถุ และผ่านเข้าสู่ชั้น Fully Connected Layer เพื่อทำกระบวนการ deconvolution ซึ่งช่วยปรับขนาดหน้ากากของวัตถุให้เท่ากับขนาดเดิมของภาพ [2]

การประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง สามารถประเมินได้จากค่าความแม่นยำ ความลึก และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) - (3) ตามลำดับ

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{1}$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

$$mAP50 = \frac{\sum_{i=0}^{n} \text{Precisionclass}_i}{n} \tag{3}$$

โดยที่ P คือ ค่าความแม่นยำ
R คือ ค่าความลึก
TP คือ ค่าบวกจริง (True positive)
FP คือ ค่าบวกเท็จ (False positive)
FN คือ ค่าลบเท็จ (False negative)
$mAP0.5$ คือ ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ
Precisionclass_i คือ ค่าความแม่นยำของแต่ละ Class
n คือ จำนวน Class

2.2 ซอฟต์แวร์ Roboflow

ในปัจจุบันเครื่องมือหรือซอฟต์แวร์สำหรับการการใช้งานในการ Labelling จัดเป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาโมเดลสำหรับการตรวจจับ ซึ่ง Roboflow จัดเป็นเครื่องมือสำหรับการเตรียมชุดข้อมูล (Dataset) ที่ให้บริการในการ Labelling และยังมีการรองรับการทำงานอีกหลากหลายส่วนในการเตรียมชุดข้อมูล การเพิ่มรูปภาพ (Image Augmentation) การส่งออกชุดข้อมูล (Export Dataset) และระบุคำอธิบายประกอบ (Annotate) ด้วย Roboflow นอกจากนี้ยังมี AI ภายในตัวซอฟต์แวร์ ทำให้สามารถระบุคำอธิบายประกอบภายในรูปภาพได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ [3]

2.3 การติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ

การติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ (MULTI-OBJECT TRACKING : MOT) คือ การตรวจจับวัตถุต่าง ๆ แบบหลายวัตถุในวิดีโอ ในการติดตาม

วัตถุที่สนใจจะตรวจจับในรูปแบบเฟรมต่อเฟรม โดยจะมีการกำหนด ID เฉพาะของวัตถุ และเก็บค่า ID เฉพาะนี้ไว้ในขณะที่วัตถุกำลังเคลื่อนที่ ในวิดีโอเฟรมถัดไป ในการประเมินการติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ มีการประเมินด้วยเมตริกการประเมินการติดตาม (Tracking evaluation metrics) ประกอบด้วยค่าความแม่นยำการติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ (Multiple Object Tracking Accuracy: MOTA) และค่าความเที่ยงการติดตามวัตถุแบบหลายวัตถุ (Multiple Object Tracking Precision: MOTP)

MOTA ใช้สำหรับวัดความแม่นยำโดยรวมของระบบการติดตามวัตถุหลายตัว โดยพิจารณาทั้ง *FN* , *FP* และการสลับ ID (ID Switches) ในการใช้เปรียบเทียบกับตำแหน่งจริง (Ground Truth) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$MOTA = 1 - \frac{(\Sigma_t FN_t + FP_t + IDS_t)}{\Sigma_t GT_t} \quad (4)$$

โดยที่: FN_t คือ จำนวนวัตถุที่ตรวจไม่พบในเฟรม t
FP_t คือ จำนวนวัตถุที่ตรวจพลาดในเฟรม t
IDS_t คือ จำนวนครั้งที่สลับ ID ในเฟรม t
GT_t คือ จำนวนวัตถุใน Ground Truth ในเฟรม t

MOTP ใช้สำหรับวัดความแม่นยำเชิงตำแหน่งของการจับคู่ระหว่างวัตถุที่ตรวจพบกับตำแหน่งจริง (Ground Truth) โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของระยะห่างของการจับคู่ที่ถูกต้องทั้งหมดในทุกเฟรมซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) [4-5]

$$MOTP = \frac{(\Sigma_{i,t} d_{i,t})}{\Sigma_t c_t} \quad (5)$$

โดยที่: $d_{i,t}$ คือ ค่าระยะห่างระหว่างวัตถุที่จับคู่ได้ในเฟรม t
c คือ จำนวนการจับคู่ที่ถูกต้องในเฟรม t

3. ระเบียบวิธีการและผลการทดสอบ

ในการพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพสุกร มีสำรวจเก็บภาพสุกรจากฟาร์มเลี้ยงสุกรแห่งหนึ่งในจังหวัดพัทลุง ซึ่งมีการจัดเก็บเป็นรูปภาพ 2 มุม จากกล้องต่างชนิดกัน ดังรูปที่ 2 เพื่อนำมาใช้เป็นชุดข้อมูล ซึ่งมีเพียงประเภทเดียว (Class) คือ สุกร (Pig) โดยมีรูปภาพถ่ายจำนวนทั้งหมด 1219 รูป แบ่งเป็นรูปภาพสำหรับการฝึก (Training) การตรวจสอบ (Validation) และการทดสอบ (Testing) มีอัตราส่วน 88:8:4 ตามลำดับ และคิดเป็นจำนวนรูปภาพถ่ายสำหรับ Training 1067 รูป Validation 102 รูป และ Testing 50 รูป ดังตารางที่ 1 ประเภทของจำนวนรูปภาพถ่ายที่ใช้ทั้งหมด นอกจากนี้ในกระบวนการการเพิ่มรูปภาพ (Image Augmentation) มีการปรับปรุงชุดข้อมูลให้มีความสว่างเพิ่มระหว่าง ±10° และค่าสี Hue ±15° และเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในบทความนี้ ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 รูปภาพสุกรในสภาพแวดล้อมจริง

ตารางที่ 1 ภาพรวมของชุดข้อมูล

Title	Description
Number of Class	1
Total Number of Input Images	1219
Training Images	1067
Validation Images	102
Testing Images	50
ความสว่าง	±10°
Hue	±15°

ตารางที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

Operating environment	Version
Operating System	Window 11
Language	Python 3.10
CUDA	11.8
GPU	GTX2060
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-10300H

4. ผลการทดสอบ

ในบทความนี้การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพ เพื่อช่วยตรวจจับและติดตามสุกรในฟาร์ม เพื่อสำรวจพฤติกรรมของสุกรเบื้องต้น ได้นำอัลกอริทึม YOLO และอัลกอริทึมสำหรับติดตามที่ใช้ร่วมกับ YOLOv11s-seg ซึ่งมีการใช้ผลความแม่นยำ(P) ความลึก(R) และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ(mPA) ในการประเมินการแบ่งส่วนภาพของอัลกอริทึม YOLOv11 3 รูปแบบ ดังนี้ Yolov11s-seg, Yolov11n-seg และ Yolov11m-seg ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 3 และนอกจากยังมีการใช้งานอัลกอริทึมสำหรับติดตาม BoT-SORT และ ByteTrack ร่วมกับ YOLOv11s-seg ซึ่งผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4 จากผลการทดสอบพบว่าการเลือกใช้โมเดล YOLOv11s-seg ทำให้การตรวจจับมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเลือกใช้

โมเดลอื่น เนื่องจากค่าความแม่นยำของโมเดลทั้ง 3 มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้การเลือกโมเดลที่มีขนาดเล็กที่สุดจะทำให้การประมวลผลมีความรวดเร็ว

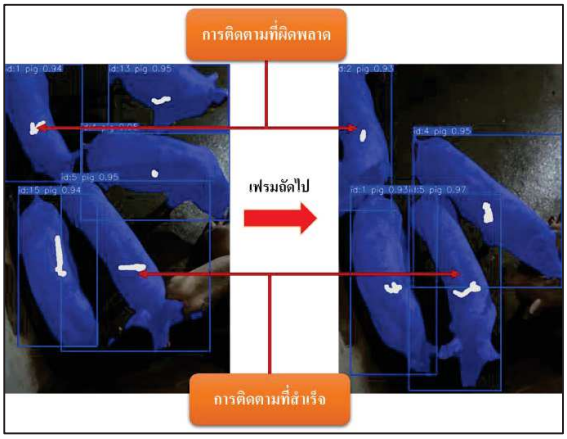
ตารางที่ 3 ผลทดสอบของอัลกอริทึม YOLOv11 3 รูปแบบ

Model	*P*	*R*	*mAP*0.5
Yolov11s-seg	**0.980**	**0.980**	**0.958**
Yolov11n-seg	0.926	0.870	0.917
Yolo11m-seg	0.944	0.919	0.932

ตารางที่ 4 ผลทดสอบของอัลกอริทึมการติดตามร่วมกับ YOLOv11s-seg

Tracker	MOTA	MOTP
BoT-SORT	0.754	0.790
ByteTrack	0.803	0.796

ในการติดตามสุกร พบว่ายังมีปัจจัยด้านข้อจำกัดในการใช้งานจริงเนื่องจากสาเหตุที่หลากหลาย โดยเฉพาะในกรณีที่สุกรมีการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว หรือมีการซ้อนทับกันของร่างกายหลายตัวในเฟรมเดียวกัน ส่งผลให้โมเดลไม่สามารถรักษาความต่อเนื่องของการติดตาม ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 3 พบว่ามีการเปลี่ยนหมายเลข ID ของสุกรจาก ID:1 ในเฟรมหนึ่ง ไปเป็น ID:2 ในเฟรมถัดไป ทั้งที่เป็นวัตถุตัวเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงข้อผิดพลาด ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์พฤติกรรมของสัตว์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้รูปที่ 4 มีการแสดงตัวอย่างการติดตามที่ถูกต้องด้วยเช่นกัน โดยพบว่าสุกร ID:5 ในเฟรมหนึ่งยังคงรักษาความต่อเนื่องในการติดตามได้ในเฟรมถัดไป และเส้นทางการเคลื่อนที่ของสุกรในรูปแสดงเป็นสีขาว



รูปที่ 3 การแบ่งส่วนภาพและการติดตามสุกร

5. สรุป

การพัฒนาการแบ่งส่วนรูปภาพสุกร สามารถตรวจจับสุกรได้อย่างแม่นยำด้วยการใช้อัลกอริทึม YOLOv11s-seg ซึ่งมีความแม่นยำและรวดเร็วกว่า YOLOv11n-seg และ YOLOv11m-seg มีค่าความแม่นยำ(P) 98% และค่าเฉลี่ยความแม่นยำ(mAP0.5) 95.8% และสามารถประมวลผลได้เรียลไทม์ ในส่วนการติดตามมีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมสำหรับติดตามร่วมกับ YOLOv11s-seg ซึ่งมีค่า MOTA สูงสุด 80.3% และ MOTP 79.6% โดยการใช้งานจริง พบว่าการติดตามเพื่อระบุสุกรแต่ละตัวยังมีข้อจำกัด โดยสาเหตุของความผิดพลาดอาจมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ความล่าช้าในกระบวนการประมวลผลของโมเดล ลักษณะทางกายภาพของสุกรที่คล้ายกัน และความไม่เสถียรของภาพจากกล้องในสภาพฟาร์มที่มีสภาพแสงและพื้นหลังเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779-788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.

[2] D. Bolya, C. Zhou, F. Xiao, and Y. J. Lee, “YOLACT: Real-Time Instance Segmentation,” in Proc. 2019 IEEE/CVF Int. Conf. on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea (South), 2019, pp. 9156 9165.

[3] D. Deepa, A. Sivasangari, R. Roonwal and R. Nayan, “Pothole Detection using Roboflow Convolutional Neural Networks,” in Proc. 2023 7th Int. Conf. on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2023, pp. 560-564, doi: 10.1109/ICICCS56967.2023.10142700.

[4] L. Kalake, W. Wan and L. Hou, "Analysis Based on Recent Deep Learning Approaches Applied in Real-Time Multi-Object Tracking: A Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 32650-32671, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060821.

[5] F. Ahmad, A. Chauhan and P. Singh, "Multi Object Tracking System form Video Streaming using Yolo," *2023 4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, Bangalore, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCAT59970.2023.10353400.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

Development of High Voltage DC Power Supply for low power X-ray Device

Patnaree Tatiyanukulpong[1,*] Nithiphat Teerakawanich[1] and Siriroj Sirisukprasert[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Kasetsart University , Bangkok ,Thailand
Email: patnaree.ta@ku.th*

Abstract

This paper presents the development of a prototype low-power X-ray device based on a push-pull resonant converter, utilizing natural resonant switching to simplify control and reduce switching losses. Designed for battery operation with a low input voltage, the prototype was tested with a low-power X-ray tube and validated using radiation measurement instruments. Results show that while not the most optimal, the proposed high-voltage power supply is viable for X-ray procedures, highlighting its potential as a simple, low-cost solution for X-ray and other applications.

Keywords: Low-power X-ray generator, Voltage multiplier High voltage**.**

1. Introduction

High voltage in the range of 20–140 kV is widely used in various applications, notably in medical imaging, where it plays a critical role in generating X-ray beams for diagnostic purposes [1]. In such procedures, radiation parameters are adjusted based on tissue thickness and characteristics to produce accurate radiographic images. Accordingly, a reliable and adjustable high-voltage power supply is essential to ensure optimal image quality [2,3].

As technology has advanced, smaller components have made high-voltage power supplies more efficient and compact, as highlighted by Research [4,5] on the development of compact high-voltage supplies using high-frequency switching circuits, most commonly employing flyback converters with high-turn winding transformers across various fields. However, due to the nonlinear response of transformers and high switching losses caused by parasitic components [6], flyback converters are less suitable for continuous operation and variable voltage applications.

Research [7] demonstrates the use of a stacked voltage multiplier connected to a high-voltage transformer to boost the output into the range required for X-ray applications. These advancements have enabled the development of small, low-power portable X-ray systems, offering compact and lightweight designs for convenient operation in space-constrained environments.

This paper proposes an improved design that addresses the identified weaknesses while maintaining portability. It presents the development of a low-cost high-voltage power supply for compact, low-power X-ray systems, featuring adjustable kV parameters to accommodate objects of varying densities. The circuit is based on a self-oscillating resonant converter, which minimizes switching losses and simplifies modulation control.

2. Design of Voltage conversion

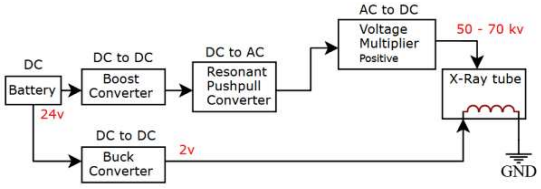


Fig. 1 Block diagram of voltage conversion

This research aims to experiment with the CANON X-ray tube model D-0711. According to the tube's characteristics, a voltage in range of 50-70 kV will be applied between the anode and cathode of X-ray tube to produce X-ray beams. The design focuses on portability, using a 24V source voltage, which can be supplied by battery. A buck converter is used to generate 2V for heating the filament coil of the X-ray tube.

2.1 Boost converter

In the first stage of voltage conversion, a boost converter steps up the voltage from 24V to a range of 24 to 48V. This stage plays an important role in adjusting the overall voltage supplied to the system.

2.2 Self-oscillating push-pull converter

From Fig. 1, the DC-to-AC section, which transforms low-voltage DC into high-voltage AC, consists of the main circuit. This circuit is based on self-oscillating push-pull resonant converter connected to high-voltage transformer and load at the ending point, forming an LCR parallel resonant tank.

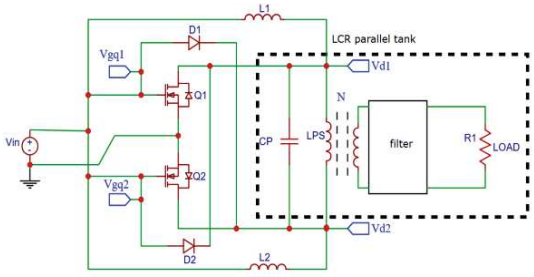


Fig. 2. Push pull converter with LCR parallel resonant tank

When V_{in} is applied to the circuit in Fig. 2, one of the FET (Q_1, Q_2) begins to turn ON, initiating current flow into the LC tank and causing oscillatory behavior. In case Q_1 is in the ON mode, the drain pin of Q_1 is connected to ground. Diode D_2which is connected to the drain of Q_1, causes Q_2 to remain in the OFF mode. Voltage at anode of D_1 will be equal to V_{in}, while its cathode will equal the resonant voltage V_{d2} with an amplitude of (1)

$$\mathrm{Vd1_{peak}}, \mathrm{Vd2_{peak}} = \pi \times \mathrm{V_{in}} \quad (1)$$

D_1 stays in reverse bias which causes Q_1 to turn on until the resonant voltage V_{d2} becomes lower than V_{in}. As V_{d1} rises, the cycle repeats, causing Q_2 to turn ON and Q_1 to turn OFF. This feedback mechanism of diodes, alternates the gate drive signals (V_{gq1}, V_{gq2}), ensuring that the FETs switch ON and OFF in sync with the oscillations of the LC tank at its resonance frequency



Fig. 3. The measured voltage at primary side of transformer when V_{in}equal 24 v

However, the switching frequency of a self-oscillating converter depends on the overall LC value, including parasitic inductance and capacitance components observed from the load side [8,9]. Using an approximate frequency to calculate turn winding is also a viable option, but feedback is needed to verify and compensate for the output voltage.

2.3 Voltage multiplier

Cockcroft-Walton voltage multiplier is used to step up the AC voltage from the secondary side of a high-voltage transformer and convert it into DC voltage.

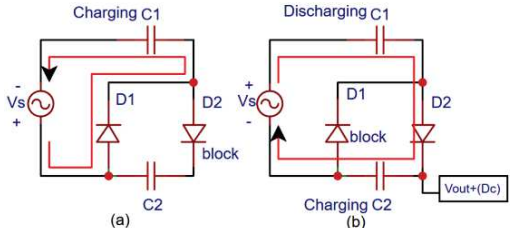


Fig. 4. Operation of the voltage multiplier (a) When 8is positive.(b) When 8is negative.

During the positive cycle of 8in Fig. 4(a) current flows through diode &4to charge %5When 8reverses polarity to negative as Fig. 4(b), current flows through &6 , and %6begins to discharge. The discharged voltage passes through &6and begins to charge %6This cycle repeats until the voltage across %6equals twice the peak , voltage of 8under loaded conditions as (2)

$$8_E \quad L\ t\ _{q\ nc}\ \_F\frac{j\ m}{q\ H}\ h\ t\ \frac{7}{u}\ \frac{6}{t}\ E\ u; \quad (2)$$

2.4 Feedback and Compensation

A boost converter receives feedback from a scaled high voltage and compensates its output, which is fed to a push-pull converter to regulate the amplitude of the resonant voltage, maintaining a fixed 50% duty cycle, block diagram of feedback control circuit is shown as Fig.5

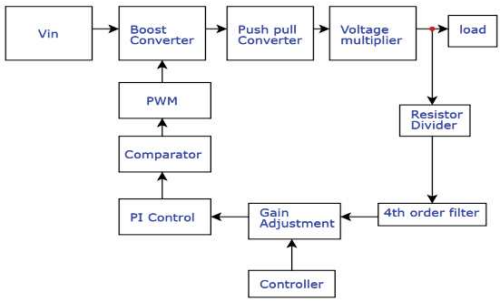


Fig. 5. Block diagram of the circuit

Voltage adjustment is achieved by varying the gain of the op-amp feedback circuit, which is controlled via a digital potentiometer. This approach enables dynamic scaling of the feedback voltage, allowing the system to compensate its input voltage based on the user-selected output voltage level.

2.5 Hardware Specification and Setup

Table.1 presents the hardware components, as detailed in Figures 2 and 4

Table .1 Hardware Specification

Circuit	Prefix	Component	Specification
Push-Pull Converter	5 E6	Inductor	100uH
	%	Resonant Cap	4.33uF
	0	Transformer ratio	1:66
Voltage Multiplier	% E6	HV Capacitor	3nF/15kV
	&5 E6	HV Diode	100mA/15kV
Load	45	Dummy load Resistor	50MOhm

Hardware is set up as shown in Fig. 6. The transformer and voltage multiplier sections are placed in insulating oil to prevent high-voltage arcing.

The kV parameter can be selected on the function controller board within a range of 50 to 70 kV, with increments of 2.5 kV per step.

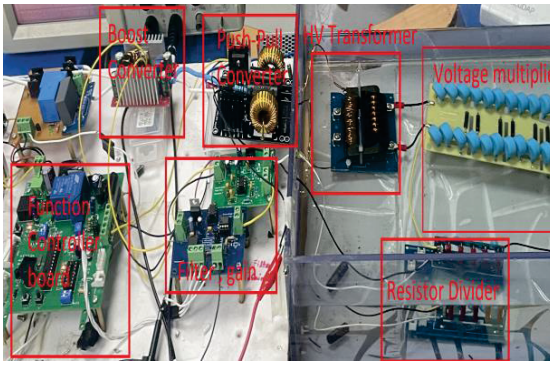


Fig. 6. Hardware Setup

3. Result and Discussions

3.1 Voltage measurement

Voltage measurements of the boost converter and the scaled high-voltage output were taken using a 100,000:1 ratio in Figs. 7

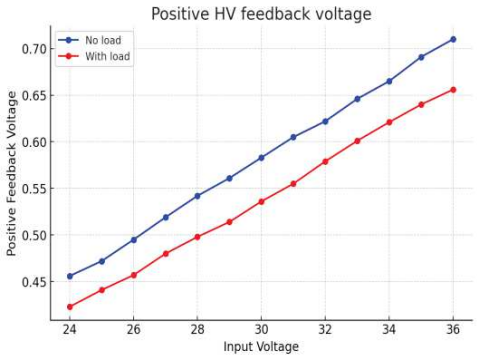


Fig.7 Scaled voltage under open-loop conditions, with and without a load

Due to approximate frequency parameters in transformer winding calculations, the scaled voltage is lower than the expected value. A closed-loop control system compensates by feeding the scaled voltage into an error amplifier, generating a PWM signal to drive the boost converter, and adjusting the system voltage based on the deviation. As shown in Fig. 5, voltage adjustment is achieved by multiplying the scaled voltage with a gain value controlled by the controller.

Table .2 presents the parameters in the following order: selected kV, calculated boost converter output voltage (V_{cb}), amplifier gain value, non-compensated scaled voltage (V_{nc}), under-operated boost converter's output voltage (V_o), recorded under steady-state conditions with a dummy load.

Table .2 Measured parameters

Kv	V_{cb}	$Gain$	V_{nc}	V_o
50	24.0	10	0.466	27.2
52.5	25.2	9.643	0.492	28.2
55	26.4	9.286	0.514	29.2
57.5	27.6	8.928	0.535	30.6
60	28.8	8.571	0.556	32
62.5	30.0	8.214	0.582	33.1
65	31.2	7.857	0.604	34
67.5	32.4	7.499	0.622	35.2
70	33.6	7.142	0.649	36.4

3.2 Radiation parameter measurement

A 65 kV potential is applied to the X-ray tube for 1 second. The kilovoltage peak (kV_p) and kilovoltage effective (kV_e), which are key radiation parameters, are measured using the RMI Model 240A Radiation Meter equipped with an ionization chamber. The results from both closed-loop and open-loop systems with compensated voltage are compared, as shown in Table .3

The VacuDAP dose area product meter measures total radiation by multiplying the dose through the sensor window by the exposed area. X-ray dose is recorded while stepping the voltage from 55 kV to 65 kV in 2.5 kV increments. The results are shown in Fig. 9.

As shown in Fig. 8, the DAP meter is placed near the X-ray tube, and the multifunction meter is set 8 cm from the anode target. Results are averaged from 10 measurements, with a 20 second cool-down between each.

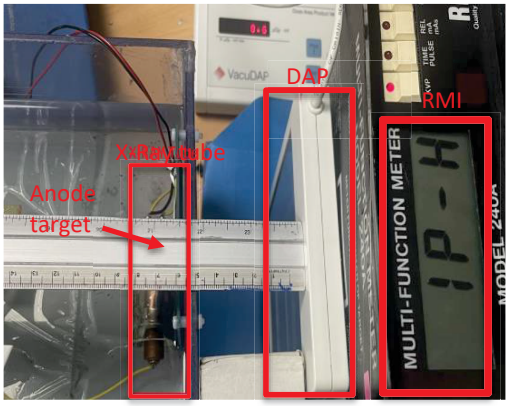


Fig. 8 Radiation measurement setup

Table .3 Radiation parameter measurement

Parameter	Measured with open loop condition	Measured with close loop condition
kVp	65.1	64.9
kVe	59	54.3

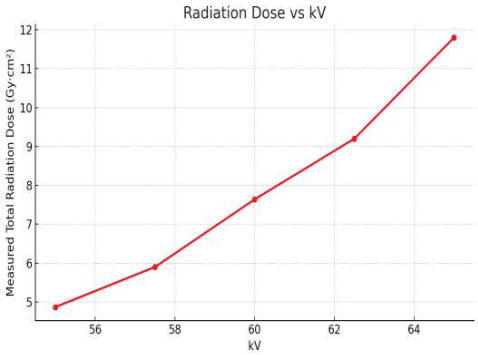


Fig. 9 Radiation dose measurement



Fig. 10. Radiographic image produced by the designed high-voltage power supply

From Table .3 both control methods achieve the desired kV within ±10% of the mean value. Normally, kV_e should be close to kV_p parameter. The shift in value is primarily due to system delay during initialization, caused by the capacitive nature of the voltage multiplier and X-ray tube. However, the kV_e in the closed-loop system is lower than that in the open-loop system because the voltage compensation control requires additional time, as the PWM of the boost converter is held off until the system reaches a steady-state voltage. In contrast, the open-loop system starts with a pre-compensated voltage, resulting in a higher kV_e value.

Another factor influencing the kV_e value is the input current. Higher input current shortens the voltage rise time by charging the capacitive load faster. In contrast, a self-oscillating push-pull converter at resonant frequency transfers minimal current, inherently slowing the rise time. However, in X-ray procedures, where only a short exposure time is required, this behavior becomes a limiting factor.

Fig. 9 shows that the radiation dose nearly doubles as the voltage increases from 55 kV to 62.5 kV, consistent with the 15% rule, where a 15% increase in kV_p approximately doubles the dose. This principle can be applied to reduce exposure time while maintaining kV_p, still achieving the desired dose, which is beneficial for low power X-ray systems with limited power resources.

4. Conclusions

The designed high-voltage supply supports a 50–70 kV output for 15% radiographic techniques. While adequate for radiographic imaging, circuit limitations may reduce its suitability for X-ray use, leading to degraded image quality. Future work could incorporate feedforward control to reach the target voltage faster, reducing compensation error and improving loop stability. Using more precise feedback components could further enhance kV output accuracy.

References

[1] D. R. Dance, Diagnostic radiology physics: A handbook for teachers and students, Vienna, Austria: *International Atomic Energy Agency*, 2014.

[2] N. Chanlumpoo, "Optimization of the exposure techniques for digital radiography in *phantom," Thammasat University Hospital Journal Online*, vol. 4, no. 1, pp. 14-30, 2019.

[3] S. Sharma, A. Gupta, and R. Patel, "Comparison of fluoroscopic and radiographic imaging of long bones in *healthy dogs," Journal of Applied Animal Research*, vol. 41, no. 3, pp. 339-346, 2013.

[4] R. M. Muktadir and I. M. Asif, "Variable HVDC supply using Flyback transformer with several protective features to the output power BJT/MOSFET," in *Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2011

[5] B. Kang and K.-S. Low, "High-voltage pulsed power supply for the igniter circuit of a pulsed plasma thruster," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Honolulu, USA, Dec. 2017, pp. 945–949.

[6] M. M. Munir, D. Hapidin, and K. Khairurrijal, "Designing of a high voltage power supply for electrospinning apparatus using a high voltage flyback transformer (HVFBT)," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 771, pp. 145-148, 2015.

[7] F. Li, J. Zhang, W. Chen, and H. Zhao, "Design and research on high voltage power supply of medical X-ray machine," in *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (ICMA), 2016.

[8] Y.-R. Yang, "Analysis and design of a current-fed push-pull parallel-resonant converter for cooker magnetrons," in *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies* (ICSET), New Taipei City, Taiwan, Dec. 2016, pp. 300–305.

[9] C.-H. Lin, J. Ahmad, H.-D. Liu, and T.-H. Kao, "High-voltage autonomous current-fed push-pull converter with wireless communication applied to X-ray generation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*: Express Briefs, vol. 70, no. 4, pp. 1545-1549, Apr. 2023

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติผ่านระบบ IoT บริเวณพื้นที่ใกล้นากุ้งจังหวัดจันทบุรี

Automatic Soil Salinity Measurement through IoT System in the Area near Shrimp Farms in Chanthaburi Province

กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[1*] ณัฐวุฒิ ผ่องหนู[2] สมพร ศรีวัฒนพล[3] ฐาปนา นามประดิษฐ์[4] และ พงศภรณ์ ชาติสุทธิ[5]

[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

[2]สาขาวิชาสาขาวิชาวิทยาศาสตร์การกีฬาและการออกกำลังกาย คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี

[3]สาขาวิชาสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

[4]สาขาวิชาวิศวกรรมบูรณาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

[5]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

E-mail: kamonpad_ma@rmutto.ac.th*

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติผ่านเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ในพื้นที่ใกล้นากุ้งจังหวัดจันทบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปัญหาความเค็มในดิน โดยการใช้เซ็นเซอร์วัดค่าความนำไฟฟ้า (EC) ในการวัดระดับความเค็มของดิน ระบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลค่าความเค็มได้อย่างต่อเนื่อง โดยทำการเก็บข้อมูลดินบริเวณนากุ้งความลึก 3 เมตร 6 หลุมห่างกันหลุมละ 5 เมตรแสดงผลในโทรศัพท์มือถือ ผลการทดลองในพื้นที่ศึกษาพบว่าระบบสามารถแสดงผลของค่าความเค็มตามระดับความเค็มได้ทั้งในแนวลึกและตามความยาว เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำนายการกระจายค่าความเค็มของดินในอนาคตเพื่อการบริหารจัดการน้ำในการเพาะปลูก

คำสำคัญ: ความเค็มของดิน, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT), ระบบตรวจวัดอัตโนมัติ, ค่าความนำไฟฟ้า

Abstract

This research project aims to develop an automatic soil salinity monitoring system using Internet of Things (IoT) technology in shrimp farming areas of Chanthaburi Province, a region affected by high soil salinity. The system employs electrical conductivity (EC) sensors to measure salinity levels and is designed to collect continuous data. Soil samples were collected from six boreholes, each 3 meters deep and spaced 5 meters apart around the shrimp farm area. The system is capable of transmitting real-time salinity data to mobile devices for convenient monitoring. Experimental results indicate that the system can effectively measure and visualize salinity levels both vertically and horizontally across the study area. The collected data serves as a foundation for developing mathematical models to predict future salinity distribution, which can support strategic water management in agriculture.

Keywords:Soil salinity, IoT, automatic monitoring, electrical conductivity

1. บทนำ

จังหวัดจันทบุรีมีพื้นที่ติดทะเล จึงทำให้เกษตรกรทำอาชีพเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งพื้นที่ส่วนมากจะเป็นบ่อเลี้ยงกุ้ง เนื่องจากในอดีตการส่งออกกุ้งมีรายได้ดี เกษตรกรจึงนิยมทำการเลี้ยงกุ้งเป็นจำนวนมาก การเลี้ยงกุ้งซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อดินเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะสิ่งตกค้างจากน้ำทะเลหรือเกลือ จะทำให้ดินมีความเค็มหรือเกลือและโซเดียมปริมาณสูงขึ้น ยิ่งมีการเลี้ยงกุ้งเป็นระยะเวลานานความเค็มและโซเดียมยิ่งสะสมในดินสูงจนในที่สุดทำให้เกิดการเสื่อมโทรมของดินจนยากที่จะแก้ไข นอกจากนี้ปัญหาการขาดแคลนน้ำจืดเพื่อการเกษตรกรรมก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเพาะปลูก การขุดบ่อเลี้ยงกุ้งจะทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำจืดเพื่อใช้ในการเกษตร เพราะมีผลกระทบต่อน้ำใต้ดิน ทำให้น้ำใต้ดินเค็ม น้ำใต้ดินยกตัวสูงขึ้นและโครงสร้างของดินถูกทำลาย การเลี้ยงกุ้งทำให้เกิดปัญหาน้ำใต้ดินเค็มเนื่องจาก น้ำที่ใช้เลี้ยงกุ้งซึมลงไปผสมกับน้ำใต้ดิน ทำให้ความเค็มแพร่กระจายลงไปผสมกับน้ำใต้ดินมากยิ่งขึ้น การเลี้ยงกุ้งจะทำให้น้ำใต้ดินขึ้นมาอยู่ใกล้ผิว ดินมากขึ้นเนื่องจากน้ำจากบ่อเลี้ยงกุ้งจะค่อยๆ ซึมลงไปผสมกับน้ำใต้ดิน ทำให้เกิดปัญหากับการปลูกพืชเศรษฐกิจ เนื่องจากทำให้รากพืชเน่าและเกลือที่ผสมอยู่ก็ก่อให้เกิดพิษกับพืชนั้นด้วย ในปัจจุบันมีเกษตรกรบางรายได้เปลี่ยนพื้นที่การเลี้ยงกุ้งเป็นการปลูกสวนผลไม้โดยเฉพาะทุเรียนในพื้นที่ใกล้เคียงกับนากุ้งเดิม เพราะปัจจุบันราคาผลผลิตทุเรียนสูงเนื่องจากการส่งเสริมการส่งออกจากภาครัฐ จึงทำให้เกษตรกรลงทุนในพื้นที่เพื่อทำการเพาะปลูกขยายวงกว้างมากขึ้น

ปัจจุบันระบบIoTมีความสำคัญต่อมนุษยชาติอย่างมากเพราะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ข้อมูลและแก้ปัญหาต่างๆได้อย่างมากมาย เมื่อเราสามารถออกแบบเครื่องมือที่สามารถใช้งานควบคู่กับระบบIoTได้ ก็ยิ่งจะสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้หลากหลายมากขึ้น ทั้งนี้สามารถนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความเค็มของดินในอนาคตทำให้เกษตรกรสามารถบริหารจัดการน้ำเพื่อการเพาะปลูกในอนาคตได้ดียิ่งขึ้น[1-6]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติ โดยใช้เซ็นเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity Sensor)

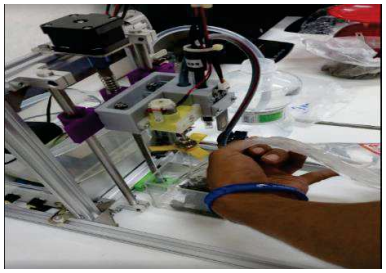
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สำรวจพื้นที่ ต.บางกะไชย อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี และเตรียมอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดิน

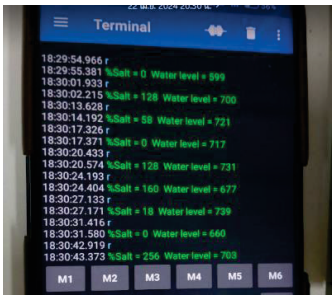
3.2 นำตัวอย่างดินบริเวณนากุ้งมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ



รูปที่ **1** ชั่งน้ำหนักตัวอย่างดิน

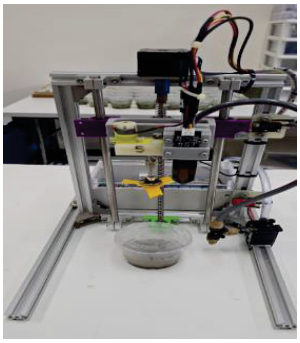


รูปที่ **2** นำตัวอย่างดินมาวัดความเค็มกับเครื่องวัดความเค็ม IoT



รูปที่ **3** แสดงผลผ่านโทรศัพท์มือถือ

3.3 วิธีการใช้งานเครื่องวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติผ่านระบบIoT



รูปที่ **4** เครื่องวัดระดับความเค็มของดินแบบอัตโนมัติผ่านระบบIoT

วิธีใช้งาน

1. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟ

1.1 กรอกของเหลวที่ผ่านการกรองเข้ากรวยรับบนหน้าปัทม์เครื่อง

1.2 กดปุ่มสตาร์ท ของเหลวถูกวาล์วไฟฟ้าปล่อยไหลเข้ามาในระบบเซนเซอร์

2. ระบบตรวจวัดภายเครื่อง เกิดการไหลของเหลว ส่งเข้าพื้นที่ Reflector plate โดยมีกลไกมอเตอร์ขนาดเล็กควบคุมการปิดเปิดและการตรวจวัดด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์อัตโนมัติ

3. แผงวงจรดิจิตอลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประมวลผลด้วยบอร์ดสมองกลได้ผลค่าความเค็มมีการแสดงผลตัวเลขและส่งผลข้อมูลความเค็มเข้าอุปกรณ์เครือข่ายไวไฟ ซึ่งข้อมูลถูกเก็บในฐานข้อมูลกลาง

4. กลไกการทำความสะอาดโดยการกดปุ่มล้าง ซึ่งท่อสายยางมีวาล์วไฟฟ้าปล่อยน้ำกลั่นจากถังเข้าสู่พื้นที่รีแฟรกโตมิเตอร์ ระบบ Electronic ตรวจสอบระดับความเค็มเข้าสู่ 0 พร้อมเสียงแจ้งเตือน หากยังล้างไม่สะอาด จะมีการวนทำซ้ำ

5. การทำงานของระบบจะเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง โดยตัวโซลินอยด์วาล์วทำการปล่อยของเหลวเข้ามาและตรวจวัดค่าระดับความเค็มจนถึงขั้นตอนที่ 4 การตรวจวัดทั้งระบบเมื่อกดปุ่ม start จะทำจำนวน 3 ข้อมูล

6. ทั้งนี้แผงควบคุมภายเครื่องจะจัดลำดับการทำงานใช้เวลารวมประมาณ 15 นาที

7. สิ่งที่จำเป็นต้องคอยตรวจสอบคือปริมาณถังน้ำกลั่นที่อยู่ภายนอกเครื่องและความสะอาดของภาชนะรับของเหลวทดสอบ

4. ผลการทดลอง

การเก็บข้อมูลค่าความเค็มของดินแบบระบบอัตโนมัติผ่านระบบ IoT ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม-31 มีนาคม 2567 โดยเก็บทุกวัน วันละ 3 ครั้งให้เกิดความเที่ยงตรง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยแต่ละหลุมโดยได้ออกแบบการเก็บตัวอย่างของดิน โดยการขุดหลุมลึก 3 เมตร โดยเก็บตัวอย่างดินในความลึกทุก 0.50 เมตร และเก็บตัวอย่าง 6 หลุม ห่างกันหลุมห่างกันหลุมละ 5 เมตร โดยนำตัวอย่างดินมาวัดในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง แสดงค่าความเค็มของ หลุมที่1, 2, 3, 4, 5, 6 ทุกความลึก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 เมตร

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความเค็มของ หลุม1, 2, 3, 4, 5, 6 ทุกความลึก 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 เมตร ตั้งแต่วันที่ 22 มีนาคม-31 มีนาคม 2567

ความลึก (m)	ค่าความเค็ม(ppm)					
	หลุม 1	หลุม 2	หลุม 3	หลุม 4	หลุม 5	หลุม 6
0.5	67.5	286	499	415	553	400
1.0	229	214	763	548	513	576
1.5	936	756	1880	1920	458	1090
2.0	891	1220	2280	1870	2030	1750
2.5	1900	2090	1660	1460	1630	1310
3.0	1910	2092	2100	1462	1634	1311

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความเค็มของแต่ละหลุมในแต่ละช่วงความลึกทุกๆ 0.50 เมตร ระยะความลึก 3 เมตร มีความเค็มที่แตกต่างกันในหลุมที่ 1 และหลุมที่ 2 แสดงค่าความลึกจากค่าน้อยไปหาค่ามาก ส่วนในหลุม 3, 4, 5 และ 6 ค่าความเค็ม ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน จึงนำเสนอกราฟแสดงความเค็มในหลุมที่ 1 และหลุมที่ 2 เพื่อแสดงการกระจายตัวของความเค็มในทิศทางตามแนวความลึกเป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

จากการทดลองวัดค่าความนำไฟฟ้าของดิน 6 หลุม โดยใช้เซ็นเซอร์ในระบบ IoT เปรียบเทียบกับเครื่อง EC Meter พบว่า

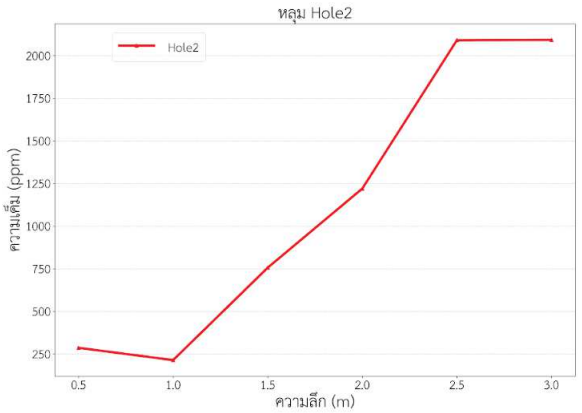
- ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ ±3%
- ความเที่ยงตรงมีค่า CV = 2.4% ซึ่งถือว่าอยู่ในปกติ

ความสัมพันธ์ระหว่าง ppm กับ EC

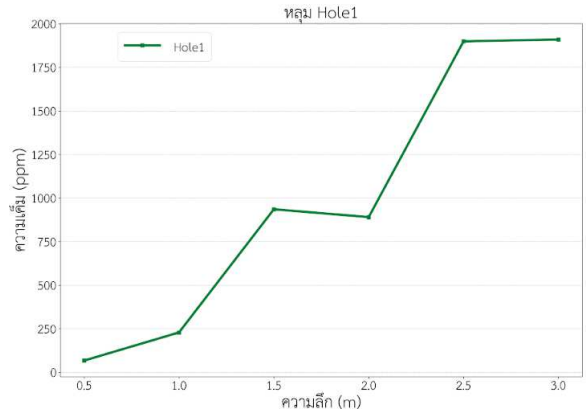
- ค่าความเค็มที่วัดจาก EC สามารถแปลงเป็น ppm ได้ โดยประมาณตามสูตร:
- ppm ≈ EC (dS/m) × 640 ถึง 700

ตารางที่ 2 เกณฑ์ค่าความเค็มของน้ำ (TDS/ppm)

ค่า TDS (ppm)	ความหมาย	การใช้งาน
0 – 500	น้ำจืด	เหมาะกับการบริโภค
500 – 1,000	น้ำใช้ทั่วไป	เกษตร
1,000 – 2,000	น้ำกร่อย	อาจกระทบพืชบางชนิด



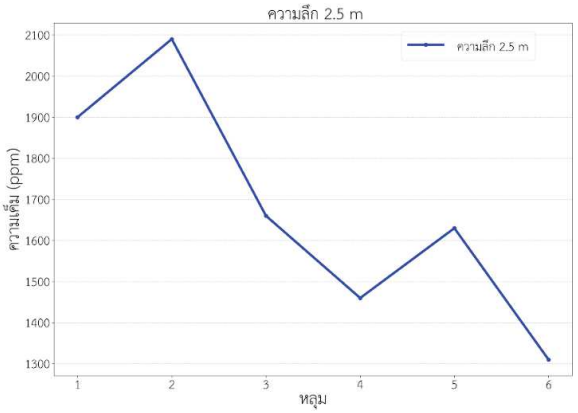
รูปที่ 5 ค่าความเค็มหลุมที่ 1 ความลึก 0.50 - 3.00 เมตร



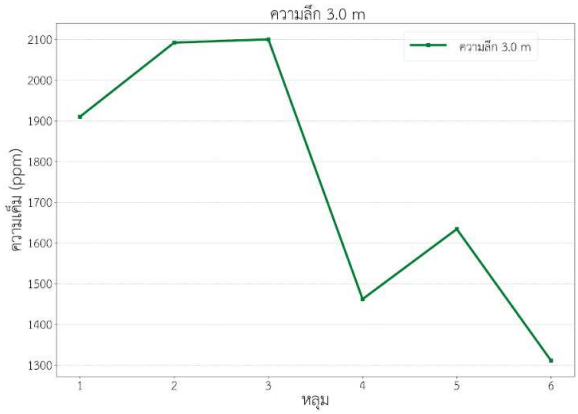
รูปที่ 6 ค่าความเค็มหลุมที่ 2 ความลึก 0.50 - 3.00 เมตร

จากรูปที่ 7 และ 8 ค่าความเค็มจะเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปมาก เมื่อความลึกทุกระดับที่มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0.5 -3.0 เมตร กราฟจะแสดงค่าความเค็มจะเพิ่มขึ้นตามความลึกที่เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 1 แสดงค่าความเค็มในแต่ละหลุมที่มีระยะห่าง 5 เมตร แสดงค่าความเค็มจากค่ามากไปหาค่าน้อย ในระดับความลึกที่ 2.5 เมตรและ 3 เมตร เป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงนำเสนอกราฟแสดงความเค็มในระดับความลึกที่ 2.5 เมตร ในรูปที่ 9 และระดับความลึกที่ 3 เมตร ในรูปที่ 10 เพื่อแสดงการกระจายตัวของความเค็มในทิศทางตามแนวความยาวเป็นข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 7 ค่าความเค็มที่ระดับความลึก 2.5 เมตร ระยะ 5 – 30 เมตร หลุมที่ 1- 6



รูปที่ 8 ค่าความเค็มที่ระดับความลึก 3 เมตร ระยะ 5 - 30 เมตร หลุมที่ 1- 6

จากรูปที่ 9 และ 10 ค่าความเค็มจะเปลี่ยนแปลงจากมากไปน้อย เมื่อระยะห่างของแต่ละหลุมมีค่าเพิ่มขึ้น จากระยะ 5 – 30 เมตร กราฟจะแสดงค่าความเค็มลดลงตามระยะห่างที่มากขึ้นตามแนวราบ

3. สรุป

การเก็บข้อมูลค่าความเค็มของดินแบบระบบอัตโนมัติผ่านระบบ IoT ค่าความเค็มของตัวอย่างของดินจากการเก็บข้อมูล แสดงให้เห็นว่าที่ หลุม ที่ 1 และ หลุมที่ 2 แสดงการกระจายตัวของความเค็มเพิ่มขึ้นในทิศทางตามแนวความลึก และ ระดับความลึกที่ 2.5 เมตร และ 3 เมตร ในระยะทาง 30 เมตรแสดงการกระจายตัวของความเค็มในทิศทางผกผันตามระยะทางตามแนวราบ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นตัวแทนการกระจายตัวของความเค็มในดินบริเวณนากุ้ง ของพื้นที่ ต.บางกะไชย อ.ท่าใหม่ จ.จันทบุรี เพื่อนำไปวิเคราะห์และทำนายค่าความเค็ม

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ งบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ให้การสนับสนุนทุนในการดำเนินโครงงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นแรงสนับสนุนที่สำคัญในการพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมทางเทคโนโลยี

เอกสารอ้างอิง

[1] ศิริลักษณ์ โกศลเสริม, และ คมสันต์ วิจิตรธรรม. (2564). *ระบบตรวจวัดค่าความเค็มในดินอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT)*. วารสารวิชาการเทคโนโลยีสารสนเทศ, 17(2), 45-53.

[2] สมชาย อินทร์สุข. (2562). *การพัฒนาเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าความเค็มในดินเพื่อใช้ในการเกษตร*.รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] Kaur, R., & Mahajan, R. (2020). *Smart Soil Salinity Monitoring System using IoT*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 9(6), 900–905.

[4] Li, H., Chen, J., & Zhang, Y. (2019). *Design of IoT-based soil salinity monitoring system for precision agriculture*. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Smart Agriculture.

[5] Sutar, R. S., & Patil, P. D. (2021). *IoT-based Smart Soil Monitoring System for Agricultural Applications*. In 2021 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), pp. 0123–0128

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

แนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร

Guidelines for the incorporation of digital industry frameworks and business/service operations via Internet of Things technology within the context of agricultural horticulture.

พงศ์พัทธ์ มังคละคีรี[1*] ธนภัทร มาลีลัย[1] และ พัชรณัฏฐ์ แสงอ่อน[1]
[1*]สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
E-mail: sayam@npu.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การศึกษาแนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร ครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบูรณาการนวัตกรรมการเกษตรอัจฉริยะด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสำหรับสวนผักการเกษตร โดยใช้แนวความคิดของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) โดยมีชุดเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิความชื้นอากาศ และค่าความชื้นของดิน ไว้ 3 ค่า คือ ค่าอุณหภูมิกับค่าความชื้นในอากาศ และ ความชื้นในดิน เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการควบคุมการทำงาน

ผลการศึกษา พบว่าจากการศึกษาแนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัล ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) (Node MCU) กับ Arduino board ที่ได้ออกแบบบอร์ดอินเตอร์เน็ตอ๊อฟติ่ง และระบบเซนเซอร์ในการตรวจวัดร่วมกับการพัฒนา Application เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IOT ให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์มือถือผ่าน Application ต่าง ๆ โดยสามารถรองรับการใช้งานระบบปฏิบัติการ Android ในการแสดงข้อมูล ดังนี้ 1) Temperature อุณหภูมิในอากาศ 2) Humidity ความชื้นในอากาศ 3) Moisture ความชื้นในดิน

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ดิจิทัล, การเกษตรอัจฉริยะ

Abstract

This research endeavor focuses on the amalgamation of the digital industry and business/service sectors through the application of Internet of Things (IoT) technology within agricultural gardens, with the objective of harmonizing advanced agricultural innovations alongside IoT to enhance production efficiency for such gardens by employing the principles of IoT technology. A comprehensive array of sensors has been deployed to quantify temperature, humidity, and soil moisture across three distinct parameters: temperature, humidity, and soil moisture, which will serve as critical reference data for the regulation of operational processes.

The findings of the research indicated that the examination of the methodology for amalgamating the digital industry with Internet of Things (IoT) technology, specifically utilizing the Node MCU in conjunction with the Arduino board, facilitated the design of an Internet-enabled board and sensor system for measurement. This system was further developed alongside applications intended to establish connectivity with IoT devices, thereby enabling interaction with mobile devices through various applications that are compatible with the Android operating system to present data in the following manner: 1)Temperature, indicating the ambient air temperature, 2) Humidity,reflecting the moisture content in the air, 3) Moisture, denoting the humidity levels in the soil.

Keywords: Internet of Things, Digital, Smart Agriculture

1. บทนำ

ในยุคดิจิทัลที่เทคโนโลยีสารสนเทศและอินเทอร์เน็ตมีบทบาทสำคัญในทุกภาคส่วนของสังคม การเกษตรก็เป็นอีกหนึ่งภาคส่วนที่ได้รับอิทธิพลจากเทคโนโลยีสมัยใหม่ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ซึ่งมีศักยภาพในการยกระดับประสิทธิภาพของการทำเกษตรกรรมแบบดั้งเดิมให้มีความแม่นยำ และทันสมัยมากขึ้น ปัจจุบันเกษตรกรประสบปัญหาต่าง ๆ เช่น การบริหารจัดการน้ำอย่างมี

ประสิทธิภาพ การควบคุมสภาพแวดล้อมของพืช และการเฝ้าติดตามการเติบโตของพืชแบบเรียลไทม์ ซึ่งส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของผลผลิต ด้วยเทคโนโลยี IoT ช่วยตรวจสอบ และควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ เช่น ความชื้นในดิน อุณหภูมิ แสงแดด ผ่านเซนเซอร์อัจฉริยะที่เชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ นอกจากนี้ IoT ยังช่วยให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนหรือคอมพิวเตอร์ สามารถตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น งานวิจัยในด้านนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาระบบเกษตรกรรมอัจฉริยะ (Smart Farming) ที่สามารถลดต้นทุนการผลิต เพิ่มผลผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3,4]

นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในการเกษตรยังช่วยส่งเสริมการทำเกษตรกรรมที่ยั่งยืน โดยช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง เช่น การรดน้ำ และปุ๋ยเคมี อย่างมีประสิทธิภาพผ่านระบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถกำหนดปริมาณการให้น้ำตามความต้องการที่แท้จริงของพืชแต่ละชนิด การใช้เทคโนโลยีดังกล่าวยังช่วยลดความเสี่ยงจากภัยธรรมชาติ งานวิจัยในหัวข้อนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ IoT มาใช้ในสวนผักเกษตรในโรงเรือนปิด เพื่อบูรณาการแนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในการจัดการแปลงเพาะปลูกให้มีประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงการออกแบบระบบที่เหมาะสมกับบริบทของเกษตรกรในแต่ละพื้นที่ โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านต้นทุน ความสามารถในการเข้าถึงเทคโนโลยี และความง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งจะเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมการเกษตรในยุคดิจิทัลให้เติบโตอย่างยั่งยืน [1,2] ที่มุ่งสู่การเป็นเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farm หรือ Intelligent Farm) มีแนวทางในการทำฟาร์มที่มีความแม่นยำสูง (Precision Farming) มีการทำเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้คุ้มค่าที่สุด ด้วยเทคโนโลยี IOT ผ่านเซนเซอร์ที่เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ด้วย Application เพื่อให้กระบวนการเพาะปลูกสะดวกสบาย และได้ผลผลิตพืชสวนสูงสุดอีกทั้งงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตรอีกด้วย

2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อ**ศึกษา**แนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร

3. วิธีดำเนินการวิจัย

แนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร

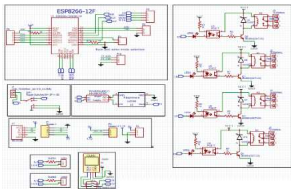
แนวทางการบูรณาการอุตสาหกรรมดิจิทัลด้วยและธุรกิจการค้า/บริการ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร คณะผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้กระบวนการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาดำเนินการพัฒนาระบบดังล่าว ซึ่งประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังนี้

3.1 Internet of Things หรือ IOT คือ การสื่อสาร และเชื่อมต่อผ่านโพรโทคอลแบบใช้สายและไร้สาย โดยมีวิธีการระบุตัวตนที่มีปฏิสัมพันธ์โต้ตอบทำงานร่วมกันได้ เป็นการนำไปสู่นวัตกรรมและบริการใหม่แบบดิจิทัลด้วยเทคโนโลยี ที่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ และการควบคุมการทำงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ในการประยุกต์ใช้ด้านการเกษตรได้อย่างสะดวกสบาย ดังรูปที่ 1

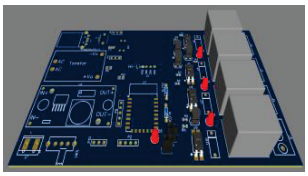


รูปที่ 1 แนวคิดการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับสวนผักการเกษตร มาประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตร

3.2 การออกแบบบอร์ดเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IOT) สำหรับสวนผักการเกษตร วงจรการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IOT (Node MCU) กับ Arduino board และระบบเซนเซอร์ควบคุมการทำงานของระบบ



รูปที่ 2 วงจรการเชื่อมต่ออุปกรณ์ IOT (Node MCU) กับ Arduino board และระบบเซนเซอร์



รูปที่ 3 PCB BOARD ชุด IOT (Node MCU) กับ Arduino board และระบบเซนเซอร์

3.2.1 บอร์ดเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง(IOT) จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่อไปนี้ NodeMCU เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นบอร์ดอินพุตเอาต์พุตมาพร้อมกับโมดูล WiFi

(ESP8266) นั้นมีลักษณะคล้ายกับ Arduino ที่มีพอร์ต Input /Output built in มาในตัว ใช้ภาษา C/C++ ในการเขียนโปรแกรม



รูปที่ 4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino NodeMCU

3.2.2 ระบบเซนเซอร์ อุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้วัดค่าต่างๆในสภาพสิ่งแวดล้อมโรงเรือน หรือแปลงสวนเกษตรกรปลูกผัก โดยในการวิจัยนี้จะทำการวัดค่าที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรในโรงเรือนออกมาทั้งหมด 4 ค่า ดังนี้ 1. ค่า Temperatureในอากาศ 2. ค่า Humidityในอากาศ 3. ค่า Moisture ในดิน จากนั้นทำการส่งค่าที่วัดได้ทั้งหมด ไปยังอุปกรณ์ บอร์ด IOT BMS ที่ประกอบด้วย Node MCU เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Firebase เซิร์ฟเวอร์ผ่านเครือข่ายอินเตอร์เน็ต ที่สามารถเชื่อมสัญญาณผ่านทางมือถือก็ได้ โดยจะแบ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าต่างๆ ออกเป็น 3 ชุด และนำไปติดตั้งให้ครอบคลุมทั่วโรงเรือน หรือแปลงสวนเกษตรกรปลูกผักที่ได้ออกแบบไว้ ในส่วน Node MCU นอกจากทำการเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลกับเซิร์ฟเวอร์แล้ว ยังทำหน้าที่ในการสั่งการให้กับ Relay Module ที่เป็นอุปกรณ์ในการเปิดและปิดน้ำอัตโนมัติด้วย



รูปที่ 5 DHT22 วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน



รูปที่ 6 Soil Moisture Sensor วัดอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในดิน

3.2.3 ส่วนเซิร์ฟเวอร์ (Cloud) Firebase เป็นแพลตฟอร์มการพัฒนา Application สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ IOT ให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์สมาร์ทโฟนด้วย Application MIT ที่ออกแบบไว้ โดยสามารถรองรับการใช้งานกับระบบปฏิบัติการ Android ที่สื่อสารในการรับ-ส่งข้อมูลได้ และผู้ใช้สามารถควบคุมอุปกรณ์ Output ต่างๆได้ เช่น ควบคุมการให้น้ำพืชสวน ควบคุมอุณหภูมิภานในโรงเรือนโดยการพ่นละอองน้ำ ผ่าน Application ไปควบคุมรีเลย์ ในขณะเดียวกันก็สามารถอ่านค่า Input ต่างๆได้ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นทั้งภายในอาคาร หรือความชื้นของดินจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น และนำไปติดตั้งใช้งานตามจุดที่ต้องการ และแสดงผลผ่าน Application Mit ที่ออกแบบไว้ใช้งานย โดยอาศัยการการเชื่อมต่อผ่านเครืออินเตอร์เน็ตเป็นสื่อกลาง โดยจะทำหน้าที่

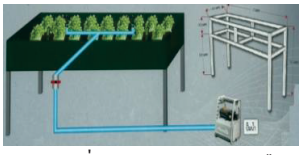
- เก็บสถิติข้อมูลเด้วยซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ออกมาเพื่อแสดงผลในรูปตัวเลข และใช้ฐานข้อมูล MySQL ในการจัดเก็บข้อมูล
- กำหนดค่ามาตราฐานความชื้นในดินที่พืชต้องการ เพื่อสั่งปิด-เปิด น้ำอัตโนมัติ โดยการเขียนโค๊ดฝังตัวในอุปกรณ์ IOT
- กำหนดค่ามาตราฐานเซนเซอร์ต่างๆ เมื่อถึงจุดที่กำหนดให้มีการแจ้งเตือนทางไลน์ โดยการเขียนโค๊ดฝังตัวในอุปกรณ์ IOT
- รองรับการสั่งการปิด-เปิดน้ำเอง (อัตโนมัติ) จากภายในแอปพลิเคชั่นได้



รูปที่ 7 Application แสดงผลค่าอุณภูมิในแปลงเกษตรสวนผักและการควบคุมระบบน้ำ

ผู้วิจัยได้ออกแบบ Application Mit ในการเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ Firebase ผ่านทางโปรโตคอล HTTP และส่งข้อความเตือนทางไลน์ผ่านทางโปรโตคอล (HTTPS) เพื่อให้ข้อมูลมีการอัพเดทต่อเนื่องตลอดเวลา) แบบเรียลไทม์

3.2.4 การออกแบบสวนแปลงและติดตั้งชุด IOT ผู้วิจัยให้แปลงจำลองมีขนาด ก*ย*ส =1.1 เมตร x 2 เมตร x 0.6 เมตร



รูปที่ 8 รูปแบบแปลงสาธิตที่ออกแบบในการปลูกพืชสวนและการติดตั้งระบบให้น้ำ และวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 9 การทดสอบใช้งานจริงในการการปลูกพืชสวนและการติดตั้งระบบให้น้ำ และวัดอุณหภูมิ และให้น้ำ

ในการวิจัยผู้วิจัยได้ศึกษาและเก็บข้อมูลการเพาะปลูกและใช้ข้อมูลในการให้น้ำเป็นลิตรต่อต้นต่อวันตามช่วงอายุและฤดูกาล จากฐานข้อมูล จึงมากำหนดค่าการควบคุมอุณหภูมิ และความต้องการของพืชผักดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การกำหนดค่ามาตราฐานในการทำงานของชุด IOT

ลำดับที่	ชนิดของผัก	อุณหภูมิในอากาศ	ความชื้นในอากาศ	ความชื้นในดิน
1	พริกหวาน	18-27 ˚C	90%	50-69%
2	มะเขือเทศ	21 ˚C	90-95%	50-69%
3	แตงหอม	20-30 ˚C	50-70%	50-69%
4	ผักสลัดเรดโอ๊ค	21-26 ˚C	80-90%	50-69%

5	กรีนโอ๊ค	25-35 ˚C	60-80%	50-69%
6	ผักกาดแก้ว	10-24 ˚C	80-90%	50-69%

ตารางที่ 2 การทดสอบการทำงานหาประสิทธิ์ภาพการวัดอุณหภูมิของระบบ IOT

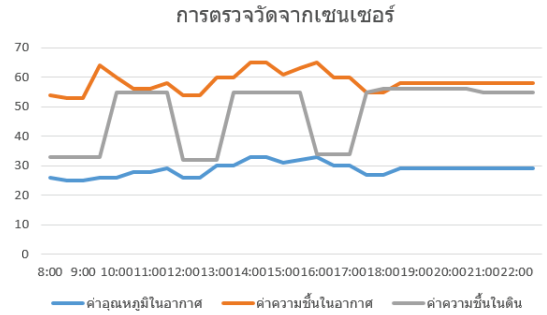
ลำดับ	อุณหภูมิ(˚C)							หมายเหตุ
	10	15	20	25	30	35	40	1=ทำงาน
1	1	1	1	1	1	1	1	0=ไม่ทำงาน
2	1	1	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	1	1	1	1	

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ในภาพรวม พบว่า เซนเซอร์ สามรถทำงานตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (0-40 ˚C) คิดเป็นร้อยละ 100

ตารางที่ 3 การทดสอบการทำงานหาประสิทธิ์ภาพการวัดความชื้นในดินของระบบ IOT ด้วย

ลำดับ	ความชื้นในดิน(%)							หมายเหตุ
	50	55	60	65	70	75	80	1=ทำงาน
1	1	1	1	1	1	1	1	0=ไม่ทำงาน
2	1	1	1	1	1	1	1	
3	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	1	1	1	1	

จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ในภาพรวม พบว่า เซนเซอร์ สามรถทำงานตามความชื้นในดิน ที่ตั้งไว้ (50-80 %) คิดเป็นร้อยละ 100



รูปที่ 10 กราฟแสดงการตรวจวัดจากเซนเซอร์ DHT กับ Moisture

จากรูปที่ 10 จะเป็นการตรวจวัดค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์ DHT กับ Moisture วัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น ที่สามารถตรวจวัดได้จากอุปกรณ์อินพุตที่ต่อเชื่อมกับเซนเซอร์

4.สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผู้วิจัยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในการออกแบบและเขียนโปรแกรมฟังก์ชั่น ในการวัดค่าความต้องการมาตรฐานของโรงเรือน หรือแปลงสวนเกษตรกรปลูกผัก เพื่อกำหนดค่ามาตราฐานการการปลูกพืชผักสวนเกษตรให้เหมาะสม โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบ แอปพลิเคชั่นโดยใช้ชื่อว่า Smart farm NPU โดยหน้าจอหลักจะแสดงถึงระบบแสดงค่าอุณหภูมิ และระบบควบคุม ปิด—เปิด การทำงานของควบคุมน้ำออกเป็น 2 ระบบ เช่น ระบบการให้แบบด้วยตนเอง (Manual) และระบบ ปิด –เปิด อัตโนมัติ (Auto) ซึ่งในส่วนแสดงผลจะแสดงค่าที่อ่านได้ที่ตัว sensor ตรวจวัดได้แบบ real time และแสดงผลกราฟแสดงถึงข้อมูลย้อนหลังที่ sensor และเก็บข้อมูลไว้ที่เซิฟร์เวอร์ MySQL โดยหน้าจอสามารถแสดงข้อมูลผลบนมือถือ หน้าจอการกำหนดค่าจะกำหนดตามความต้องการของโรงเรือน หรือแปลงสวนเกษตรกรปลูกผัก ตามฟังชั่นที่กำหนดใน 4 ค่า ดังนี้คือ 1. การกำหนดค่าอุณหภูมิ (Temperature)ที่เหมาะสม อยู่ที่ประมาณ 26-32 ˚C 2. การกำหนดค่าความชื้น (Humidity) ในอากาศจะอยู่ในช่วง -10 ถึง -60 kpa 3. การกำหนดค่าค่าความชื้น (Moisture) ของดินที่ต้องการน้ำในแปลงสวนเกษตรปลูกผัก เป็นลิตรต่อต้นต่อวันตามช่วงอายุและฤดูกาล

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่สนับสนุนพื้นที่และอุปกรณ์ในการทดลอง และขอขอบคุณ ววน.ทุนวิจัยประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2567 และคณาจารย์ เพื่อนร่วมงานทุก ๆ ท่านที่ค่อยสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

6.เอกสารอ้างอิง

[1] รัตติกานต์ วิบูลย์พานิช. (2560). การออกแบบตัวต้นแบบระบบโรงเรือนอัจฉริยะเพื่อส่งเสริม ความสะดวกสบายให้กับผู้สูงอายุ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อทุกสรรพสิ่ง มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ.

[2] Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Abu-Mahfouz, A. M. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. IEEE Internet of Things Journal, 5(5), 3758-3773.

[3] Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23-37.

[4] Patil, B., & Kale, N. (2016). A model for smart agriculture using IoT. Proceedings of the 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication, 543-545.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องตรวจสอบการเข้าห้องเรียนแบบพกพาด้วยเทคโนโลยี QR code

Portable Classroom Attendance Checker with QR Code Technology

เจษฎาพร ทองขันธ์ ภูวภัท อัครดำรงโชค และ พลอยบุศรา โกมาสังข์*
*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
E-mail: gomasang_p@su.ac.th*

บทคัดย่อ

การตรวจสอบรายชื่อนักศึกษาที่เข้าเรียนด้วยการเรียกชื่อมักประสบปัญหาด้านเวลาและอาจเกิดข้อผิดพลาด การตรวจสอบผ่านเว็บไซต์ก็จำเป็นต้องใช้สัญญาณอินเตอร์เน็ต งานวิจัยนี้นำเสนอเครื่องตรวจสอบรายชื่อนักศึกษาโดยใช้ QR Code/Barcode ของรหัสประจำตัวนักศึกษาในการระบุตัวตนและบันทึกเวลาเข้าเรียน ระบบมีฟังก์ชันไม่ซับซ้อน ใช้งานง่าย ทำงานได้อย่างแม่นยำ มีหน้าจอแสดงผลได้แบบเรียลไทม์โดยไม่ต้องพึ่งพาสัญญาณอินเทอร์เน็ต ช่วยลดข้อผิดพลาดจากการกรอกข้อมูลด้วยมือและรองรับการตรวจสอบย้อนหลัง ขนาดเครื่องกะทัดรัด สามารถพกพาไปใช้งานในสถานที่ที่แตกต่างกันได้

คำสำคัญ: QR Code, Barcode, Raspberry Pi Zero 2 W, ระบบออฟไลน์

Abstract

Checking students' attendance by calling may take a long time and be subject to human error in data recording. In addition, checking in via the website requires an internet signal. To solve these problems, this research proposes a portable class attendance device by scanning the QR code or barcode of the student' ID to identify and record the attendance time. With simple functions, it can be used easily and work accurately. Scanned data is displayed in real-time without using an internet connection. It reduces human errors from manual data entry and supports retrospective data verification. The device is also compact and portable for use in various locations.

Keywords: QR Code, Barcode, Raspberry Pi Zero 2 W, Offline System

1. บทนำ

การนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในกิจกรรมด้านการเรียนการสอนที่ต้องทำซ้ำในปริมาณมาก อาทิเช่น การตรวจสอบการเข้าชั้นเรียนของนักศึกษาเพื่อเป็นตัวชี้วัดความรับผิดชอบ จึงมีความน่าสนใจที่จะนำเทคโนโลยีมาช่วยตรวจสอบการเข้าเรียนและเพื่อลดภาระของผู้สอนอีกทางหนึ่งด้วย กรณีที่สอนหลายวิชาและต่างสถานที่กัน

การตรวจสอบการเข้าชั้นเรียนแบบเดิม เช่น การขานชื่อ จะประสบปัญหาด้านเวลา ถ้าจำนวนนักศึกษาในรายวิชานั้น ๆ มีจำนวนมากทำให้ใช้เวลานาน อีกวิธีหนึ่งคือ การยืนยันตัวตนผ่านเว็บไซต์อาจก่อให้เกิดความไม่สะดวกในกรณีที่ระบบอินเทอร์เน็ตขัดข้อง ส่งผลให้เกิดความล่าช้าและเกิดข้อผิดพลาดในการบันทึกข้อมูลได้ มีงานวิจัยที่นำเสนอระบบตรวจสอบการเข้าชั้นเรียนในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การสร้าง Quick Response (QR Code) สำหรับแสกนเพื่อยืนยันการเข้าชั้นเรียน [1] และระบบเช็คชื่อโดยการจดจำใบหน้า (Face Recognition) [2] ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของการพึ่งพาสัญญาณอินเทอร์เน็ตและข้อจำกัดด้านความแม่นยำ หากมีการเปลี่ยนแปลงรายละเอียดบนใบหน้าของนักศึกษา เช่น การสวมหน้ากากอนามัย อีกทั้งยังมีความจำเป็นต้องลงทะเบียนใบหน้าล่วงหน้า ที่มีขั้นตอนซับซ้อน และหากคุณภาพของข้อมูลภาพที่บันทึกไว้ไม่ดีอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการยืนยันตัวตน และอาจมีข้อกังวลด้านความปลอดภัยของข้อมูลส่วนบุคคลได้ เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงได้พัฒนาเครื่องตรวจสอบการเข้าเรียนแบบพกพา ที่อาศัยการแสกน QR Code หรือ รหัสแท่ง (Barcode) ของเลขประจำตัวนักศึกษาที่สามารถสร้างและเตรียมไว้ล่วงหน้าเป็นไฟล์ภาพที่บันทึกไว้บนโทรศัพท์มือถือของนักศึกษา หรือเป็น QR Code /Barcode บนบัตรนักศึกษา ซึ่งพัฒนาโดยใช้ภาษา Python ทำงานผ่าน Raspberry Pi Zero 2 W ร่วมกับโมดูลสแกน QR Code/Barcode และ Real Time Clock (RTC) สำหรับตั้งค่าเวลาให้เป็นปัจจุบัน ระบบสามารถบันทึกข้อมูลนักศึกษาได้แบบอัตโนมัติและเรียลไทม์ โดยไม่ใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตขณะทำการแสกน และแสดงผลทันทีบนหน้าจอ ขนาด 3.5 นิ้ว ให้ผู้แสกนสามารถยืนยันความถูกต้องได้ เพื่อลดระยะเวลาการตรวจสอบ ลดข้อผิดพลาดจากการกรอกข้อมูล และมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา โดยที่ผู้สอนสามารถพกพาได้หากต้องเปลี่ยนแปลงสถานที่สอน

2. เครื่องมือที่ใช้

2.1 อุปกรณ์และการเชื่อมต่อ

Raspberry Pi Zero 2 W [3] ถูกใช้เป็นหน่วยประมวลผลหลัก เชื่อมต่อผ่าน I^2C กับโมดูล RTC รุ่น DS3231 ทำหน้าที่บันทึกเวลาแบบเรียลไทม์แม้ในขณะที่ Raspberry Pi Zero 2 W ไม่ได้รับกระแสไฟฟ้า

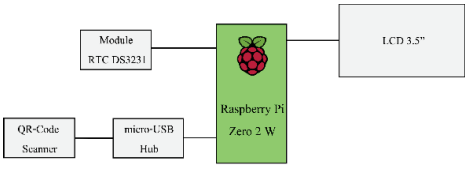
ช่วยให้ระบบสามารถรักษาความถูกต้องของเวลาได้ตลอดการใช้งาน และเชื่อมต่อกับเครื่องสแกน QR Code เพื่ออ่านข้อมูล แล้วส่งไปยังระบบประมวลผลผ่านพอร์ต USB โดยอาศัย micro-USB Hub เพื่อให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หลายชนิดพร้อมกัน นอกจากนี้ Raspberry Pi Zero 2 W ยังมีการเชื่อมต่อกับจอแสดงผล LCD ขนาด 3.5 นิ้ว โดยใช้การเชื่อมต่อผ่าน Serial Peripheral Interface (SPI) แสดงดังรูปที่ 1

2.2 การพัฒนาหน่วยประมวลผล

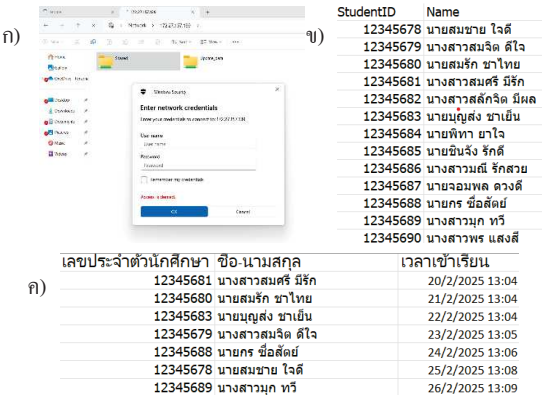
ระบบถูกพัฒนาโดยใช้ภาษา Python บนแพลตฟอร์ม Raspberry Pi โดยใช้ไฟล์ Excel (.xlsx) และ .csv สำหรับการจัดเก็บข้อมูลและบันทึกเวลา การพัฒนาโครงสร้างของการประมวลผลข้อมูล ใช้ไลบรารี pandas สำหรับการอ่านข้อมูลจากไฟล์ .xlsx โดยข้อมูลนักศึกษาถูกจัดเก็บในโครงสร้างแบบ dictionary เพื่อให้สามารถดึงข้อมูลและตรวจสอบรหัสประจำตัวนักศึกษาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งผู้สอนสามารถเพิ่ม-ลด ข้อมูลรหัสประจำตัว และ ชื่อ-นามสกุล ของนักศึกษาได้ตลอดเวลา

การนำข้อมูลเข้าสู่อุปกรณ์และการเพิ่ม-ลดข้อมูล สามารถดำเนินการโดยเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับเครือข่าย Wi-Fi เดียวกัน เมื่ออุปกรณ์เชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะแสดงหมายเลข IP Address บนหน้าจอ ผู้ใช้สามารถเข้าถึงไฟล์ที่จัดเก็บอยู่ในอุปกรณ์ ผ่าน File Explorer ของ Windows โดยป้อนหมายเลข IP ลงใน Address Bar เมื่อเชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะร้องขอ ชื่อผู้ใช้ (Username) และรหัสผ่าน (Password) ที่กำหนดไว้ใน Samba [4] ดังแสดงในรูปที่ 2 ก) เพื่อยืนยันสิทธิ์การเข้าถึงไฟล์ จากนั้นผู้สอนสามารถเพิ่มหรือแก้ไขข้อมูลนักศึกษาที่ไฟล์ student_data.xlsx ซึ่งใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดเก็บข้อมูลรายชื่อนักศึกษา โดยไฟล์นี้จะมีคอลัมน์สำหรับ รหัสประจำตัวนักศึกษา และ ชื่อ-นามสกุล เพื่อใช้ในการระบุตัวตนของนักศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2 ข)

เมื่อนักศึกษาแสกน QR Code ข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล ได้แก่ รหัสประจำตัวนักศึกษา และ ชื่อ-นามสกุล ที่ผู้สอนกำหนดไว้ในไฟล์ .xlsx ล่วงหน้า หากพบข้อมูล ระบบจะทำการบันทึก รหัสประจำตัวนักศึกษา ชื่อ-นามสกุล และเวลาที่ทำการแสกน ในไฟล์ .csv โดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 2 ค) โดยมีโครงสร้างของไฟล์แบ่งตามวันที่ เพื่อความสะดวกในการตรวจสอบย้อนหลัง ที่หน้าจอจะปรากฏข้อความ “Waiting for QR Code” เพื่อรอรับการแสกน ซึ่งหากแสกนสำเร็จ หน้าจอจะปรากฏข้อความ “บันทึกสำเร็จ” ตามด้วยรหัสประจำตัวและ ชื่อ-นามสกุล ของนักศึกษาเพื่อการยืนยัน ในกรณีที่ไม่พบข้อมูลจะปรากฏข้อความ “ไม่พบข้อมูลในฐานข้อมูล” ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์



รูปที่ 2 หน้าจอ ก) ยืนยันสิทธิ์การเข้าถึงไฟล์ ข) ไฟล์จัดเก็บข้อมูลนักศึกษา และ ค) ไฟล์จัดเก็บเวลาเข้าเรียนนักศึกษาเมื่อถูกแสกน



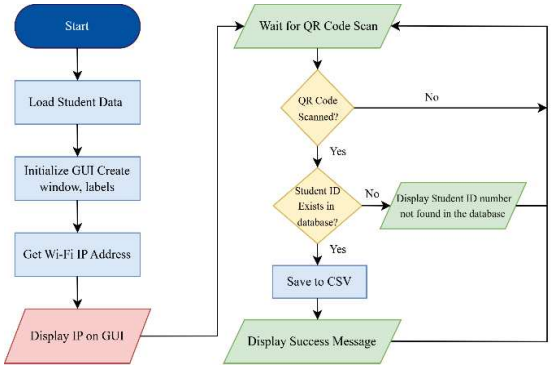
รูปที่ 3 การแจ้งเตือนบนหน้าจอ ก) รอรับการแสกน QR code ข) บันทึกข้อมูลสำเร็จ และ ค) ไม่พบข้อมูลดังกล่าวในฐานข้อมูล

ในส่วนของอินเทอร์เฟซกราฟิกนี้ ใช้ไลบรารี Tkinter สำหรับสร้าง GUI ร่วมกับ ttkbootstrap หน้าจอหลักของระบบมีการแสดงสถานะของการสแกน และแสดงหมายเลข IP ของอุปกรณ์ Raspberry Pi Zero 2 W เพื่อให้ผู้สอนสามารถเข้าถึงอุปกรณ์จากเครือข่ายภายในได้สะดวก

การนำข้อมูลออกจากอุปกรณ์เพื่อใช้งานสามารถดำเนินการได้ในลักษณะเดียวกับการนำเข้าข้อมูล โดยผู้สอนสามารถเข้าถึงไฟล์ Attendance_yers-month-date.csv ซึ่งใช้สำหรับจัดเก็บข้อมูลนักศึกษาในรูปแบบไฟล์ .csv ที่มีคอลัมน์ รหัสประจำตัวนักศึกษา ชื่อ-นามสกุล และวันที่เข้าเรียนโดยชื่อไฟล์จะระบุตามวันที่ที่ได้รับการแสกน การทำงานภาพรวมของระบบแสดงในรูปที่ 4

2.3 การออกแบบโครงสร้างและองค์ประกอบของเครื่อง

การออกแบบโครงสร้างแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก แสดงในรูปที่ 5 โดยส่วนที่ 1 เป็นตำแหน่งของโมดูลแสกน QR Code โดยมีช่องเปิดด้านหน้าที่ออกแบบให้เหมาะสมกับระยะการทำงานของเซ็นเซอร์เพื่อให้การแสกนเป็นไปอย่างรวดเร็วและแม่นยำ ส่วนที่ 2 คือ หน้าจอแสดงผล เพื่อให้ผู้แสกนสามารถตรวจสอบความถูกต้องของ รหัสประจำตัวและชื่อ-นามสกุล ของตนเองได้ และส่วนที่ 3 เป็นโครงสร้างฐานที่รองรับอุปกรณ์ ตัวหน้าจอสามารถปรับองศาความลาดเอียงได้ 3 ระดับ ได้แก่ มุม 45° 47° และ 52° โดยพิจารณาจากมุมการวางหน้าจอที่มีผลต่อผู้ใช้ที่ยืน [5] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการมองเห็น ซึ่งมุม 45° เหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไปสามารถมองเห็นหน้าจอได้โดยไม่ต้องก้มตัวมากเกินไป



รูปที่ 4 แผนผังแสดงการทำงานของระบบ

มุม 47° ออกแบบให้ช่วยลดแสงสะท้อนเพื่อให้หน้าจอคมชัดขึ้น และมุม 52° ออกแบบให้รองรับผู้ใช้งานที่มีความสูงมากกว่าปกติหรืออยู่ห่างจากอุปกรณ์ โดยช่วยให้การมองเห็นเป็นไปอย่างสะดวกและลดภาระของกล้ามเนื้อ และส่วนที่ 4 ด้านหลังของอุปกรณ์ออกแบบให้เว้นช่องสำหรับติดตั้ง USB Hub ได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงหลักการใช้งานจริง เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อและถอดสายเชื่อมต่อได้อย่างสะดวก โดยไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นของอุปกรณ์

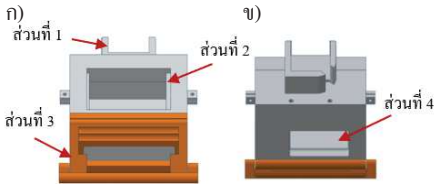
หลังจากการออกแบบโครงสร้างแล้ว ได้ทำการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) [6] โดยใช้วัสดุ Polylactic Acid (PLA) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหมาะสม ได้แก่ พิมพ์ง่าย ให้รายละเอียดคมชัด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเหมาะกับการใช้งานภายในอาคาร เนื่องจากไม่ปล่อยกลิ่นที่เป็นอันตรายในระหว่างการพิมพ์ ชิ้นงานที่พิมพ์มีพื้นผิวเรียบ เมื่อนำอุปกรณ์ทั้งหมดมาประกอบเข้าด้วยกัน แสดงให้เห็นว่าชิ้นงานมีความแข็งแรง สามารถติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อย่างพอดี โครงสร้างมีความแม่นยำตามที่ออกแบบ ไม่มีการบิดงอหรือผิดรูป และมีน้ำหนักรวม 540 กรัม แสดงในรูปที่ 6

3. การทดสอบประสิทธิภาพ

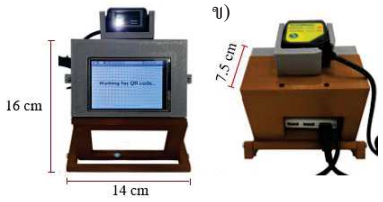
ทำการทดสอบประสิทธิภาพ โดยแสกนรหัส QR Code จำนวน 20 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่ามีอัตราความแม่นยำร้อยละ 100 และมีระยะเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลของแต่ละตัวอย่าง 0.21 วินาที ดังรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าระบบมีความถูกต้องแม่นยำและตอบสนองได้รวดเร็ว สามารถรองรับการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. การทดลองใช้และประเมินความพึงพอใจ

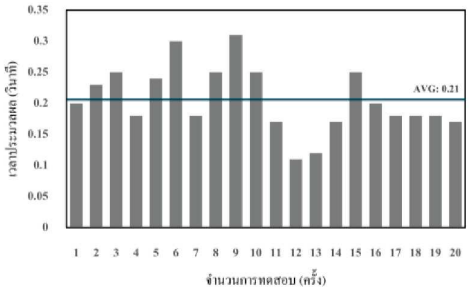
การทดลองใช้งานจริงโดยนักศึกษาจำนวน 70 คนและผู้สอนจำนวน 6 คน ตัวอย่างดังรูปที่ 8 และให้ผู้ใช้งานประเมินความพึงพอใจหลังการใช้งาน โดยแบบประเมินความพึงพอใจได้ดำเนินการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Index of Item-Objective Congruence, IOC) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พิจารณาความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับ



รูปที่ 5 โครงสร้างและการออกแบบ ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง



รูปที่ 6 เครื่องแสกน QR code/Barcode รหัสประจำตัวนักศึกษาที่ประกอบอุปกรณ์ ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านหลัง



รูปที่ 7 ผลการทดสอบระยะเวลาในการประมวลผล



รูปที่ 8 การใช้งานเครื่องแสกน QR code/Barcode รหัสประจำตัวนักศึกษา

วัตถุประสงค์ โดยมีเกณฑ์การให้คะแนน 3 ระดับ ได้แก่ มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ (1) สอดคล้องบางส่วน (0) และไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ (-1) พบว่าค่า IOC ของแบบประเมินมีค่าเฉลี่ย 1.00 ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้

การประเมินความพึงพอใจหลังการใช้งานของนักศึกษาจำนวน 70 คน มีเกณฑ์การให้คะแนนแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ มาก (3) ปานกลาง (2) และควรปรับปรุง (1) โดยแสดงระดับคะแนนเฉลี่ยที่ได้ ดังตารางที่ 1 จากผลการประเมินได้คะแนนประเมินทุกด้านเฉลี่ย 96.00% ขึ้นไป นักศึกษาส่วนใหญ่แสดงความพึงพอใจโดยเฉพาะในเรื่องของการบันทึกข้อมูลที่รวดเร็ว ไม่ซับซ้อน และมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งช่วยลด

ข้อผิดพลาดจากการกรอกข้อมูลด้วยตนเองหรือการขานชื่อโดยผู้สอนได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ผู้สอนจำนวน 6 คนได้ทดลองใช้งานโดยลงข้อมูลในฐานข้อมูลและอ่านข้อมูลของผู้เข้าเรียนจริง พร้อมทำแบบประเมินความพึงพอใจในส่วนของผู้สอน โดยแต่ละด้านมีเกณฑ์การให้คะแนน 3 ระดับ เช่นเดียวกับของนักศึกษา ได้ค่าเฉลี่ยของคะแนนจากทุกด้าน คิดเป็น 91.14% แสดงในตารางที่ 2 การประเมินในส่วนของผู้สอนแสดงว่าระบบนี้สามารถบันทึกและจัดการข้อมูลของนักศึกษาได้ง่าย รวดเร็วและถูกต้อง มีขนาดกะทัดรัด จอแสดงผลเข้าใจง่าย และระบบมีความน่าเชื่อถือ ตอบโจทย์การบันทึกและจัดการข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ความพึงพอใจการใช้งานระบบเช็คชื่อแบบอัตโนมัติผ่าน QR Code / Barcode ของนักศึกษา

หัวข้อประเมินความพึงพอใจ (ส่วนของนักศึกษา)	$\bar{x}$	%
1. อุปกรณ์ใช้งานง่ายและไม่ซับซ้อน	2.91	97.00
2. อุปกรณ์สามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำให้เสียเวลา	2.91	97.00
3. หน้าจอแสดงผลและระบบเมนูสามารถเข้าใจได้ง่าย	2.90	96.67
4. ขนาดและรูปแบบของตัวอักษรอ่านง่าย	2.83	96.63
5. วิธีการนี้ช่วยให้ท่านมีความมั่นใจว่าข้อมูลถูกบันทึกมีความน่าเชื่อถือและถูกต้อง	2.90	96.67
ค่าเฉลี่ย	2.88	96.00

ตารางที่ 2 ความพึงพอใจการใช้งานระบบเช็คชื่อแบบอัตโนมัติผ่าน QR Code / Barcode ของอาจารย์ผู้สอน

หัวข้อประเมินความพึงพอใจ (ส่วนของผู้สอน)	$\bar{x}$	%
1. นำข้อมูลนักศึกษาบันทึกเข้าฐานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน	2.83	94.33
2. การดึงข้อมูลที่แสกนทำได้ง่าย	2.83	94.33
3. ข้อมูลที่บันทึกมีความถูกต้องและไม่มีข้อผิดพลาด	2.67	89.00
4. อุปกรณ์สามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำให้เสียเวลา	3.00	100.00
5. อุปกรณ์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา	2.50	83.33
6. วิธีการนี้ช่วยให้ท่านมีความมั่นใจว่าข้อมูลถูกบันทึกมีความน่าเชื่อถือและถูกต้อง	2.67	89.00
ค่าเฉลี่ย	2.79	91.14

4. สรุป

เครื่องตรวจสอบการเข้าเรียนแบบพกพาใช้เทคโนโลยีการแสกน QR code/Barcode ของรหัสประจำตัวนักศึกษาโดยไม่ใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกสำหรับผู้สอนและนักศึกษาในการตรวจสอบและยืนยันการเข้าชั้นเรียน เพื่อลดข้อผิดพลาดและความล่าช้าในกรณีที่จำนวนนักศึกษามาก ระบบนี้ถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ที่ผู้สอนสามารถพกพาได้สะดวกหากต้องย้ายสถานที่สอน ใช้งานง่ายด้วยฟังก์ชันการทำงานไม่ซับซ้อน บันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์และมีความแม่นยำสูง โดยใช้ Raspberry Pi Zero 2 W เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ผลการทดสอบประสิทธิภาพและการทดลองใช้งานจริงกับนักศึกษา 70 คน แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการใช้งานจริงด้วยความสามารถในการตรวจสอบ และบันทึกข้อมูลแบบเรียลไทม์ อีกทั้งยังสามารถสร้างความเชื่อมั่นในความถูกต้องของข้อมูลที่บันทึกได้ และยังสามารถขยายต่อไปใช้ในกิจกรรมอื่นๆ ที่ต้องตรวจนับเป็นจำนวนมากได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.อรทัย วัชรกฤชกรณ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในการเอื้อเฟื้อเครื่องมือ 3D printing Prusa I3 MK3 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่สนับสนุนการสร้างสรรค์นวัตกรรมชิ้นนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] K. J. Liew and T. H. Tan, “QR Code-Based Student Attendance System,” in Proc. 2021 2nd Asia Conf. on Computers and Communications (ACCC), 2021, pp. 10–14, doi: 10.1109/ACCC54619.2021.00009.

[2] S. Mansoora, G. Sadineni, and S. H. Kauser, “Attendance management system using face recognition method” J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2089, no. 1, p. 012078, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2089/1/012078.

[3] Raspberry Pi Ltd., *Raspberry Pi Zero 2 W Product Brief*, Oct. 2021.

[4] G. Carter and J. Ts, Using Samba, 3rd ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2007.

[5] M. Son and D. Beck, “Ergonomic recommendations for range of control panel angle of touchscreen kitchen appliances” Appl. Sci., vol. 12, no. 15, p. 7913, 2022, doi: 10.3390/app12157913.

[6] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications,” *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019.



เจษฎาพร ทองขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภูวภัท อัครดำรงโชค สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร



พลอยบุศรา โกมาสังข์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก จาก Shibaura Institute of Technology (ญี่ปุ่น) อาจารย์และนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ฯ มหาวิทยาลัยศิลปากร มีความสนใจทางด้าน Functional Control Systems

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การออกแบบและพัฒนาระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้าและการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อการลงทุนของระบบพลังงานทดแทน

Design and Development of an Electric Golf Cart Charging System and Economic Feasibility Analysis for Investment in Alternative Energy Systems

นริศ กำแพงแก้ว[1] จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน[1] ธีระศักดิ์ สมศักดิ์[1] วรจักร์ เมืองใจ[1] นพพร พัชรประกิติ[1] มนตรี เงาเดช[1]
ณัฐวัตน์ พัลวัล[1] กัญจน์ นาคเอี่ยม[1] และ กิตตินัน สระสวย[1*]
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
128 ถนนห้วยแก้ว ตาบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300 E-mail: kittinun.s@rmutl.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้า โดยประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 เป็นหน่วยควบคุมหลักในการสร้างและจัดการสัญญาณ PWM ความถี่ 1 kHz แรงดัน ±12V เพื่อสื่อสารกับระบบควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าและวิเคราะห์สัญญาณระบบควบคุม EVSE ใช้ Arduino MEGA ในการสั่งการรีเลย์เพื่อเปิดวงจรและจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับรถกอล์ฟไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบจ่ายพลังงานใน 4 รูปแบบ ได้แก่ ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (PV), แบตเตอรี่, สายส่งไฟฟ้า (Grid) และการผสมผสานของทั้งสาม โดยใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR), อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) และระยะเวลาคืนทุน (PBP) ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ให้ผลตอบแทนสูงสุด โดยมี NPV เท่ากับ 63,738.64 บาท IRR เท่ากับ 14.86% BCR เท่ากับ 2.07 และ PBP เท่ากับ 6.35 ปี ขณะที่ระบบสายส่งไฟฟ้าและแบตเตอรี่ให้ค่า NPV และ BCR ติดลบ บ่งชี้ถึงความไม่เหมาะสมทางเศรษฐกิจ

คำสำคัญ: ระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้า, ATmega2560, พลังงานแสงอาทิตย์, การวิเคราะห์ความคุ้มทุน

Abstract

This research presents the design and development of an electric golf cart charging system. An ATmega2560 microcontroller is utilized as the primary control unit to generate and manage ±12V Pulse Width Modulation (PWM) signals at a frequency of 1 kHz. These signals facilitate communication with the electric vehicle's control system and enable the analysis of Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) control signals. An Arduino MEGA is employed to control relays for switching the circuit and supplying AC power to the electric golf cart. Furthermore, the economic viability of four power supply configurations – Solar Photovoltaic (PV), battery storage, grid power, and a hybrid combination – was assessed using financial metrics including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit-Cost Ratio (BCR), and Payback Period (PBP). The analysis indicates that the PV and battery combination yields the highest return, with an NPV of THB 63,738.64, an IRR of 14.86%, a BCR of 2.07, and a PBP of 6.35 years. Conversely, the grid power and battery configuration resulted in negative NPV and BCR values, indicating its economic infeasibility.

Keywords: Electric golf cart charger, ATmega2560, solar energy, investment analysis

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ยานยนต์ไฟฟ้ากลายเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในหลายภาคส่วน โดยเฉพาะในพื้นที่เฉพาะทาง เช่น สนามกอล์ฟ มหาวิทยาลัย และแหล่งท่องเที่ยว เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการดำเนินงานและช่วยลดการปล่อยมลพิษทางอากาศ [1][2] อย่างไรก็ตาม ระบบการชาร์จที่ใช้กันทั่วไปยังคงพึ่งพาเต้ารับไฟฟ้ากระแสสลับแบบเดิม ซึ่งขาดความชาญฉลาดด้านการควบคุม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียพลังงาน ประสิทธิภาพต่ำ และความเสี่ยงด้านความปลอดภัย [3][4] การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมระบบจ่ายพลังงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการ โดยเฉพาะการสร้างสัญญาณควบคุมแบบ PWM เพื่อสื่อสารระหว่างระบบชาร์จและยานพาหนะอย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมลำดับการชาร์จ ตรวจสอบสถานะ และป้องกันข้อผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5][6][7] นอกจากด้านเทคนิคแล้ว การตัดสินใจลงทุนในระบบพลังงานสะอาดจำเป็นต้องพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ควบคู่กัน โดยใช้ตัวชี้วัด

เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR), อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) และระยะเวลาคืนทุน (PBP) เพื่อประเมินความเหมาะสมในการลงทุน [8][9] การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบแบตเตอรี่มีแนวโน้มที่จะช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าในระยะยาวและลดการปล่อยคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ [10]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาอุปกรณ์ชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้อย่างชาญฉลาด ควบคู่กับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานทางเลือก เพื่อสร้างแนวทางที่เหมาะสมต่อการใช้งานในภาคสนามอย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนในระบบพลังงานทางเลือกจำเป็นต้องใช้เกณฑ์ทางการเงินเพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความเหมาะสมของรูปแบบการลงทุนในระยะยาว โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวชี้วัดหลัก ได้แก่

อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เป็นอัตราคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของกระแสเงินสดสุทธิในแต่ละปีเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการ (1)

$$-C_T + \sum_{t=1}^{N} \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} = 0 \tag{1}$$

สำหรับมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) จะประเมินจากผลรวมของกระแสเงินสดสุทธิที่หักลบด้วยต้นทุนเริ่มต้นของดังสมการ (2)

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} - C_t \tag{2}$$

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) ใช้เปรียบเทียบระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมและต้นทุนรวมของโครงการดังสมการ (3)

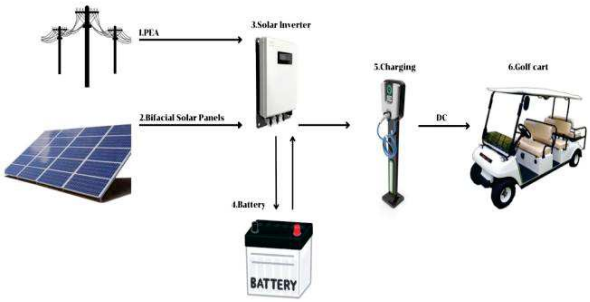
$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^{N} \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{C_t}{(1+i)^t}} \tag{3}$$

ระยะเวลาคืนทุน (PBP) ซึ่งแสดงถึงจำนวนปีที่โครงการสามารถคืนทุนเริ่มต้นได้จากส่วนต่างรายได้ประจำปีและค่าใช้จ่ายประจำปี ดังสมการ (4)

$$PBP = \frac{C_T}{B_{annual} - C_{annual}} \tag{4}$$

3. การดำเนินงาน

โครงสร้างของระบบผลิตและจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบบูรณาการสำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้า โดยพลังงานหลักมาจากแผงโซลาร์เซลล์ชนิดสองด้านขนาด 2,880 W พลังงานที่ผลิตได้ต่อปีประมาณ 3,000 kWh เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งส่งผ่านไปยังอินเวอร์เตอร์ ขนาด 3kW สำหรับใช้งานร่วมกับระบบชาร์จหรือเก็บสำรองไว้ในแบตเตอรี่ ขนาด 48V 50Ah เมื่อระบบตรวจพบความต้องการพลังงานในการชาร์จ รถกอล์ฟไฟฟ้าจะได้รับพลังงานจากเครื่องชาร์จที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงไปยังตัวรถโดยตรง หากพลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบสามารถดึงพลังงานจากสายส่งของการไฟฟ้า (PEA) มาใช้งาน แสดงดังรูปที่ 1

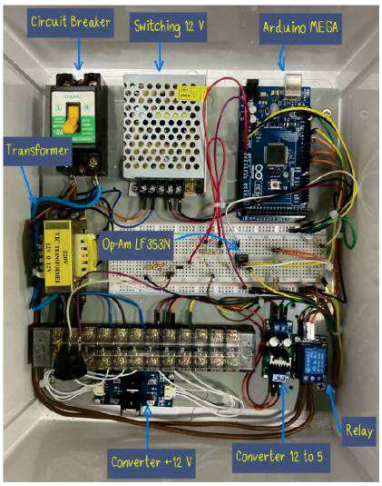


รูปที่ 1 การทำงานของระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าแบบไฮบริดสำหรับรถกอล์ฟไฟฟ้า

การออกแบบระบบจ่ายไฟสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EVSE) การพัฒนาระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ฮาร์ดแวร์ ประกอบด้วย เซ็นเซอร์ คอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ป้องกัน และระบบระบายความร้อน และซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด การออกแบบระบบจ่ายไฟสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (EVSE) การพัฒนาระบบแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ฮาร์ดแวร์ ประกอบด้วย เซ็นเซอร์ คอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ป้องกัน และระบบระบายความร้อน และซอฟต์แวร์ที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด

3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์

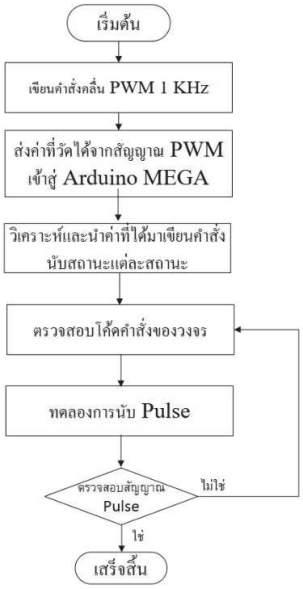
ในงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เป็นหน่วยควบคุมหลักในการประมวลผลสัญญาณ Control Pilot (CP) และควบคุมการทำงานของรีเลย์สำหรับการตัด-ต่อวงจรชาร์จ โดยรับพลังงานจากระบบไฟฟ้ากระแสสลับผ่านหม้อแปลงและ Switching Power Supply เพื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 12V และ 5V ให้กับวงจรควบคุมทั้งหมด วงจรนี้ออกแบบให้รองรับขั้วต่อแบบ Type 2 เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับรถยนต์ไฟฟ้าได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรควบคุมการชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้า

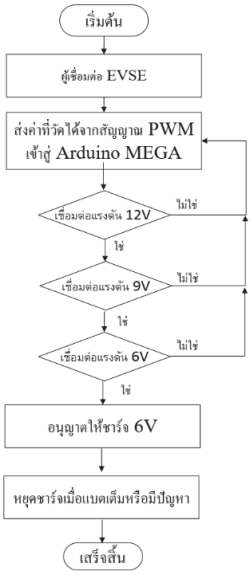
3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

กระบวนการทำงานของระบบเริ่มต้นจากการเขียนคำสั่งเพื่อสร้างสัญญาณ PWM ที่ความถี่ 1 kHz โดยสัญญาณที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่บอร์ด Arduino MEGA เพื่อประมวลผลค่าที่ได้รับ จากนั้นทำการวิเคราะห์และแปลงค่าสัญญาณ PWM เป็นคำสั่งควบคุมในรูปแบบของสถานะต่าง ๆ ที่ใช้ในการสั่งการระบบ โดยมีการออกแบบวงจรเพื่อใช้จำลองการทำงานของคำสั่งดังกล่าว พร้อมทั้งทดสอบการรับสัญญาณ Pulse เพื่อยืนยันว่าอุปกรณ์สามารถตอบสนองต่อคำสั่งที่ส่งได้อย่างถูกต้อง ในขั้นตอนสุดท้ายมีการทดสอบวงจรทั้งหมดร่วมกัน เพื่อประเมินความถูกต้องและความเสถียรของระบบโดยรวม ก่อนสิ้นสุดกระบวนการแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนกระบวนการควบคุมสถานะของชาร์จเจอร์

การทำงานของระบบ EVSE ต้องมีการสื่อสารกับรถกอล์ฟไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานตามที่แสดงในรูปที่ 5 เริ่มต้นจากผู้ใช้งานทำการเชื่อมต่อหัวชาร์จกับระบบ EVSE หลังจากนั้นจะมีการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ หากการเชื่อมต่อสำเร็จ ระบบจะตรวจพบแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และดำเนินการตรวจสอบสถานะความพร้อมของรถในการรับพลังงาน โดยจะตรวจพบแรงดันที่ 9 โวลต์ หากไม่ผ่านการตรวจสอบในขั้นตอนใด ระบบจะวนกลับไปเริ่มต้นตรวจสอบการเชื่อมต่อใหม่อีกครั้ง เมื่อตรวจสอบความพร้อมเรียบร้อย ระบบจะเข้าสู่ขั้นตอนตรวจสอบสถานะการอนุญาตให้ชาร์จ ซึ่งต้องมีแรงดันที่ 6 โวลต์ หากผ่านเงื่อนไขดังกล่าว ระบบจะเริ่มทำการจ่ายพลังงานให้กับรถกอล์ฟไฟฟ้า กระบวนการทั้งหมดจะดำเนินการต่อเนื่องจนกว่าจะสิ้นสุด หรือมีเหตุให้ระบบหยุดทำงาน เช่น การยกเลิกคำสั่งโดยผู้ใช้หรือเกิดปัญหาทางเทคนิค ซึ่งในกรณีนี้ ระบบจะหยุดการทำงานทันทีเพื่อความปลอดภัยแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทำงานของระบบ EVSE

3. ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานทางเลือกจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบสายส่ง (2) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ (3) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบสายส่งและแบตเตอรี่ และ (4) ระบบสายส่งร่วมกับแบตเตอรี่ โดยใช้ดัชนีวัดประสิทธิภาพทางการเงินที่สำคัญ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Cost: NPC), อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR), อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit-Cost Ratio: BCR) และ

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PBP) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของการลงทุนในแต่ละทางเลือก ภายใต้ระยะเวลาโครงการ 20 ปี ซึ่งจะกำหนดอัตราตอบแทนในแต่ละปีอยู่ที่ 4% เพื่อให้สอดคล้องกับดอกเบี้ยเงินกู้ในแต่ละปีคิดเป็น 4% และค่าซ่อมบำรุงคิดที่ 10% ของต้นทุน เงินลงทุนของแต่ละสถานการณ์ของการชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้าดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการลงทุนในระบบต่างๆ

สถานการณ์	เงินลงทุนเริ่มต้น (บาท)	ค่าบำรุงรักษา (บาท)
PV+Grid	45,226	452.26
PV+Battery	55,586	555.86
PV+Grid+Battery	55,586	555.86
Grid+Battery	24,086	240.86

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ พบว่า ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ (PV+Battery) มีศักยภาพด้านการลงทุนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น โดยให้ผลตอบแทนในเชิงเศรษฐศาสตร์ที่โดดเด่น ในทางตรงกันข้าม ระบบไฟฟ้าสายส่งร่วมกับแบตเตอรี่ (Grid+Battery) ให้ผลการประเมินที่ไม่คุ้มค่า โดยมีค่า NPV และค่า BCR ติดลบ 0.72 ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่เหมาะสมในการลงทุน ทั้งนี้ ยังไม่สามารถคำนวณอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (PBP) ได้จากข้อมูลที่มี ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงทางเศรษฐศาสตร์ของระบบดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

สถานการณ์การชาร์จรถกอล์ฟ	IRR (%)	NPV (บาท)	BCR	PBP (ปี)
PV+Grid	10.93	31,302.88	1.67	8.06
PV+Battery	14.86	63,738.64	2.07	6.35
Grid+Battery	N/A	-84,926.64	-0.72	N/A
PV+Grid+Battery	11.98	46,126.87	0.91	15.92

หมายเหตุ: N/A ไม่สามารถคำนวณได้

4. สรุปผล

การวิจัยนี้ได้การออกแบบและพัฒนาระบบชาร์จรถกอล์ฟไฟฟ้า 48V โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 ควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อสื่อสารกับระบบควบคุมของยานพาหนะ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการชาร์จได้อย่างแม่นยำ มีความเสถียร และเหมาะสมต่อการใช้งานจริง ในด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าระบบพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่ให้ผลตอบแทนทางการเงินดีที่สุด โดยมี NPV เท่ากับ 63,738.64 บาท IRR 14.86% BCR 2.07 และ PBP 6.35 ปี แสดงถึงความคุ้มค่าต่อการลงทุน ขณะที่ระบบ Grid ร่วมกับแบตเตอรี่มีความเสี่ยงสูงและไม่เหมาะสมในการลงทุน

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบพลังงานสะอาด และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่สนับสนุนงบประมาณและเครื่องมืออุปกรณ์ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Zhang et al., “Electric Vehicle Technologies and Future Trends,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183186–183200, 2020.

[2] S. Park and J. Lee, “Applications of Electric Golf Carts in Tourism and Urban Areas,” *Renewable Energy Review*, vol. 14, no. 3, pp. 215–222, 2019.

[3] M. A. Hannan et al., “Battery charging technologies for electric vehicles: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771–789, 2017.

[4] R. C. Green et al., “Impact of plug-in hybrid electric vehicles on the electric grid,” *IEEE PES General Meeting*, pp. 1–6, 2010.

[5] K. Lee and M. Kim, “Design of Smart EV Charger using Arduino Microcontroller,” *Journal of Power Electronics Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 35–42, 2021.

[6] M. Z. Khan et al., “Microcontroller-Based Intelligent Battery Management System for Electric Vehicles,” *Electronics*, vol. 9, no. 2, p. 210, 2020.

[7] J. Lin et al., “PWM-Based Communication System for Electric Vehicle Chargers,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 67, no. 3, pp. 1849–1857, 2020.

[8] N. Sinha et al., “Economic Evaluation of Solar-Powered EV Charging Infrastructure,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 152–161, 2021.

[9] S. Patel and V. Shah, “Financial Analysis of Renewable Energy Systems Using NPV, IRR, and BCR,” *International Journal of Green Energy*, vol. 18, no. 10, pp. 1023–1031, 2021.

[10] A. Tiwari and R. Kumar, “Optimal PV and Battery System for EV Charging Stations: A Techno-Economic Review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, 2021.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประยุกต์ใช้เซนเซอร์ในการควบคุมวีลแชร์สุนัขอัตโนมัติสำหรับสุนัขพิการทางขาหลัง

Application of Sensor-Based Control for an Automatic Wheelchair for Disabled Dogs

วิชชา อุปภัย[1] พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์[1] และ ศุภโชค ตันติวิวัทน์[1*]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: supachock.tu@rmutp.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาวีลแชร์สุนัขอัตโนมัติสำหรับสุนัขพิการทางขา โดยมุ่งหวังให้สุนัขสามารถกลับมาใช้ชีวิตได้เป็นปรกติ และสามารถกลับเข้าไปรวมฝูงได้อีกครั้งด้วยการปรับเปลี่ยนท่าทางการนั่ง ยืน หรือนอน ของวีลแชร์ได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องพึ่งพาผู้ดูแลสำหรับการถอดใส่ หรือปรับตำแหน่งขาของวีลแชร์ตลอดเวลา โดยวิธีการดำเนินงานในส่วนของโครงสร้างวีลแชร์ ได้พัฒนาจากท่อ โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) มาเป็นแผ่นอะคริลิคเพื่อความแข็งแรงและสามารถติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆได้สะดวกมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองความสามารถการตอบสนองของขาวีลแชร์ในแง่ของความเร็วและความถูกต้อง จากการเปลี่ยนอิริยาบทของสุนัขจาก ยืนเป็นนั่ง จากนั่งเป็นนอน จากนอนเป็นยืน โดยใช้เซนเซอร์ 2 ชนิดสำหรับการส่งข้อมูลไปยังบอร์ดอาดูโน่ (Arduino) เพื่อสั่งการปรับองศาของเซอร์โวมอร์เตอร์ โดยมีการทดลอง 3 รูปแบบ รูปแบบละ 35 ครั้ง ได้แก่ 1) ใช้เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration Sensor SW-420) เป็นตัวส่งข้อมูลพบว่าความเร็วการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ มีค่าเฉลี่ยที่ท่ายืนเป็น 2.05 วินาที และค่าเฉลี่ยท่านอนเป็น 1.83 วินาที และมีความผิดพลาดในการทำงาน 11 ครั้ง 2) ใช้เซนเซอร์วัดระยะทางจำนวน 1 ตัว (Ultrasonic Module HC-SR04) เป็นตัวส่งข้อมูลพบว่าความเร็วการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ มีค่าเฉลี่ยที่ท่ายืนเป็น 2 วินาที และค่าเฉลี่ยท่านอนเป็น 2.3 วินาที และมีความผิดพลาดในการทำงาน 2 ครั้ง และ 3) ใช้เซนเซอร์วัดระยะทาง (Ultrasonic Module HC-SR04)จำนวน 2 ตัว เป็นตัวส่งข้อมูลพบว่าความเร็วการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ มีค่าเฉลี่ยที่ท่ายืนเป็น 1.5 วินาที และค่าเฉลี่ยท่านอนเป็น 1.7 วินาที และมีความผิดพลาดในการทำงาน 8 ครั้ง

คำสำคัญ: วีลแชร์สุนัข, ระบบอัตโนมัติ, เซอร์โวมอเตอร์, อาดูโน่, เซ็นเซอร์

Abstract

This study presents the design and development of an autonomous wheelchair system intended for dogs with hind limb disabilities, aiming to support their rehabilitation and facilitate reintegration into social environments. The system enables dogs to independently adjust their posture—such as standing, sitting, and lying down—without requiring caregiver assistance for attaching or repositioning the wheelchair. The wheelchair structure was improved by replacing the original polyvinyl chloride (PVC) pipe framework with an acrylic sheet frame, enhancing mechanical strength and simplifying the installation of components. The system's responsiveness was assessed based on the speed and accuracy of posture transitions. Two types of sensors were employed to transmit data to an Arduino microcontroller, which controlled the angular position of a servo motor. Experiments were conducted using three sensor configurations, with 35 trials for each: 1) Vibration sensor (SW-420): The average servo actuation time was 2.05 seconds for the standing posture and 1.83 seconds for the lying posture, with 11 operational errors observed. 2) Single ultrasonic distance sensor (HC-SR04): The average actuation time was 2.00 seconds for standing and 2.30 seconds for lying, with 2 errors recorded. 3) Dual ultrasonic distance sensors (HC-SR04): The average actuation time was 1.50 seconds for standing and 1.70 seconds for lying, with 8 errors recorded.

Keywords: Dog wheelchair, Automation, Servo motor, Arduino, Sensor

1. บทนำ

บทความเป็นการพัฒนาวีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติ เริ่มจากการศึกษาปัญหาสุนัขที่ขาหลังพิการที่ไม่สามารถช่วยเหลือตัวเองได้ ส่งผลกระทบทั้งด้าน จิตใจ และ สุขภาพของสุนัข รวมไปถึงเป็นภาระของผู้ดูแล โดยในปัจจุบันวีลแชร์สำหรับสุนัขที่มีจำหน่ายทั่วไป ยังแบบที่

ไม่สามารถปรับขาได้ กล่าวคือ ขาสุนัขจะอยู่ในท่ายืนตลอดเวลา จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีกลุ่มนักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์เทเวศร์ ได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว และได้เริ่มต้นโครการ “ วีลแชร์สุนัขแบบกึ่งอัตโนมัติ ” [1], [2] แต่เนื่องจากระบบเป็นกึ่งอัตโนมัติ จึงทำให้ต้องอาศัยผู้ดูแลในการลุกหรือนั่งของสุนัขอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งไม่สามารถตอบโจทย์ด้านการช่วยเหลือตัวเองของสุนัขได้ ด้วยเหตุนี้ คณะผู้จัดทำจึงพัฒนา “วีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติ” ที่มุ่งหวังให้สามารถตอบสนองการเคลื่อนไหวของสุนัขได้อย่างอัตโนมัติ ลดภาระผู้ดูแล และ เพิ่มคุณภาพชีวิตของสัตว์พิการได้ สำหรับการออกแบบเบื้องต้นได้ใช้โปรแกรม SolidWorks ออกแบบส่วนขาหลังของสุนัขโดยอ้างอิงจากตุ๊กตาสุนัขที่ใช้เป็นต้นแบบ และทำการการขึ้นรูปขาหลังของวีลแชร์ ด้วยกรรมวิธีขึ้นรูป 3 มิติ จากเครื่อง 3D Printer และในส่วนโครงสร้างหลักของวีลแชร์ใช้เป็นแผ่นอะคลิคที่ผ่านการเจาะรูเพื่อลดน้ำหนักให้มีความเบาขึ้นโดยยังคงความแข็งแรงพอสำหรับการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์ [3] โดยในส่วนของระบบควบคุมการทำงานเริ่มต้นจากเซนเซอร์รับสัญญาณการสั่นสะเทือนหรือรับระยะความสูงของสุนัขที่เปลี่ยนแปลงไปจากอิริยาบทของสุนัข จากนั้นส่งสัญญาณไปยังบอร์ดอาดูโน่เพื่อทำการประมวลผลและส่งสัญญาณขาออกไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ส่งกำลังผ่านสายพานและพูลเล่สำหรับการขับเคลื่อนขาวีลแชร์

2. วิธีการดำเนินการ

2.1 ระบบเซนเซอร์ และบอร์ดอาดูโน่

ในการพัฒนาโครงงาน "วีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติ" ผู้จัดทำได้ศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเคลื่อนไหวของวีลแชร์ โดยเน้นอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานง่ายไม่ซับซ้อนและเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานจริงร่วมกับสุนัข เริ่มจากระบบเซนเซอร์ได้พิจารณาใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดคือ 1) เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน (Vibration Sensor SW-420) เนื่องจากผู้จัดทำได้ตั้งสมุติฐานว่าอาจเกิดการสั่นไหวในขณะที่สุนัขกำลังเคลื่อนตัว และ 2) เซนเซอร์อัลตร้าโซนิก (Ultrasonic Sensor HC-SR04) ติดตั้งเป็นแบบ 1 ตัว และแบบ 2 ตัว สำหรับการวัดระยะห่างในแนวตั้ง (ระหว่างตัวสุนัขและพื้น) เพื่อประเมินว่าขาสุนัขอยู่ในท่ายืน/ท่านั่ง/ท่านอน [4], [5] โดยในส่วนของการควบคุมการทำงานทางผู้จัดทำได้ทำการเลือกใช้ บอร์ด Arduino Nano ที่ น้ำหนักเพียง 7 กรัม และมีช่องรับสัญญาณขาเข้า (In Put) ทั้งในแบบดิจิทอล (Digital) และอะนาลอก (Analog) มีการส่งสัญญาณขาออก (Out Put) ในรูปแบบ Pulse Width Modulation (PWM) จากคุณสมบัติดังกล่าวทางผู้จัดทำเห็นว่าอุปกรณ์เหล่านี้มีขีดความสามารถเพียงพอสำหรับการควบคุมวีลแชร์สุนัขอัตโนมัติได้

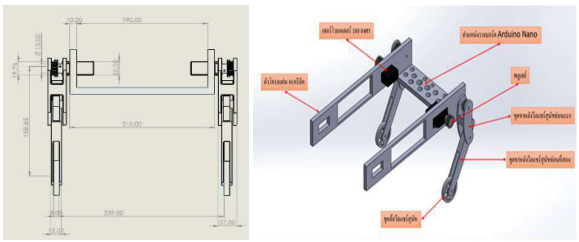


รูปที่ 1 เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือน SW-420,
เซนเซอร์อัลตร้าโซนิก HC-SR04, บอร์ด Arduino Nano

แหล่งพลังงานของวีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติจากแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมโพลิเมอร์(Li-Po) ขนาด 11.1V 3000mAh เพื่อจ่ายไฟให้กับระบบอัตโนมัติอย่างเพียงพอและมีเสถียรภาพ ต่อการชาร์จ 1 ครั้งสามารถใช้งานได้ 30 นาที รับน้ำหนักตัวของสุนัขสูงสุดที่ 15 กิโลกรัม

2.2 การออกแบบโครงสร้างวีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติและการผลิตโครงสร้างวีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติ

การออกแบบโครงสร้างเริ่มจากการวัดค่าสรีระของสุนัขและจำลองการเคลื่อนไหวของขาหลัง เพื่อกำหนดสัดส่วนและระยะของตัววีลแชร์ได้อย่างเหมาะสม โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย ขาหลังที่มีความสูงขนาด 150 มม. โดยสามารถยืดและพับได้ และออกแบบตำแหน่งที่อยู่ของเซอร์โวมอเตอร์ รวมถึงจุดหมุนเพื่อส่งผ่านการเคลื่อนที่ด้วยระบบพูลเล่กับสายพาน โดยมีล้อหลังที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. เพื่อให้สามารถเคลื่อนไหวได้คล่องตัว



รูปที่ 2 แบบจำลองวีลแชร์สุนัข

หลังจากออกแบบเสร็จจึงขึ้นรูปชิ้นงาน เริ่มจากส่วนขาทั้งสองข้างของวีลแชร์ใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากนั้นขึ้นโครงสร้างของตัววีลแชร์ส่วนลำตัวด้วยวัสดุอะคริลิค จำนวนสองชิ้นที่มีขนาด กว้าง 10 มม. ยาว 400 มม. สูง 50 มม. ขึ้นโครงสร้างของส่วนเชื่อมลำตัวด้วยวัสดุอะคริลิคขนาด กว้าง 180 มม. ยาว 500 มม. สูง 10 มม. ประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันโดยติดตั้ง แบริ่ง ลงในช่องที่ออกแบบไว้ในขาหลังทั้งสองท่อน ใส่แกนเพลา เพื่อปิ่นจุดหมุนระหว่างขาและโครงวีลแชร์ติดตั้ง

เซอร์โวมอเตอร์ และพูลเลย์ บนโครงขา พร้อมเดินสายพานไทม์มิ่งเพื่อส่งผ่านแรงไปยังขาทั้งสองข้าง

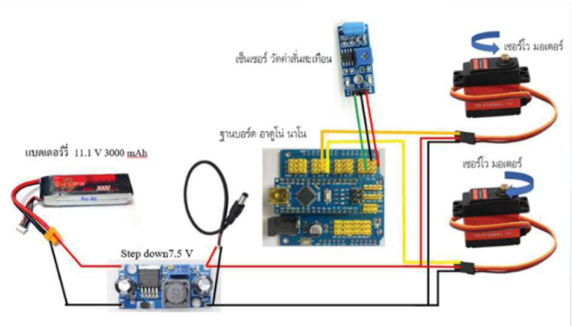


รูปที่ 3 วีลแชร์สุนัขในท่ายืนและนอน

2.3 การติดตั้งเซนเซอร์และเซอร์โวมอเตอร์ลงบนวีลแชร์

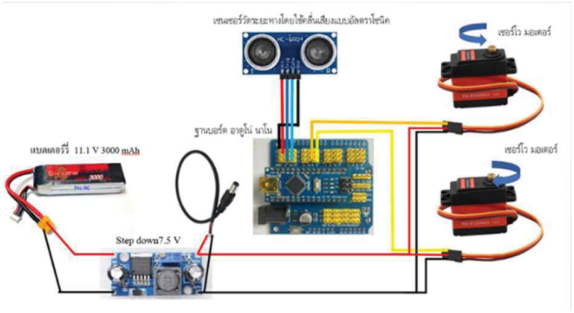
เพื่อให้วีลแชร์สามารถปรับตามท่าทางของสุนัขได้อย่างอัตโนมัติ ผู้วิจัยได้ติดตั้งระบบเซนเซอร์ร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อตรวจจับพฤติกรรมของสุนัข และสั่งการให้เซอร์โวมอเตอร์ปรับองศาการยกหรืองอขาหลังตามข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ มีขั้นตอนการติดตั้ง ดังนี้

จากรูปที่ 4 การติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน บนโครงขาหลังของวีลแชร์ โดยติดตั้งเซนเซอร์อยู่ในแนวราบกับพื้นเพื่อความแม่นยำสูงสุด สัญญาณที่ได้จากการสั่นสะเทือนจะถูกแปลงเป็นคำสั่งควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อทำให้ปรับท่านั่งและยืนของสุนัข และเก็บค่าความแรงของการสั่น เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของวีลแชร์เป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบในเวอร์ชั่นต่อไป



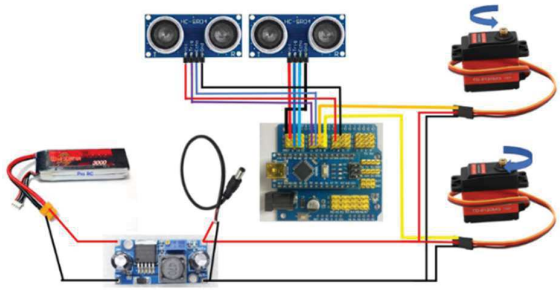
รูปที่ 4 ควบคุมขาสุนัข ด้วยเซนเซอร์สั่นสะเทือน

จากรูปที่ 5 การติดตั้งเซนเซอร์อัลตร้าโซนิกแบบ 1 ตัว บริเวณขาหน้าของสุนัขในแนวตั้งฉากกับพื้น เพื่อวัดระยะห่างจากพื้นถึงตัวเซนเซอร์เมื่อระยะห่างระหว่างตัวเซนเซอร์ถึงพื้นเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ตั้งไว้ เช่น จาก 14 ซม. ลดลงเหลือ 8 ซม. โปรแกรมประมวลผลจะสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์เปลี่ยนองศา เพื่อให้ขาหลังเคลื่อนไหวตามท่าทางที่กำหนดไว้



รูปที่ 5 ควบคุมขาสุนัข ด้วยเซนเซอร์อัลตร้าโซนิกวัดระยะความสูง 1 ตัว

จากรูปที่ 6 การติดตั้งเซนเซอร์อัลตร้าโซนิกแบบ 2 ตัว ติดที่โครงวีลแชร์บริเวณขาหน้า และขาหลัง เขียนโค้ดให้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าระยะจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งที่ขาหน้าและขาหลัง เพื่อให้สามารถแยกแยะระหว่างท่ายืน/ท่านั่ง/ท่านอนได้แม่นยำ เป็นการควบคุมองศาของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวให้เคลื่อนไหวอย่างสมดุล



รูปที่ 6 ควบคุมขาสุนัขด้วยเซนเซอร์อัลตร้าโซนิกวัดระยะความสูง 2 ตัว

3. ผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 2 3 เป็นการสรุปผลการทดลองเซนเซอร์แต่ละประเภทซ้ำประเภทละ 35 ครั้ง โดยให้ความสำคัญในแง่ของการเปรียบเทียบความเร็วในการตอบสนองของการยืดและพับขา และจำนวนครั้งของความผิดพลาด

ตารางที่ 1 เซนเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน

ค่าเฉลี่ยท่ายืน	ค่าเฉลี่ยท่านอน	ความผิดพลาด
2.05 วินาที	1.83 วินาที	11 /35 ครั้ง

ตารางที่ 2 เซนเซอร์อัลตร้าโซนิกแบบ 1 ตัว

ค่าเฉลี่ยท่ายืน	ค่าเฉลี่ยท่านอน	ความผิดพลาด
2 วินาที	2.3 วินาที	2 /35 ครั้ง

ตารางที่ 3 เซนเซอร์อัลตร้าโซนิกแบบ 2 ตัว

ค่าเฉลี่ยท่ายืน	ค่าเฉลี่ยท่านอน	ความผิดพลาด
1.5 วินาที	1.7 วินาที	8 /35 ครั้ง

4. สรุป

ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ 3 รูปแบบพบความแตกต่างที่ชัดเจนในด้านเวลาในการตอบสนอง และความผิดพลาดในการทำงาน ซึ่งส่งผลถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริงต่อไป โดย 1) เซนเซอร์วัดแรงสั่นสะเทือน (SW-420) ข้อจำกัดที่พบคือ เซนเซอร์ตรวจจับการสั่นสะเทือนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวสุนัขได้ และไม่สามารถแยกท่ายืนหรือนอนได้อย่างชัดเจน ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดการทำงานสูงสุด 2) การใช้เซนเซอร์อัลตร้าโซนิก (HC-SR04) แบบ 1 ตัว มีความเร็วในการตอบสนองของเซอร์โวมอเตอร์ในระดับปานกลางแต่มีความเสถียรของระบบมาก เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน 3) การใช้เซนเซอร์อัลตร้าโซนิก (HC-SR04) แบบ 2 ตัว มีความเร็วในการตอบสนองของเซอร์โวมอเตอร์ในระดับสูงสุดเนื่องจากตัวเซนเซอร์มีการวัดระยะจากด้านหน้าและด้านหลัง ทำให้แยกท่าทางได้ชัดเจน แต่ยังพบค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นถึง 8 ครั้ง เนื่องจากการจัดตำแหน่งของตัวเซนเซอร์และความซับซ้อนของตัวโปรแกรมที่มีมากกว่าสองแบบข้างต้น

5. ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของวีลแชร์สุนัขอัตโนมัติยังพบข้อจำกัดในกรณีที่มีวัตถุไม่พึงประสงค์มาตัดระยะเซนเซอร์ ทั้งนี้ในอนาคตทางผู้วิจัยต้องการพัฒนาต่อยอดชิ้นงานในด้านของโครงสร้างและการรับน้ำหนักให้ได้มากกว่าเดิมเหมาะสมกับสุนัขจริงในทุกท่วงท่าทั้งการวิ่ง กระโดด นั่ง นอน รวมถึงอิริยาบถอื่นๆในชีวิตประจำวัน เช่น การกลิ้งตัว อีกทั้งต้องการพัฒนาการทดสอบการใช้งานของเซนเซอร์ชนิดอื่น ๆ ให้มีความหลากหลาย รวมถึงการนำตัวควบคุมชนิดต่าง ๆ เข้ามาใช้งานร่วมในการควบคุมขาสุนัข เช่น ตัวควบคุมแบบ PID Controller หรือ FUZZY Logic ซึ่งอาจเป็นแนวคิดที่ดีกว่า ทั้งนี้ทางผู้วิจัยมุ่งหวังให้เกิดการนำไปใช้กับสุนัขจริงโดยไม่เกิดปัญหาความเครียด หรือเป็นภาระกับสุนัข เพราะสุนัขแต่ละตัวต้องใช้เวลาในการปรับตัวเข้ากับวีลแชร์ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วีลแชร์เป็นเพียงแค่ส่วนเติมเต็มชีวิตของสุนัขพิการ ดังนั้นผู้ดูแลควรใส่ใจเติมเต็มชีวิตให้สุนัขด้วยอีกทาง ไม่เช่นนั้นสุนัขก็จะเป็นแค่สัตว์พิการตัวหนึ่งเท่านั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการ วีลแชร์สุนัขแบบอัตโนมัติ นักศึกษาร่วมดำเนินโครงการ นายแวอับดุลฮากีม แวสาเหาะ นายณัฐวุฒิ พรหมเพชร และนายปุญญพัตน์ เทียนไชย อ.วิชชา อุปภัย เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] E. B. Fowler, Design, analysis, and development of cost effective canine wheelchairs, M.Eng. thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Louisville, KY, USA, 2008. [Online]. Available: https://doi.org/10.18297/etd/452

[2] A. C. Fernandes, T. Martins, and L. Oliveira, “Design and control of a robotic assistance device for mobility-impaired dogs,” Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), Toronto, ON, Canada, Jul. 2019, pp. 245–250. doi: 10.1109/ICORR.2019.8779400.

[3] D. H. Kim and J. W. Jung, “Design and control of a servo motor system using Arduino for educational purposes,” IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), Athens, Greece, Apr. 2015, pp. 657–660. doi: 10.1109/EDUCON.2015.7096029.

[4] T. S. Hossain, M. K. Hossain, and R. Islam, “Performance analysis of ultrasonic sensor for distance measurement,” International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 7, no. 12, pp. 55–60, 2018.

[5] J. Borenstein and Y. Koren, “Obstacle avoidance with ultrasonic sensors,” IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 4, no. 2, pp. 213–218, Apr. 1988. doi: 10.1109/56.2083.



อาจารย์วิชชา อุปภัย
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มทร.พระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบควบคุมอัตโนมัติ, การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อชุมชนและอุตสาหกรรม



อาจารย์ศุภโชค ตันติวิวัทน์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มทร.พระนคร
งานวิจัยที่สนใจ: การควบคุมระบบอัตโนมัติ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาแว่นตาอัจฉริยะเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาด้วยระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและระบุตำแหน่ง

Development of Smart Glasses for Visually Impaired with Obstacle Warning and Location Sharing

กมลณิตย์ ภู่สร[1] ดนัย ทองธวัช[2] และก่อเกียรติ อ๊อดทรัพย์[3*]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์บูรณาการและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (จันทบุรี)
[3*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ตาก)
E-mail: kokiat_07@rmutl.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้พัฒนาแว่นตาอัจฉริยะที่สามารถช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาในการตรวจจับสิ่งกีดขวางและแจ้งเตือนผู้ดูแลเมื่อเกิดอุบัติเหตุ ออกแบบให้มีการติดตั้งเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกจำนวน 3 ตัว สำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางในระยะ 0.8–1.8 เมตร รอบทิศทางด้านหน้า ซ้าย และขวา พร้อมระบบแจ้งเตือนด้วยเสียงผ่านโมดูลเสียง MP3 เพื่อให้ผู้ใช้รับรู้ถึงทิศทางของสิ่งกีดขวางแบบเรียลไทม์ เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน เพื่อใช้ตรวจจับแรงกระแทกที่อาจเกิดจากการล้มหรือการชน เมื่อระบบตรวจพบแรงสั่นสะเทือน จะดึงข้อมูลพิกัดจากโมดูล GPS และส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน LINE ของผู้ดูแลผ่านการเชื่อมต่อ Wi-Fi ด้วยบอร์ด ESP32 ผลการทดลอง พบว่าระบบสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้อย่างแม่นยำตามระยะที่กำหนด สามารถแจ้งเตือนผ่านเสียงได้ถูกต้องตามทิศทาง และการตรวจจับแรงสั่นสะเทือน ระบบสามารถส่งพิกัดตำแหน่งได้ถูกต้องทุกครั้งโดยไม่มีความคลาดเคลื่อน การพัฒนาแว่นตาอัจฉริยะฯนี้ จึงสามารถเพิ่มความปลอดภัยและอิสระในการดำเนินชีวิตให้แก่ผู้พิการทางสายตาได้

คำสำคัญ: ผู้พิการทางสายตา, แว่นตาอัจฉริยะ, เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก, เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน, การระบุตำแหน่ง GPS, การแจ้งเตือนผ่านไลน์

Abstract

This research presents the development of smart glasses designed to assist visually impaired individuals by detecting obstacles and notifying caregivers in the event of an accident. The glasses are equipped with three ultrasonic sensors positioned to detect obstacles within a range of 0.8 to 1.8 meters in the front, left, and right directions. The system provides real-time voice alerts via an MP3 sound module, enabling users to perceive the direction of nearby obstacles. In addition, a vibration sensor is integrated to detect physical impacts, such as falls or collisions. When a significant vibration is detected, the system retrieves GPS coordinates from a GPS module and sends an alert message to the caregiver through the LINE application, using Wi-Fi communication via the ESP32 microcontroller.

Experimental results show that the system can accurately detect obstacles within the specified range and provide voice alerts in the correct direction. Moreover, in vibration detection scenarios, the system consistently transmits precise GPS location data without deviation. The development of these smart glasses demonstrates significant potential in enhancing the safety, independence, and quality of life for visually impaired individuals.

Keywords: Visually impaired, Smart glasses, Ultrasonic sensor, Vibration sensor, GPS positioning, LINE Notify

1. บทนำ

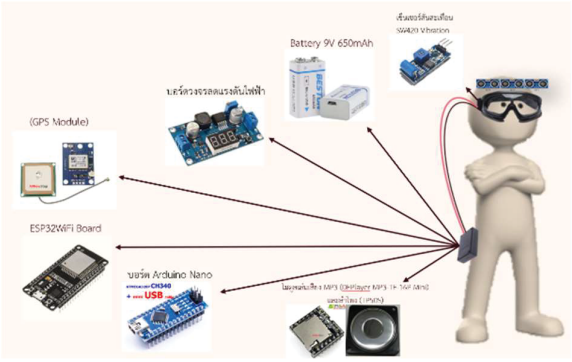
ผู้พิการทางสายตา เป็นกลุ่มที่มีข้อจำกัดในการดำเนินชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเคลื่อนไหวและการเดินทางในพื้นที่สาธารณะ พื้นที่ทั่วไปมักมีสิ่งกีดขวาง การเดินทางของผู้พิการทางสายตา หรือพื้นต่างระดับ ที่สามารถก่อให้เกิดอุบัติเหตุที่รุนแรงได้ ดังนั้นผู้พิการทางสายตาส่วนมากใช้ “ไม้เท้านำทาง” ซึ่งมีจุดเด่นในการตรวจจับสิ่งกีดขวางระดับพื้น แต่ยังไม่สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางในระดับลำตัวหรือศีรษะได้อย่างครอบคลุม ทำให้ผู้พิการทางสายตามีความเสี่ยงในการเดินชนสิ่งกีดขวางระดับบน เช่น ป้ายแขวน หรือขอบประตู ที่ผ่านมา มีการพัฒนานวัตกรรมช่วยผู้พิการหลายรูปแบบ เช่น ไม้เท้าอัจฉริยะ หมวกเซ็นเซอร์ แว่นตาอัจฉริยะ เช่น งานของยุพดีและคณะ [1]

ใช้เซ็นเซอร์เพียง 2 ตัว ทำให้มุมตรวจจับแคบ 60 องศา ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเพิ่มเติมเซนเซอร์เป็น 3 ตัว เพื่อให้ครอบคลุมมุมรวมกัน 90 องศา และลดระยะการตรวจจับและแจ้งเตือนให้อยู่ที่ 0.8–1.8 เมตร โดยอ้างอิงจากระยะการก้าวเดินของมนุษย์เพื่อให้มีระยะระวังอันตรายก่อนชนกับสิ่งกีดขวาง หรือผลงานของฐาปนันท์และคณะ [2] ที่ออกแบบหมวกพร้อมเซ็นเซอร์ แต่ยังไม่สามารถส่งข้อมูลแจ้งเตือนไปยังผู้ดูแลได้แบบเรียลไทม์ ดังนั้นจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ยังคงมีช่องว่างด้าน ความแม่นยำของระยะตรวจจับรอบทิศทางในมุม 90 องศาใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกแจ้งเตือนเป็นเสียงและการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ [3] ไปยังผู้ดูแลในกรณีฉุกเฉิน เช่น การหกล้มหรือเดินชนสิ่งกีดขวางรุนแรงด้วยการส่งส่งพิกัดตำแหน่งผ่าน GPS พร้อมแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน LINE ของผู้ดูแลทันที ผลงานนี้สามารถใช้เป็นต้นแบบในการเรียนการสอนในรายวิชาโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้า เพื่อเสริมสร้างทักษะด้าน Embedded System, IoT และพัฒนาอุปกรณ์ช่วยเหลือสังคม

2. วิธีดำเนินงาน

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

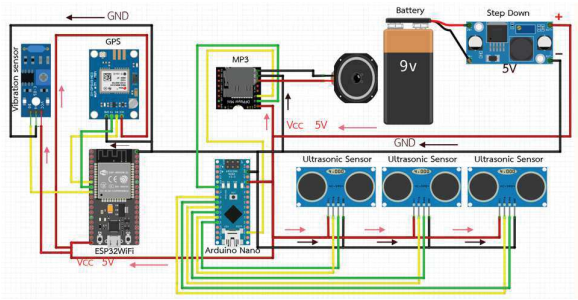
การออกแบบแว่นตาอัจฉริยะฯ [4]ในบทความนี้มีแนวคิดหลักในการ สร้างอุปกรณ์ช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาให้สามารถรับรู้สิ่งกีดขวางรอบตัวได้ครอบคลุมมากกว่าการใช้ไม้เท้า โดยเฉพาะบริเวณระดับศีรษะ ลำตัว และข้างลำตัว ซึ่งเป็นจุดเสี่ยงในการเดินชนสิ่งกีดขวางบ่อยครั้ง แว่นตาถูกออกแบบด้วยโปรแกรม Autodesk Fusion 360 จากนั้นนำแบบไปพิมพ์ 3 มิติ ด้วยวัสดุ PLA เพื่อให้มีน้ำหนักเบา และแข็งแรง ออกแบบให้มีช่องว่างสำหรับติดตั้ง เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกด้านหน้าของแว่นตา 3 ตำแหน่ง ซ้าย กลาง และขวา เพื่อให้สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางในมุมรวม 90 องศา โดยแต่ละตัวจะมีมุมการตรวจจับประมาณ 30 องศา กำหนดระยะตรวจจับสิ่งกีดขวางด้านหน้าที่ 0.8–1.8 เมตร



รูปที่ 1 ตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์แว่นตาอัจฉริยะฯ

เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน ติดตั้งบริเวณด้านในแว่นตา ใกล้ศีรษะ เพื่อให้รับแรงสะเทือนจากการหกล้มหรือชนได้โดยตรง โมดูลระบุตำแหน่ง GPS ติดตั้งภายนอกบนกล่องควบคุมบริเวณเอวของผู้ใช้งาน ซึ่งเชื่อมต่อกับแว่นตาผ่านสายสัญญาณ ระบุตำแหน่งผู้ใช้เมื่อเกิดอุบัติเหตุล้มหรือกระแทกรุนแรง จึงส่งข้อมูลตำแหน่งของผู้พิการผ่านไลน์ไปยังผู้ดูแล ดังรูปที่ 1

รูปที่ 2 กรอบความคิดการออกแบบการต่อวงจร ด้วยโปรแกรม Fritzing สำหรับการต่อวงจรใช้งานจริงของอุปกรณ์ มีการแบ่งการควบคุมเป็น 2 กลุ่ม คือ ESP32 WiFi ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เซ็นเซอร์สั่นสะเทือน กับโมดูลระบุตำแหน่ง GPS Ublox NEO-M8N และบอร์ด Arduino Nano เป็นตัวควบคุมเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ กับโมดูลเล่นเสียง MP3



รูปที่ 2 การออกแบบการต่อวงจรอุปกรณ์แว่นตาอัจฉริยะฯ

2.2 การเขียนโปรแกรมและการควบคุมระบบผ่าน Arduino Nano และ ESP32

แว่นตาอัจฉริยะที่พัฒนาประกอบด้วยบอร์ดควบคุม 2 ชุดหลัก คือ Arduino Nano และ ESP32 WiFi ซึ่งออกแบบให้ทำงานร่วมกันแบบแยกหน้าที่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลและการควบคุมอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อ บอร์ดArduino Nano ควบคุมการตรวจจับสิ่งกีดขวางและการแจ้งเตือนด้วยเสียง โดยรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกจำนวน 3 ตัว ที่ติดตั้งบริเวณด้านหน้าแว่นตาในตำแหน่งซ้าย กลาง และขวา เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางในมุมกว้างประมาณ 90 องศา โดยโปรแกรมที่ออกแบบจะใช้คำสั่งในการวัดระยะเวลาที่คลื่นเสียงเดินทางไปกลับจากระยะทางด้วยสมการ

$$\text{ระยะทาง} = \frac{c \times t}{2} \qquad (1)$$

โดยที่

c คือ ความเร็วสากลของสัญญาณคลื่นอัลตร้าโซนิกส์ในตัวกลางที่เป็นอากาศ คือ 330 เมตร/วินาที

t คือ เวลาในการเดินทางไปกลับของคลื่นเสียงที่วัดได้

ผลการคำนวณหาผลลัพธ์เพื่อแปลงเป็นค่าระยะทางการส่งและการรับสัญญาณคลื่นความถี่ของเซ็นเซอร์ เมื่อพบว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ภายในระยะที่กำหนด (0.8 – 1.8 เมตร) สั่งให้ โมดูล DFPlayer Mini เล่นไฟล์เสียงแจ้งเตือนที่ระบุทิศทางของสิ่งกีดขวาง เช่น ด้านซ้าย, ด้านหน้า หรือ ด้านขวา ผ่านลำโพงที่ติดตั้งไว้บริเวณใกล้หูผู้ใช้ ช่วยให้ผู้ใช้งานรับรู้สิ่งกีดขวางได้อย่างทันท่วงที

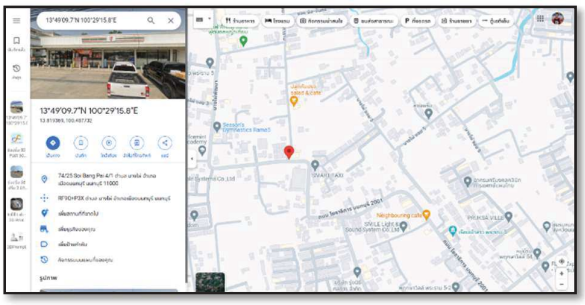


รูปที่ 3 ระยะมุมมองศาและมุมตรวจจับทับซ้อนของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิก

ผลการทดลองจากรูปที่ 3 ระยะของเซ็นเซอร์อัลตราโซนิกติดตั้งตรงกลางแว่น คลื่นความถี่มีความเสถียรในการตรวจจับสิ่งกีดขวางแต่ละระยะ แต่ละองศา พบว่าที่สุดคือระยะ 1 เมตรมีความเสถียรของการตรวจจับมากที่สุด [3], [4]

การควบคุมระบบตรวจจับแรงสั่นสะเทือนและการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE บอร์ด ESP32 WiFi Module ใช้การสื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi [5] โดยรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือนซึ่งติดตั้งไว้บนตัวแว่นตา เมื่อมีแรงกระแทกที่อาจเกิดจากการล้ม หรือการเดินชนสิ่งกีดขวาง บอร์ด ESP32 รับข้อมูลจาก เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน ประมวลผลว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นรุนแรงหรือไม่ หากรุนแรงระบบจะดึงข้อมูลพิกัดจาก GPS Ublox NEO-M8N ประมวลผลพิกัดให้สามารถนำไปใช้งาน ลิงก์ Google Maps เพื่อระบุตำแหน่งปัจจุบันของผู้ใช้งาน ระบบนี้ทำให้ผู้ดูแลสามารถทราบตำแหน่งของผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 4 ได้ทันทีเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน และสามารถเข้าช่วยเหลือได้อย่างรวดเร็ว





รูปที่ 4 ผลการทดลองระบุตำแหน่งและแจ้งเตือน

2.3 การคำนวณขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้กับแว่นตาอัจฉริยะฯ

ในการออแบบระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่องและเสถียร ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าร่วมกันสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด ประกอบด้วย Arduino Nano, ESP32, เซ็นเซอร์อัลตราโซนิก, โมดูล MP3, GPS, และเซนเซอร์แรงสั่นสะเทือน กำลังไฟฟ้ารวม 1.1 W (กรณีมีการทำงานพร้อมกัน) เลือกใช้แบตเตอรี่ถ่านชาร์จ BESTON 9V 650mAh Micro USB Li-ion ระบบสามารถทำงานต่อเนื่องได้ประมาณ 4-5 ชั่วโมงต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง

3. ผลการทดลอง

สามารถทำตามเงื่อนไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแนวคิดการแยกหน้าที่ของบอร์ดควบคุมระหว่าง Arduino Nano และ ESP32 WiFi ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพและสามารถประมวลผลได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองการทำงานของเซนเซอร์ร่วมกับระบบการแจ้งเตือน

การทดสอบ/ผลที่ได้	ค่าเฉลี่ย / ความแม่นยำ
การตรวจจับสิ่งกีดขวาง / สามารถตรวจจับได้ทุกทิศทาง	96.7% ตรวจจับในช่วง 0.8–1.8 เมตร
การแจ้งเตือนด้วยเสียง / แจ้งเตือนทิศทางถูกต้อง	100% เสียงไม่ดีเลย์ และเสียงชัดเจน
การตรวจจับแรงสั่นสะเทือน / ตรวจจับการล้มได้ทุกกรณี	100% (ทดสอบขณะเดิน และนั่งเบาๆ จะไม่มีการตรวจจับและแจ้งเตือน)
การส่งพิกัดผ่าน LINE Notify / แจ้งพิกัดถูกต้องทุกครั้ง	±5 เมตร (GPS Accuracy) ส่งข้อความภายใน 3 วินาที
ความเสถียรของระบบ ทดสอบขณะเปิดใช้งาน 5 ชั่วโมง / สามารถใช้งานต่อเนื่องได้	100% โดยไม่ต้องรีเซตระบบ

จากตารางที่ 1 ระบบแว่นตาอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการใช้งานจริง สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวาง แจ้งเตือน และส่งข้อมูลตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ

4. สรุป

การพัฒนาแว่นตาอัจฉริยะเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาด้วยระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและระบุตำแหน่งนี้ประโยชน์ที่ได้จากการนำไปใช้ เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความมั่นใจ ให้แก่ผู้พิการทางสายตาในการเดินทางในพื้นที่สาธารณะ ลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุที่เกิดจากสิ่งกีดขวางในระดับศีรษะและลำตัว ซึ่งไม้เท้าทั่วไปไม่สามารถทำได้ ออกแบบเพื่อรองรับสถานการณ์ฉุกเฉินแบบเรียลไทม์ โดยส่งพิกัดตำแหน่งผ่านแอปพลิเคชัน LINE ไปยังผู้ดูแลทันที ลดโอกาสเกิดความสูญเสีย ซึ่งการออกแบบและทดสอบ 3 เงื่อนไข 1) เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุแบบอัลตราโซนิกจำนวน 3 ตัว ครอบคลุมมุมการตรวจจับประมาณ 90 องศา ควบคุมการทำงานโดยบอร์ด Arduino Nano เพื่อประมวลผลและสั่งการแจ้งเตือนผ่านเสียงพูดโดยโมดูล MP3 ทดลองในระยะต่าง ๆ ได้แก่ 0.2, 0.5, 1.0, 1.5 และ 1.8 เมตร ภายในมุม 0 องศา, 15 องศาซ้าย และ 15 องศาขวา จากจุดศูนย์กลางเพื่อทดสอบความแม่นยำ ทดสอบการตรวจจับความทับซ้อนกันระหว่างเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัว พบว่าเซ็นเซอร์สามารถตรวจจับวัตถุได้ครบทุกระยะและทุกมุมมองศา ระบบแจ้งเตือนด้วยเสียงสามารถระบุทิศทางได้อย่างถูกต้องตรงกับตำแหน่งของสิ่งกีดขวาง 2) เซ็นเซอร์ตรวจจับแรงสั่นสะเทือน จำลองพฤติกรรมผู้ใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ การเดิน นั่ง ล้ม และนอน เพื่อทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์แรงสั่นสะเทือน จากการทดสอบด้วยมนุษย์พบว่าเซ็นเซอร์ไม่ตอบสนองต่อการเดิน นั่ง หรือนอนในลักษณะปกติ แต่เมื่อเกิดแรงสั่นสะเทือนจากการล้ม เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับได้ทันที บอร์ด ESP32 WiFi ร่วมกับ GPS Module จะดึงพิกัดปัจจุบันของผู้ใช้งานและส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน LINE ของผู้ดูแลทันที 3) การระบุตำแหน่งด้วย GPS และการแจ้งเตือนตำแหน่งผ่าน แอปพลิเคชัน LINE ทดลองจำนวน 5 ครั้ง โดยเปลี่ยนจุดทดสอบในแต่ละครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของการระบุตำแหน่งและการส่งข้อมูลผ่าน Wi-Fi พบว่าระบบสามารถส่งพิกัด GPS ไปยัง LINE ได้สำเร็จทุกครั้ง พิกัดที่ส่งมีความแม่นยำและตรงกับตำแหน่งจริงทุกครั้ง โดยไม่มีความคลาดเคลื่อน และสามารถแจ้งเตือนได้ภายในไม่เกิน 3 วินาที

4. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงงานเรื่อง แว่นตาแจ้งเตือนสิ่งกีดขวาง โดยนักศึกษามีส่วนร่วมในโครงงาน นายพงศธร เกษร นายฐาปกรณ์ นกคำ และนายวิรพนธ์ อินทร์ศวร อาจารย์กมลฉัตย์ ภู่สร เป็นที่ปรึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] ยุพดี หัตถสิน, ณัฐวัฒน์ พยาราษฎร์, ชาญณรงค์ ธรรมเสนา, และเขมะฑัต วิภาตะวนิช, “ศึกษาข้อมูลเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ” ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, 2558

[2] ฐาปนันท์ กุหลาบ, จิรายุทธ สุขเกษม, จีรพัฒน์ แซ่ก่อ,“ใช้บอร์ด Arduino ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุ,” วิทยาลัยเทคโนโลยีอรรถวิทย์พณิชยการ สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, 2562

[3] B. Finio, “Obstacle-Detecting Glasses with Ultrasonic Sensor,” *Science Buddies*, [Online]. Available: https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Elec_p108/electricity-electronics/obstacle-detecting-glasses. [Accessed: Apr. 24, 2025].

[4] A. Khan et al., “Design and Construction of an Obstacle-Detecting Glasses for the Visually Impaired,” *ResearchGate*, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/343717037. [Accessed: Apr. 24, 2025].

[5] โสภิดา ท้วมมี, หทัยรัตน์ เกตุมณีชัยรัตน์, ฉัลลิกา เพชรมณีนิลใส, และพศวัต พันธ์โสตถิ, ,“การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชั่นไลน์พร้อมตำแหน่ง GPS,” ภาควิชาการจัดการเทคโนโลยีการผลิตและสารสนเทศ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2565



กมลฉัตย์ ภู่สร
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
งานวิจัยที่มีความสนใจ: การออกแบบระบบไฟฟ้า, พลังงานทดแทน, การลดใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรม, แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า



ก่อเกียรติ อ๊อดทรัพย์
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา (ตาก)
งานวิจัยที่มีความสนใจ: ด้านการจำลองและวิเคราะห์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ด้านยานยนต์ไฟฟ้า ระบบราง และพลังงานทดแทน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed

TakeMed: An IoT-Based Sensor System for Monitoring Medication Usage

ดำรง เช้งมณี[1] ชนาธิป ทิพย์กองราษฎร์[2] ณัฐพงศ์ แพนไธสง[2] ปาณชัย เจริญบุญพัชร[2] เตือนใจ อาชีวะพนิช[1*] และ บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์[2]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์กรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
[2]หลักสูตรวิศวกรรมไอโอทีและสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: tuanjai.a@rmutsb.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดการระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed สำหรับผู้ใช้ยาโดยใช้เซนเซอร์ Ultrasonic และเทคโนโลยีไอโอที ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้สามารถตรวจจับ พฤติกรรมการใช้ยาและติดตามการใช้ยาตามกำหนดการใช้ยาของผู้ใช้ยา การทำงานของ TakeMad เมื่อผู้ใช้ยาหยิบยา ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลและเวลาที่ใช้ยา ผลการทดสอบพบว่าระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed สามารถบันทึกข้อมูลและเวลาการใช้ยาของผู้ใช้ยาตามกำหนดการใช้ยาและสามารถส่งไปยังแพลตฟอร์ม Firebase เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และติดตามข้อมูลการใช้ยาของผู้ใช้ยา

คำสำคัญ: การใช้ยา, เซนเซอร์, ไอโอที, TakeMed

Abstract

This research aims to design and develop a smart medication tracking system using sensors and IoT technology, referred to as TakeMed, to assist medication users. The system utilizes ultrasonic sensors integrated with IoT capabilities to detect medication-taking behavior and monitor adherence to prescribed schedules. The system operates by detecting when a user picks up their medication. Upon detection, TakeMed automatically records the exact time and date of usage. The experimental results demonstrate that the TakeMed system can effectively record medication usage events in accordance with the prescribed schedule. Furthermore, the data can be successfully transmitted to the Firebase platform, enabling real-time tracking and data analysis to support medication adherence monitoring.

Keywords: Medication Usage, Sensor, IoT, TakeMed

1. บทนำ

จากรายงานขององค์การอนามัยโลก (WHO) [1] ระบุว่ามากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของผู้ป่วยทั่วโลก ไม่ใช้ยาตามที่แพทย์สั่งตามกำหนดการใช้ยา ไม่ว่าจะเป็นการลืมใช้ยา ใช้ยาไม่ครบตามเวลา หรือหยุดใช้ยาเองก่อนเวลาซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ส่งผลกระทบในวงกว้าง ทั้งในระดับบุคคลและระดับระบบสาธารณสุข โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการไม่ใช้ยาตามกำหนดการใช้ยา ของผู้ใช้ยา 1. ผลต่อผู้ป่วยเองอาจมีอาการของผู้ใช้ยาไม่พัฒนาขึ้น หรืออาจทรุดหนักลง เสี่ยงต่อภาวะแทรกซ้อน โดยเฉพาะในผู้ใช้ยาที่เกี่ยวกับอาการเรื้อรัง เช่น เบาหวาน ความดันโลหิตสูง หรือโรคหัวใจ มีโอกาสในการกลับเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล (Rehospitalization) และอาจเพิ่มอัตราการเสียชีวิตในโรคเรื้อรังบางประเภท 2. ผลต่อระบบสุขภาพ อาจเพิ่มภาระด้านค่าใช้จ่ายในการรักษา (มีการประเมินว่าการไม่ใช้ยาตามแพทย์สั่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมทางการแพทย์ในสหรัฐอเมริกาสูงถึงกว่า 100,000 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ต่อปี) เป็นการเพิ่มภาระงานให้แก่บุคลากรทางการแพทย์ ส่งผลให้การรักษาโดยรวมไม่มีประสิทธิภาพ และ มีผลต่อการประเมินนโยบายด้านสุขภาพในระยะยาว 3. ผลต่อครอบครัวและสังคม ผู้ดูแลผู้ใช้ยาอาจต้องใช้เวลามากขึ้นในการดูแลผู้ใช้ยา ส่งผลกระทบต่อรายได้ของครอบครัว จากการลางานเพื่อดูแลผู้ใช้ยาหรืออาจส่งผลเสียต่อโอกาสในการทำงานของผู้ใช้ยา ดังนั้นการ ไม่ใช้ยาตามกำหนดการใช้ยา ของผู้ใช้ยาไม่ว่าจะเป็นยารับประทาน ยาทา หรือยาฉีด ถือได้ว่าเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในระบบสาธารณสุขทั่วโลก และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการรักษาอย่างมีนัยสำคัญ จากข้อมูลทางการแพทย์พบว่าการไม่ปฏิบัติตามคำแนะนำในการใช้ยา (Medication Non-Adherence) ส่งผลเสียต่อผู้ใช้ยาทั้งทางตรงและทางอ้อม สถิติอัตราการไม่ปฏิบัติตามคำแนะนำในการใช้ยาลดความดันโลหิตในสหรัฐอเมริกา [2] โดยช่วงน้ำหนักจำแนกตามกลุ่มอายุและเพศ อัตราการไม่ปฏิบัติตามโดยรวมช่วงน้ำหนักอยู่ที่ 31.0% ซึ่งคิดเป็นประมาณ 16.3 ล้านคนในสหรัฐอเมริกา อัตราการไม่ปฏิบัติตามสูงสุดอยู่ที่ ช่วงอายุ 18 - 34 ปี อัตราการไม่ปฏิบัติตาม ต่ำสุดอยู่ที่ช่วงอายุ 65 - 74 ปี การวิเคราะห์เมตา [3] แสดงให้เห็นว่าการไม่ปฏิบัติตามการใช้ยาในผู้ใหญ่อายุ ≥55 ปี มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับการเข้ารับการรักษาในโรงพยาบาลและอัตราการเสียชีวิตที่สูงขึ้น และการศึกษานี้ [4] พบว่าอัตราการไม่ใช้ยาตาม

กำหนดการใช้ยาในผู้ใหญ่อายุ 21–64 ปี อยู่ที่ 38.4% ในขณะที่ผู้สูงอายุ ≥65 ปี อยู่ที่ 22.3% โดยกลุ่มวัยหนุ่มสาวมีแนวโน้มที่จะไม่ปฏิบัติตามการใช้ยามากกว่ากลุ่มผู้สูงอายุ สำหรับในประเทศไทยจากการสัมภาษณ์ผู้สูงวัยและบุคคลทั่วไปโดยคณะผู้วิจัย สรุปพอสังเขป พบว่า ปัญหาการใช้ยาที่ไม่เป็นไปตามกำหนดการใช้ยามีปัจจัยที่สำคัญคือลืม และละเลย

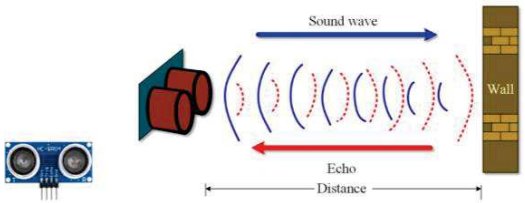
ฉะนั้น จากที่กล่าวมาข้างต้นของสาเหตุและปัญหาที่เกิดขึ้นทางผู้วิจัยพบว่าแนวทางหนึ่งสำหรับการแก้ไขปัญหาการใช้ยาของผู้ใช้ยาตามกำหนดการใช้ยาจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มผู้ใช้ยาทั้งกลุ่มวัยทำงาน กลุ่มสูงอายุ ผู้ใช้ยาในโรคเรื้อรัง หรือผู้ใช้ยาที่ต้องใช้ยาหลายชนิดอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยจึงออกแบบและสร้างระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed เป็นระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ซึ่งระบบ TakeMed ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไอโอที สามารถบันทึกข้อมูลและเวลาการใช้ยาของผู้ใช้ยาตามกำหนดการใช้ยา สามารถส่งไปยังแพลตฟอร์ม Firebase เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และติดตามข้อมูลการใช้ยาของผู้ใช้ยา ทั้งที่พัก สถานพยาบาลหรือโรงพยาบาล

2. ข้อตกลงเบื้องต้น

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed การประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ และ การพัฒนาแพลตฟอร์มออนไลน์เพื่อสนับสนุนพฤติกรรมสุขภาพ โดยข้อตกลงเบื้องต้นของการวิจัยมีดังนี้ 1. แนวคิดเกี่ยวกับระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed • ระบบแจ้งเตือนมีบทบาทสำคัญในการช่วยให้ผู้ใช้ยารับประทานยาตรงเวลาและสม่ำเสมอ โดยใช้สัญญาณเสียง การแสดงผลข้อความ และการวิเคราะห์พฤติกรรมของผู้ใช้ 2. ทฤษฎีการตรวจจับวัตถุด้วยเซนเซอร์ Ultrasonic • ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูงในการวิเคราะห์ระยะห่างของวัตถุ ซึ่งมีความ แม่นยำและสามารถติดตามพฤติกรรมการหยิบยาได้ 3. แนวคิดด้านไอโอที และการเชื่อมต่อข้อมูล • ระบบต้องสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์ม Firebase ในการจัดการข้อมูล การรับใช้ยา 4. แนวคิดด้าน UX และการออกแบบอินเทอร์เฟซ • ระบบต้องออกแบบให้ใช้งานง่าย โดยเฉพาะสำหรับผู้สูงอายุและผู้ ที่ไม่คุ้นกับชินกับเทคโนโลยีเพื่อให้สามารถโต้ตอบกับอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สมมติฐานของการวิจัย 1. ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อช่วยลดปัญหาการลืมใช้ยาตามกำหนดการใช้ยาได้ โดยช่วยให้ผู้ใช้ยาปฏิบัติตามตาราง การใช้ยาได้ตรงเวลามากขึ้น 2. เซนเซอร์ Ultrasonic มีความแม่นยำในการตรวจจับพฤติกรรมการการใช้ยาและสามารถประมวลผลได้อย่างถูกต้องภายในระยะเวลาที่กำหนด 3. ระบบแจ้งเตือนผ่าน Buzzer และหน้าจอ LCD สามารถช่วยให้ผู้ใช้รับรู้เวลาการใช้ยาได้ ชัดเจน และส่งผลให้เกิดความพึงพอใจต่อระบบ 4. การเชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Firebase ทำให้สามารถจัดเก็บและเรียกดูข้อมูลประวัติการใช้ยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ 5. ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ออกแบบมาให้ใช้งานง่าย โดยเฉพาะกับผู้สูงอายุและผู้ใช้ยาโรคเรื้อรัง ซึ่งช่วยเพิ่ม ความสะดวกในการดูแลสุขภาพ

นิยามศัพท์เฉพาะ 1. ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed หมายถึง ระบบที่ได้รับการออกแบบขึ้นเพื่อช่วยเตือนและติดตามการใช้ยาของผู้ใช้ยาให้เป็นไปตามเวลาที่กำหนด โดยอาศัยเทคโนโลยีตรวจจับพฤติกรรมการหยิบ ยา เช่น เซนเซอร์ Ultrasonic และกลไกการแจ้งเตือนที่หลากหลาย เช่น เสียงแจ้งเตือนจาก Buzzer หรือข้อความแสดงผลบนหน้าจอ LCD 2. เซนเซอร์ Ultrasonic หมายถึง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เพื่อวัดระยะทางของวัตถุโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง หลักการทำงานของเซนเซอร์นนี้อาศัยการส่งคลื่นเสียงออกไปกระทบกับวัตถุและวัด ระยะเวลาที่เสียงสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณ จากนั้นคำนวณระยะห่างโดยใช้ความเร็วของเสียง แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เซนเซอร์ Ultrasonic [5]

3. Buzzer หมายถึง อุปกรณ์ส่งสัญญาณเสียงที่เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้ยาเมื่อถึงเวลากำหนดการใช้ยา โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าเป็นคลื่นเสียงเพื่อดึงดูดความสนใจของผู้ใช้ยา แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซนเซอร์ Buzzer [5]

4. Firebase หมายถึง แพลตฟอร์มพัฒนาแอปพลิเคชันแบบครบวงจร ที่พัฒนาโดย Google ซึ่งช่วยให้นักพัฒนาสามารถสร้าง จัดการ และปรับปรุงแอปพลิเคชันทั้งบน Android, iOS, Web และ Unity ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องเขียนโค้ดฝั่งเซิร์ฟเวอร์เองทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 3

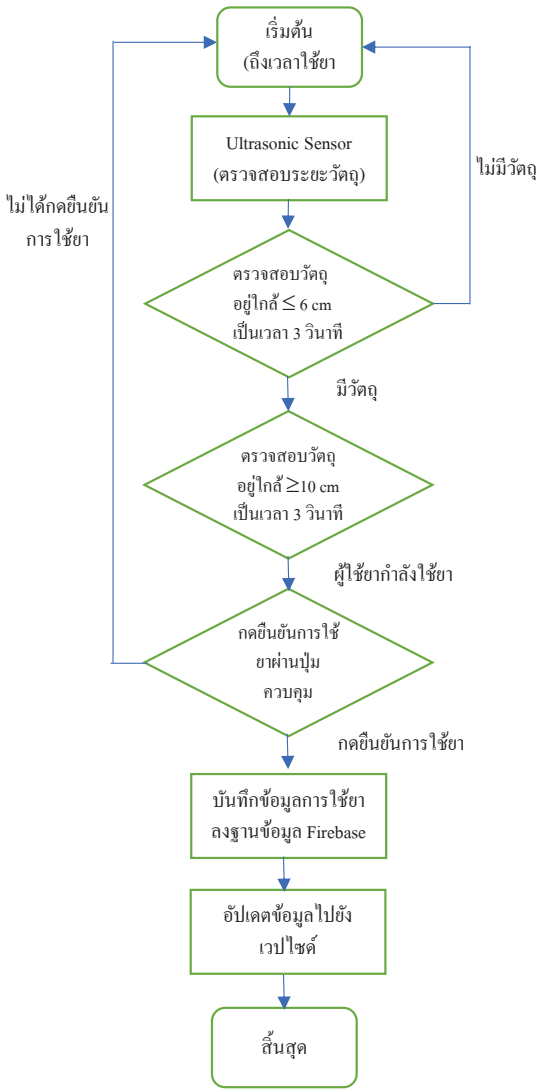


รูปที่ 3 Firebase [6]

5. Login-Logout หมายถึง กระบวนการระบุตัวตนของผู้ใช้ในระบบสารสนเทศ โดย "Login" เป็นกระบวนการเข้าสู่ระบบโดยใช้ชื่อผู้ใช้และรหัสผ่านเพื่อเข้าถึงข้อมูลส่วนตัวหรือบริการที่เกี่ยวข้องในขณะที่ "Logout" เป็นกระบวนการออกจากระบบเพื่อป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต

3. การดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาข้อมูล จากการสัมภาษณ์ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจากการใช้ยา พบกับปัญหาหลักคือลืมทานยา ฉะนั้นจึงเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed โดยมีลำดับขั้นตอนตาม flow chart แสดงดังรูปที่ 4



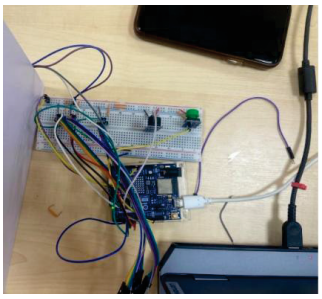
รูปที่ 4 Flowchart ฟังก์ชันในการทำงานหลัก

ระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ใช้เซนเซอร์ Ultrasonic จำนวน 3 ตัวเพื่อตรวจจับวัตถุภายในกล่องยา หากมีวัตถุอยู่ที่ระยะใกล้กว่าหรือเท่ากับ 6 เซนติเมตรเป็นเวลา 3 วินาที ระบบจะระบุว่ามีวัตถุอยู่ และหากระยะห่างเพิ่มขึ้นเป็นมากกว่าหรือเท่ากับ 10 เซนติเมตรเป็นเวลา 3 วินาที จะถือว่าผู้ใช้กำลังใช้ยา ผู้ใช้สามารถกดยืนยันการกินยาผ่านปุ่มควบคุม นอกจากนี้ ระบบยังมีเสียงแจ้งเตือนจาก Buzzer เมื่อถึงเวลาใช้ยา และมีหน้าจอ LCD แสดงเวลาการใช้ยาและช่องที่ต้องใช้ยา ระบบยังสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล Firebase เพื่อให้สามารถจัดเก็บข้อมูลการใช้ยาของผู้ใช้ และสามารถเชื่อมต่อกับเว็บไซต์ที่มีฟังก์ชันการ Login-Logout บันทึกข้อมูลการใช้ยาและแสดงประวัติการใช้ยาของผู้ใช้ยา



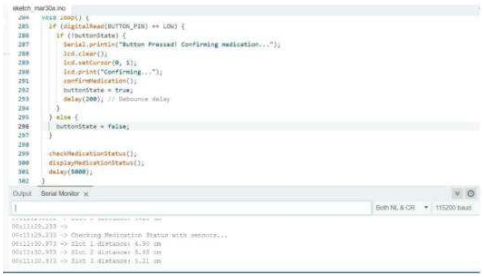
รูปที่ 5 ชุดระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed

จากรูปที่ 5 แสดงชุดระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วยกล่องประมวลผลที่มีจอแสดงสถานะ และกล่องใส่ยา

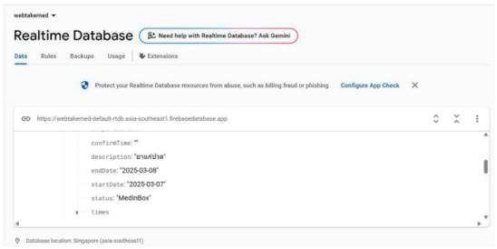


รูปที่ 6 ภาพรวมวงจรในระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed

จากรูปที่ 6 แสดงภาพรวมวงจรในระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์ผ่านระบบไอโอที: TakeMed ประกอบชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino IOT กับชุดรับข้อมูลจากเซนเซอร์



รูปที่ 7 โปรแกรมเซนเซอร์ Ultrasonic ตรวจจับวัตถุภายในกล่องยา



รูปที่ 8 การจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์



รูปที่ 9 ฟังก์ชันการ Login-Logout ของผู้ใช้



รูปที่ 10 บันทึกการใช้ยากินเพื่อการใช้ยา



รูปที่ 11 ประวัติการใช้ยาของผู้ใช้ยาประเภทยากิน

4. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบติดตามการใช้ยาด้วยเซนเซอร์และเทคโนโลยีไอโอทีภายใต้ชื่อ TakeMed ระบบใช้เซนเซอร์ Ultrasonic ตรวจจับพฤติกรรมการใช้ยาด้วยการใช้ยาในกล่องยา สามารถตรวจจับพฤติกรรมการใช้ยาด้วยการใช้ยาและบันทึกเวลาใช้ยา ข้อมูลการใช้ยาถูกส่งไปยังแพลตฟอร์ม Firebase เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการติดตาม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังการใช้ยา เป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้และเป็นแนวทางการพัฒนาต่อไปเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไพศาล สิทธิโยภาสกุล และความร่วมมือทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

[1] World Health Organization, “ Failure to take prescribed medicine for chronic diseases is a massive, world-wide problem,” 2003,https://www.who.int/news/item/01-07-2003-failure-to-take-prescribed-medicine-for-chronic-diseases-is-a-massive-world-wide-problem?utm_source=chatgpt.com

[2] T. E. Chang, M. D. Ritchey, S. Park, A. Chang, E. C. Odom, J. Durthaler, S. L. Jackson and F. Loustalot, " National Rates of Nonadherence to Antihypertensive Medications Among Insured Adults With Hypertension," 2015 Hypertension , Volume 74, Number 6, https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.119.136.

[3] C. A Walsh, C. Cahir , S. Tecklenborg, C. Byrne 1, M. A Culbertson, K. E Bennett ., “The association between medication non-adherence and adverse health outcomes in ageing populations: A systematic review and meta-analysis, ” 2019, Br J Clin Pharmacol, doi: 10.1111/bcp.14075.

[4] L. Ge , B. Hoon Heng, C.Wei Yap., " Understanding reasons and determinants of medication non-adherence in community-dwelling adults: a cross-sectional study comparing young and older age groups," 2023, BMC Health Serv Res, doi: 10.1186/s12913-023-09904-8.

[5] เตือนใจ อาชีวะพนิช., “การวัดและเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า,” 2565, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

[6] Wikipedia, “Firebase,” 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Firebase.

General Electrical Engineering

(GN)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่องสว่างไฟถนนด้วยการปรับมุมดวงโคมแบบอัตโนมัติ

Efficiency Improvement of Street Illumination System with Automatic Till Angle Adjustment of Luminance

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์[1*] นนธวัช สีสรรค์[1] อิศเรศ ขาวเกลียด[1] ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์[2] และ ธวัช ชูชิต[3]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
E-mail: anone@webmail.npru.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่องสว่างของไฟถนนด้วยการปรับมุมของโคมแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป DIALux โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่าความส่องสว่างและความสม่ำเสมอของแสงโดยทำการเปรียบเทียบโคมไฟแบบปกติและโคมไฟแบบอัตโนมัติ นอกนี้ยังทำวิเคราะห์ลักษณะของการกระจายแสงของไฟถนนเมื่อโคมไฟถนนทำงานร่วมกับระบบตรวจรับค่าความสว่าง จากผลการทดลองปรากฏว่า ค่าความสม่ำเสมอของแสงจากโคมไฟถนนแบบอัตโนมัตินั้นมีความสม่ำเสมอของระดับแสงที่มากกว่าค่าความความสม่ำเสมอของโคมไฟแบบปกติ 2 – 9 % ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอของระดับแสงที่มากกว่านั้นจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยมีผลมากจากความเร็วของรถในขณะทดสอบด้วย

คำสำคัญ: ความสม่ำเสมอ ความส่องสว่าง, ดวงโคมไฟฟ้า, การควบคุมอัตโนมัติ

Abstract

This paper presents the increasing efficiency of street illumination while til angle luminance auto adjustment via the DIALux simulation program. This project focuses on analysis the illumination and uniform of luminance with 3 cases consisted of there is the light from only the motorcycle, there is the light from the car and there is the light from both of motorcycle and the car. In addition, the speed of motorcycle was variable in range 40 up to 70 km/hr. while the car speed was variable in range 40 up to 60 km/hr. the experimental results shown that the uniform of luminance with auto adjustment is better than without auto adjustment is 2 up to 9 percent. In term of the illumination, auto adjustment can increase the illumination on the street in all of cases.

Keywords: uniformity, illumination, luminaire, automatic control

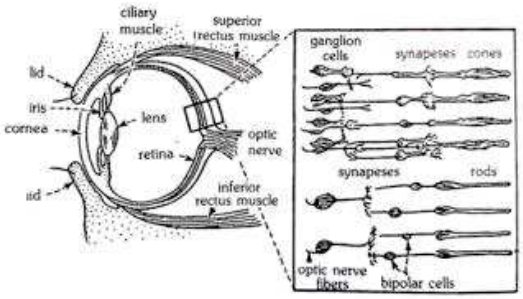
1. บทนำ

ในปัจจุบันมีผู้ขับขี่และผู้ใช้ถนนในเวลากลางวันและกลางคืนเป็นจำนวนมากเนื่องจากจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นและเศรษฐกิจมีการแข่งขันมากขึ้นและมีระบบคมนาคมขนส่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเพื่อรองรับการพัฒนาและการขยายตัวทั้งทางด้านเศรษฐกิจและการขยายตัวในภาคอุตสาหกรรมดังนั้นการสร้างเส้นทางใหม่หรือการขยายเส้นทางคมนาคมถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการส่งเสริมระบบคมนาคมให้มีประสิทธิภาพไม่ว่าจะเป็นระบบคมนาคมในเส้นทางหลักเส้นทางรอง ทางด่วน ทางหลวงระหว่างจังหวัดหรือแม้กระทั่งเส้นทางหลวงชนบท

ระบบส่องสว่างจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในเวลากลางคืนเพราะเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อตัวผู้ขับขี่และต่อผู้ใช้ถนน [11-12] การให้แสงสว่างกับถนนมีความจำเป็นต้องไม่ให้เกิดความเมื่อยล้าหรือต้องเพ่งสายตามากในการมองที่จะส่งผลถึงความปลอดภัย ดังนั้นการออกแบบไฟถนนต้องพิจารณาในสามเรื่องคือ ให้มีความส่องสว่างพอเพียง ให้มีความสม่ำเสมอของแสงบนท้องถนน และเรื่องสุดท้ายคือ แสงที่ทำให้บาดตา ต้องพยายามให้เกิดน้อยที่สุด เพื่อให้เกิดระบบส่องสว่างอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ธรรมชาติของการมองเห็น

เมื่อแสงตกกระทบที่วัตถุใดๆ มันจะสะท้อนเข้าสู่กระบอกตาแล้วเคลื่อนที่ผ่านแก้วตา (cornea) มายังลูกตา (lens) และตกกระทบที่เรตินา (retina) ส่งคลื่นไปยังประสาทตา (nerve) และสมองตามลำดับ กล้ามเนื้อตาจะทำหน้าที่ขยายตัวหรือหดตัว เพื่อโฟกัสให้คลื่นแสงที่มากระทบแก้วตาและลูกตาไปตกลงบนบริเวณเรตินา นอกจากนี้ยังมีม่านตา (iris) คอยทำหน้าที่ปิดเปิดกระบอกตาเพื่อควบคุมปริมาณแสงให้เข้าสู่กระบอกตาตามความเหมาะสม บริเวณเรตินายังประกอบไปด้วยเซลล์ประสาทเป็นจำนวนมาก [1-2], [4]



รูปที่ 1 หน้าตัดของลูกนัยน์ตา

2.1.ความสัมพันธ์ของแสงและการเห็น

ในการออกแบบระบบแสงสว่างที่ดี ได้ปริมาณแสงที่เหมาะสมถูกต้องกับการใช้งานจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ มากมายนับตั้งแต่ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับผู้ปฏิบัติงานขนาดของชิ้นงาน ความแตกต่างของความสามารถในการสะท้อนแสงระหว่างชิ้นงานกับสิ่งแวดล้อมความแตกต่างของความดำ-ขาว ตลอดจนกระทั่งความเร็วในการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวของชิ้นงานในที่นี้เราจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีผลกระทบต่อการเห็น

2.2 ขนาดของชิ้นงาน

โดยธรรมชาติแล้วตาของคนเราสามารถเห็นวัตถุที่ใหญ่ได้ง่ายกว่าวัตถุที่เล็กและมีแนวโน้มที่จะเห็นวัตถุชิ้นเดียวกันมีขนาดเล็กลงในเวลากลางคืนเมื่อเทียบกับเวลากลางวัน การเพิ่มปริมาณแสงที่เหมาะพอก็คือการทำให้ตาของคนเรามีความรู้สึกเห็นวัตถุชิ้นเดียวกันนั้นเสมือนขยายใหญ่ขึ้นมาเท่ากับขนาดที่เราเห็นมันในเวลากลางวันวัตถุยิ่งเล็ก ๆ รายละเอียดมากปริมาณแสงที่ต้องการก็จะมีมากขึ้นเป็นเงาตามตัว เช่น การอ่านหนังสือ การพิมพ์ดีด การเขียนแบบ ย่อมต้อง การปริมาณแสงมากขึ้นเป็นพิเศษ [3 -5], [9-10]

3. หลอดที่ใช้กับโคมไฟถนน

ในการส่องสว่างถนนส่วนใหญ่ของกรมทางหลวงกรมทางหลวงชนบทและองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนั้น จะนิยมใช้โคมไฟถนนและหลอดไฟฟ้าชนิดต่างๆ ตามชนิดและประเภทของถนนในแต่ละพื้นที่ เช่น โคมไฟถนนประเภทต่าง ๆ ที่ใช้หลอดโซเดียมความดันไอสูงหลอดเมทัลฮาไลด์หรือหลอดไอปรอทความดันสูงแหล่งกำเนิดแสงประกอบด้วยหลอดไฟฟ้าอุปกรณ์ควบคุมและตัวโคมไฟถนนองค์ประกอบที่มีผลต่อการเลือกใช้ในการออกแบบไฟถนน ได้แก่ ขนาดของหลอดไฟฟ้า (กำลังไฟฟ้าและฟลักซ์ส่องสว่าง) อายุของหลอดไฟฟ้า สีของแสงและการเห็นสี (Tc,Ra) ประสิทธิผลของหลอดไฟฟ้าและโคมไฟถนน ขนาดทางกายภาพของหลอดไฟฟ้าและโคมไฟถนน การกระจายแสงของโคมไฟถนน ความคงทนและชั้นการป้องกันของโคมไฟถนน

3.1 หลอดไอปรอทความดันสูง

หลอดไอปรอทความดันสูงหรือหลอดแสงจันทร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เก่าแก่และใช้กันมากในไฟถนน ทำงานด้วยไอปรอทที่ความดันสูงมีให้เลือกใช้หลายขนาดแสดงได้ดังรูปที่ 2 [6-8]

จุดเด่น คือ อายุการใช้งานยาวง่ายต่อการใช้งานเนื่องจากใช้บัลลาสต์แต่เพียงอย่างเดียว [7]

จุดด้อย คือ ค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างต่ำ ฟลักซ์ส่องสว่างจะลดลงค่อนข้างเร็วตามอายุใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับหลอดโซเดียมความดันไอสูงและเมื่อไฟฟ้าดับช่วงสั้นๆ หลอดจุดติดใหม่จะใช้เวลา



รูปที่ 2 Mercury vapour Lamp, E-elliptical,phosphor Coat

3.2 การคำนวณการส่องสว่างโคมไฟถนน

การคำนวณการส่องสว่างโคมไฟถนนใช้วิธีจุดต่อจุด (Point by Point) ซึ่งอาศัยกราฟการกระจายแสงของระนาบ $C-\gamma$ [11], [13] ดังสมการที่ 1

$$E = I(C,\gamma) \times Cos^3\gamma / H^2 \qquad (1)$$

E =ความส่องสว่างในแนวระดับหน่วยเป็น ลักซ์

I =ความเข้มแสงหน่วยเป็น แคนเดลา

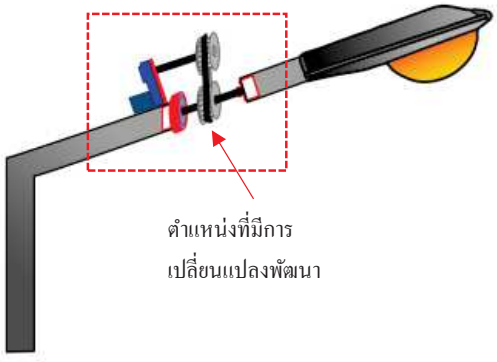
γ =มุมระหว่างเส้นจากโคมไปจุดที่ต้องการหาความส่องสว่างทำกับแนวดิ่งหน่วยเป็นองศา

H =ความสูงโคมเหนือพื้นหน่วยเป็น เมตร

4. การออกแบบโมเดลโคมไฟ

บทความนี้ดำเนินการออกแบบระบบควบคุมความสม่ำเสมอของดวงโคมไฟฟ้าโดยอาศัยการทำงานของเซนเซอร์แสงและเซนเซอร์

วัตถุ เพื่อส่งสัญญาณให้มอเตอร์กระแสตรงที่ติดตั้งอยู่บริเวณเพลาของ Over hang ของโคมไฟฟ้าให้สามารถปรับมุมดวงโคมให้หมุนไปตามทิศทางที่กำหนดให้ งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Overhang ตามลักษณะที่ได้ออกแบบไว้แสดงได้ดังรูปที่ 3



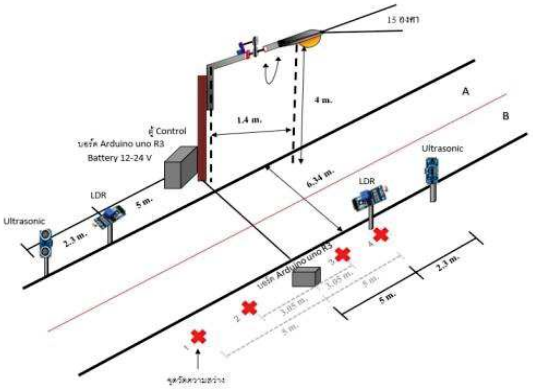
รูปที่ 3 โมเดลโคมไฟที่ได้พัฒนาขึ้น

4. ผลการทดลอง

การออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่องสว่างของโคมไฟถนน ด้วยการปรับดวงโคมแบบอัตโนมัติในบทที่แล้วนั้น ในบทความนี้จะนำการเพิ่มประสิทธิภาพระบบส่องสว่างของไฟถนน ด้วยการปรับดวงโคมแบบอัตโนมัติมาทำการทดลองควบคุมดวงโคมแบบอัตโนมัติ ขนาดดวงโคม 80 วัตต์ ขนาดเสาไฟสูง 4 เมตร โดยละเอียดการทดลองจะเป็นการทดลองควบคุมดวงโคมแบบอัตโนมัติจะทดลองกับถนนที่มีความกว้างไม่น้อยกว่า 6 เมตร และมีการจำลองในขณะที่ขับขี่รถยนต์และจักรยานยนต์ในความเร็วต่างๆ ดังมีรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองดังนี้

4.1 การทดสอบหาค่าความสว่างและความสม่ำเสมอของโคมไฟโดยรถจักรยานยนต์

ทำการทดสอบโดยใช้รถจักรยานยนต์ในการเก็บค่าความสม่ำเสมอและค่าความสว่างเป็นบริเวณ 4 จุด จุดละจำนวน 5 ครั้ง ระยะห่างระหว่างจุดที่ทำการเก็บค่าความสว่างเป็นต้น



รูปที่ 4 ตำแหน่งจุดวัดความสว่างแต่ละจุด โดยกำหนด เลน A คือ เลนที่ชิดกับเสาไฟและเลน B คือ เลนที่อยู่ตรงข้ามกับเสาไฟ

4.1.1 ทดสอบหาค่าความสว่างและความสม่ำเสมอของโคมไฟใน เลน A ที่ความเร็ว 40 km/h แบบปกติ (Lux)

จากการทดสอบพบว่าค่าในแต่ละรอบที่บริเวณจุดทดสอบต่าง ๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยบริเวณจุดที่ 2 และ 3 จะมีค่าความสว่างมากกว่าบริเวณจุดที่ 1 และ 4 ส่วนค่าความสม่ำเสมอที่ความเร็ว 40 km/h คือ 77.7 % ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองรถจักรยานยนต์ใน เลน A ที่ความเร็ว 40 km/h แบบปกติ

รอบที่	ค่าความสว่าง รถจักรยานยนต์ เลน A ที่ความเร็ว 40 km/h แบบปกติ (Lux)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
1	11.460	15.380	15.730	10.020
2	10.030	15.330	14.560	9.760
3	10.500	16.580	15.790	9.520
4	9.380	16.100	15.320	10.470
5	9.260	16.330	14.800	9.920
ค่าความสว่างเฉลี่ยต่อจุด (Lux)	10.128	15.944	15.240	9.952
E_{av}	12.816			
E_{min}	9.952			
ความสม่ำเสมอของระดับแสง	77.7 %			

4.1.2 ทดสอบหาค่าความสว่างและความสม่ำเสมอของโคมไฟใน เลน B ที่ความเร็ว 40 km/h แบบใช้บอร์ดควบคุม (Lux)

จากการทดสอบพบว่าค่าในแต่ละรอบที่บริเวณจุดทดสอบต่างๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยบริเวณจุดที่ 2 และ 3 จะมีค่าความสว่างมากกว่าบริเวณจุดที่ 1 และ 4 ส่วนค่าความสม่ำเสมอที่ความเร็ว 40 km/h คือ 86.1 % ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองรถจักรยานยนต์ใน เลน A ที่ความเร็ว 40 km/h แบบปกติ

รอบที่	ค่าความสว่าง รถจักรยานยนต์ เลน A ที่ความเร็ว 40 km/h แบบใช้บอร์ดควบคุม (Lux)			
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
1	11.010	14.480	14.240	12.450
2	11.290	13.840	15.680	12.620
3	11.280	15.690	15.250	13.630
4	11.910	13.590	14.320	13.690
5	12.400	13.720	14.540	13.010
ค่าความสว่างเฉลี่ยต่อจุด (Lux)	11.578	14.264	14.806	13.080
E_{av}	13.432			
E_{min}	11.578			
ความสม่ำเสมอของระดับแสง	86.1 %			

5. สรุปผล

ผลจากการทดสอบสรุปได้ว่า ในถนนแบบเลนสวนที่ได้ทำการทดสอบด้วยรถจักรยนต์และรถยนต์ในระดับความเร็วที่ 40 Km/h นั้น เมื่อใช้ลักซ์มิเตอร์ (Lux meter) วัดค่าความสว่าง ณ ที่จุดของขอบถนน เนื่องจากข้อความจำกัดของความอันตรายในการเก็บผลการทดสอบจึงไม่สารถวัดความสว่าง ณ จุดอื่น ๆ ได้และค่าความสว่างที่ทำการวัดได้นั้นมาจากค่าความสว่างของโคมไฟถนนแบบอัตโนมัติที่ได้ทำการสร้างขึ้นยังรวมไปถึงค่าความสว่างจากโคมไฟหน้ารถที่ได้ทำการทดสอบด้วยและผลที่ได้คือเมื่อนำค่าความสว่างของแสงมาวิเคราะห์หาค่าความสม่ำเสมอของระบบแสงจากโคมไฟถนนแบบปกติและจากโคมไฟถนนแบบอัตโนมัตินั้น ผลจากการวิเคราะห์ปรากฏว่าค่าความสว่างเฉลี่ยในแต่ละจุดที่ได้ทำการทดสอบจากโคมไฟถนนแบบอัตโนมัตินั้นมีค่าความสว่างที่ใกล้เคียงกันมากกว่ากันมากกว่าค่าความสว่างเฉลี่ยในแต่ละจุดที่ได้จากของการทดสอบโคมไฟถนนแบบปกติส่งผลให้ค่าความสม่ำเสมอของแสงจากโคมไฟถนนแบบอัตโนมัตินั้นมีความสม่ำเสมอของระดับแสงที่มากกว่าค่าความความสม่ำเสมอของระบบโคมไฟแบบปกติ 2 – 9 % ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความสม่ำเสมอของระดับแสงที่มากกว่านั้นจะเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยมีผลมากจากระดับความเร็วของรถในขณะทดสอบด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] J. B. De Boer, “Developments in illumination engineering in the 20th century,” Lighting Res.Technol. vol.14, pp207-217, 1982.

[2] V. P. Gallagher, “A visibility matrix for safety lighting of city street,” Journal of the Illuminating Engineering Society, pp.85-91, 1976.

[3] CIE (Commission International de I’Eclairage), “Road lighting as an accident countermeasure,” Publication No.93, 1992.

[4] J. F. Caminada,W. J. M. Van Bommel, “New considerations for residential areas,” International Lighting Review, pp.69-75, 1980.

[5] K. Narisada, and Y. Karasawa, “New method of road lighting design based on revealing power,” Proceedings of 26th session of the CIE, Beijing, China, pp.D4:10-13, 2007.

[6] K. Narisada, and Y. Karasawa, “Re-consideration of the revealing power on the basis of visibility level,” International Lighting Congress, Istanbul, Turkey, pp.473-480, 2001.

[7] R. B. Gibbons, and W. K. Adrian, “Influence of Observation Angle on Road Surface Reflection Characteristics,” Journal of the Illuminating Engineering Society, vol.26, pp.139-149, 1997.

[8] M. S. Rea, The IESNA Lighting handbook: Refernce&Application. New York: Illuminating Engineering Society of North Amerca, 2000, pp.1000.

[9] E. Hansen, and J. Larsen. “Reflection factors for pedestrian’s clothing,” Lighting Res. Technol. Vol.11, pp.154-157, 1979.

[10] I. Lewin. (1999). Lamp Color and Visiblility in Outdoor Lighting Design. The cConference on the Institution of Lighting Engineers.

[11] แนวทางการปฏิบัติด้านประสิทธิผลทางพลังงานของโคมไฟถนน, มาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ สภาวิศวกรรม, กุมภาพันธ์ 2554.

[12] คู่มือแนะนำการออกแบบงานไฟฟ้าแสงสว่างและไฟสัญญาณจราจร, กรมทางหลวงชนบท, ตุลาคม 2554.

[13] S. Alzubaidi, P.K. Soori. (2012). Study on energy efficient street lighting system design. Power Engineering and Optimization Conference (PEDCO) Melaka, Malaysia, 2012, pp.291-295

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2021 (EENET 2025)

การจำลองจ่ายโหลดประสิทธิภาพสูงสุด และอิทธิพลการเกิดแรงดันเกินชั่วครู่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์

The Simulation Results of Maximum Efficiency and Temporary Overvoltage Effect within a Distribution System Which Influence a Low Voltage Surge Protection Device for an Electrical Transformer 22 kV

อานนท์ สิงห์เสถียร[1] เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ[1] คชพงศ์ สุมานนท์[2]
สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ[1] สุรเชษฐ เดชฟุ้ง[1] มนัส บุญเทียรทอง[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้กล่าวถึงการวิเคราะห์การจ่ายโหลดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและพลังงานสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV ขนาดพิกัด 50 ถึง 1000 kVA ซึ่งใช้งานกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) รวมไปถึง การจำลองและการหาผลลัพธ์แรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดจากความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดินและการลัดวงจรระหว่างสายไลน์กับสายนิวทรัลภายใต้ระบบจำหน่ายของ กฟภ. โดยจะถูกจำลองขึ้นภายใต้ระบบการต่อลงดินแบบ TN-C-S (ลักษณะ TN-b) ตามมาตรฐาน IEC 60364-4-44 เพื่อให้เป็นข้อมูลประโยชน์ต่อผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของ กฟภ. ในการเลือกใช้พิกัดความคงทนแรงดันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดแรงดันต่ำ

คำสำคัญ: จ่ายโหลดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด, แรงดันเกินชั่วครู่

Abstract

This article presents an analysis of the maximum efficiency for delivering load and total energy loss of an electrical transformer. An electrical transformer has a rated voltage as 22 kV, rated apparent power 50 – 1000 kVA for the electrical distribution system of PEA. Temporary overvoltage (TOV) which can be occurred through a single line to ground fault and a line-neutral short circuit within the distribution system of PEA. This simulation is defined through the TN-C-S of an earthing system (type TN-b) based on IEC standard 60364-4-44, which can be utilized as practical data of customers on the PEA's distribution system to select the withstand level of a low voltage surge protection device (LV-SPD).

Keywords: Maximum efficiency for delivering load, Temporary Overvoltage

1. บทนำ

หนึ่งในปัจจัยของการออกแบบที่ดีคือ การทราบประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Efficiency) ของหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่มีมูลค่าสูงและทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าโดยตรงเข้าสู่อาคาร ดังนั้นวิศวกรผู้ออกแบบจึงต้องทำการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่จะถูกเลือกนำมาติดตั้ง เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับอ้างอิงการตัดสินใจและสามารถใช้แจ้งแก่ผู้ว่าจ้างออกแบบถึงพลังงานสูญเสียได้โดยไม่เกิดปัญหา โดยการจัดการประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงดังกล่าว สามารถนำไปสู่การเชื่อมโยงในด้านการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อมีการขยายความต้องการของโหลดในอนาคต

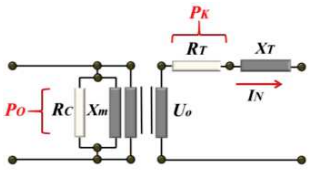
นอกจากนี้ การต่อประสานระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับระบบการต่อลงดิน โดยผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จด้านแรงดันต่ำ จะมีเงื่อนไขสำคัญที่ไม่สามารถมองข้ามได้ คือ อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ฯ นั้น จะต้องมีคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วครู่ (Temporary Overvoltage, TOV) โดยไม่เกิดความเสียหาย ตามมาตรฐาน IEC 60364-5-53 (Maximum Continuous Operating Voltage, U_C > 253 V และ ความสามารถในการคงทนต่อแรงดันเกินชั่วครู่ (Temporary Overvoltage Withstand, U_T > 333.5 V/s สำหรับระบบการต่อลงดินแบบ TN) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเกิดความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน รวมไปถึงสาเหตุการลัดวงจรระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัล ตามลำดับ โดยสาเหตุดังที่กล่าวมาข้างต้น จะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะการต่อลงดินของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่าย และลักษณะการต่อลงดินของตู้บริภัณฑ์ประธาน (Main Distribution Board Earthing) เป็นต้น

จากความสำคัญดังกล่าว บทความฉบับนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส พิกัดแรงดัน 22 kV ชนิดการฉนวนด้วยน้ำมัน ซึ่งเป็นหม้อแปลงที่ใช้งานกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เพื่อให้สามารถเป็นข้อมูลที่

วิศวกรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในการออกแบบเลือกหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าที่นำมาศึกษาในบทความฉบับนี้คือ 50 ถึง 1000 kVA (เนื่องจากเป็นขนาดพิกัดที่นิยมใช้งานในทางปฏิบัติ) ตามลำดับ รวมไปถึงการวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วครู่อันเนื่องมาจากสาเหตุของความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดินและการลัดวงจรระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัล ตามลำดับ โดยสาเหตุดังกล่าวเป็นเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในทางปฏิบัติภายใต้การต่อลงดินของระบบจำหน่ายไฟฟ้า (หรือเรียกสั้น ๆ ว่าระบบจำหน่าย) ซึ่งแรงดันเกินชั่วครู่นั้น สามารถสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า

2. กำลังปรากฏและพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำหน้าปรับลดระดับหรือเพิ่มระดับแรงดันกระแสสลับ เช่น 22 kV / 400 V เป็นต้น โดยพารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส สามารถแสดงในรูปของวงจรสมมูลดังรูปที่ 1. ซึ่งประกอบไปด้วย ความต้านทานขดลวด (R_T) รีแอกแตนซ์รั่วไหล (X_T) ความต้านทานเนื่องจากความสูญเสียในแกนเหล็ก (R_C) และรีแอกแตนซ์การทำแม่เหล็ก (X_m) ตามลำดับ



รูปที่ 1. วงจรสมมูลต่อเฟสของหม้อแปลงไฟฟ้าชนิด 3 เฟส

จากวงจรสมมูลต่อเฟสในรูปที่ 1. สามารถพิจารณาค่ากำลังสูญเสีย (Ploss) ของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส ได้ดังสมการที่ 1 คือ [1]

$$P_{loss} = P_o + (a^2 \cdot P_K) \quad (1)$$

โดยที่

$$P_K = I_N^2 \cdot R_T \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้

- P_o คือ กำลังสูญเสียในขณะไม่มีโหลด (kW)
- P_K คือ กำลังสูญเสียในขณะจ่ายโหลด (kW)
- a คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังปรากฏขณะจ่ายโหลดและกำลังปรากฏพิกัด (S_a/S_N)
- I_N คือ กระแสพิกัดด้านทุติยภูมิ (A)
- S_N คือ กำลังปรากฏพิกัด (kVA)
- S_a คือ กำลังปรากฏขณะจ่ายโหลด (kVA)
- U_o คือ แรงดันพิกัดด้านทุติยภูมิ (V)

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 1 ถึง 2 เมื่อนำมาคำนวณหาอนุพันธ์ของประสิทธิภาพ เพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างกำลังปรากฏขณะจ่ายโหลด (S_a) และกำลังปรากฏพิกัด (S_N) ที่ทำให้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 3

$$\frac{d\eta}{da} = \frac{d}{da} \cdot \left(1 - \frac{P_o + (a^2 \cdot P_K)}{(a \cdot S_N \cdot pf_{load}) + P_o + (a^2 \cdot P_K)}\right) \cdot 100 = 0 \quad (3)$$

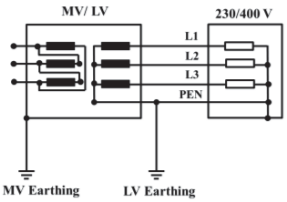
จากผลลัพธ์ของสมการที่ 3 จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังปรากฏซึ่งมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลด ($S_{a,\max\ eff}$) ดังแสดงให้เห็นในสมการที่ 4 ซึ่งถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์หลัก

$$S_{a,\max\ eff} = \left(\sqrt{\frac{P_o}{P_K}}\right) \cdot S_N \quad (4)$$

3. รูปแบบการต่อลงดินของระบบจำหน่ายภายในประเทศไทย

การต่อประสานโดยผ่านอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแรงดันต่ำ จะมีเงื่อนไขสำคัญที่ไม่สามารถมองข้ามได้ คือ อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ดังกล่าว จะต้องมีคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเกินชั่วครู่ (Temporary Overvoltage, TOV) โดยไม่เกิดความเสียหาย ทั้งในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จระหว่างสายไลน์กับสายดินป้องกัน (Line-Protective Earth, L-PE) หรือระหว่างสายไลน์กับสายนิวทรัล (Line-Neutral, L-N) ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวได้มีการระบุไว้อย่างชัดเจนในมาตรฐาน IEC 60364-5-53 [3]

สำหรับประเทศไทย ระบบจำหน่ายด้านแรงดันต่ำจะมีรูปแบบเป็น 3 เฟส 4 สาย (3 Phases 4 Wires) โดยด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้ามีลักษณะขดลวดต่อเป็นวาย (Wye Connection) และมีการต่อลงดินเป็นระบบ TN-C-S ซึ่งเป็นระบบที่ตัวนำนิวทรัล (N) และตัวนำป้องกัน (PE) ถูกรวมกันเป็นตัวนำชุดเดียวในส่วนหนึ่งของระบบ (หรือเรียกว่าสาย PEN) ก่อนจะถูกแยกออกจากกันที่ตู้บริภัณฑ์ประธานของโหลด (MDB) ตามมาตรฐาน IEC 60364-1 [4] โดยบทความฉบับนี้จะเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบแรงดันเกินชั่วครู่ต่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดแรงดันต่ำของระบบต่อลงดินลักษณะ TN-b เท่านั้น เนื่องจากมีความสอดคล้องกับการต่อลงดินในทางปฏิบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.



รูปที่ 2. ระบบการต่อลงดิน TN-b

4. การวิเคราะห์การจ่ายโหลดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและพลังงานสูญเสียรวมของหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV

สำหรับกรณีศึกษาของบทความฉบับนี้จะใช้ข้อมูลเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายยี่ห้อ Precise [2] โดยหม้อแปลงไฟฟ้าดังกล่าว เป็นมีการฉนวนแบบจุ่มน้ำมัน (เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ภายนอกอาคาร ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ), พิกัดแรงดัน 22kV/400/230 V, Dyn 11, พิกัดกำลังปรากฏ 50 - 1000 kVA, เปอร์เซ็นต์อิมพิแดนซ์เท่ากับ 3.6 - 6.6 เปอร์เซ็นต์, ตัวประกอบกำลังโหลด (pf_{load}) เท่ากับ 0.85 ตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 1 จากข้อมูลทางเทคนิคในตารางที่ 1 เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของสมการที่ 1 ถึง 4 จะสามารถแสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ 3. และรูปที่ 4. ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลในรูปที่ 3. เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยหลักการโพลิโนเมียลแบบถดถอย (Polynomial Regression) ทำให้ทราบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังปรากฏพิกัด (S_N) เท่ากับ 50 ถึง 1,000 kVA จะมีความสัมพันธ์กับกำลังปรากฏซึ่งมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลด ($S_{a,max\ eff}$) ดังสมการที่ 5 คือ

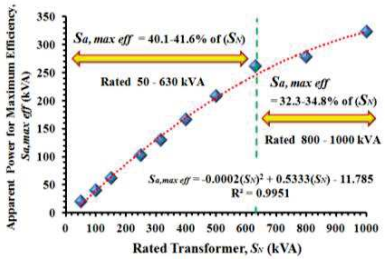
$$S_{a,\max\ \text{eff}} = (-0.0002)S_N^2 + (0.5333)S_N - 11.785 \quad (5)$$

จากผลลัพธ์ของสมการที่ 5 พบว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังปรากฏพิกัด (S_N) เท่ากับ 50 ถึง 630 kVA จะมีค่ากำลังปรากฏซึ่งมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลด ($S_{a,\max\ \text{eff}}$) อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 40.1 ถึง 41.6 ในขณะที่ หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังปรากฏพิกัด (S_N) เท่ากับ 800 ถึง 1,000 kVA จะมีค่ากำลังปรากฏซึ่งมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลด ($S_{a,\max\ \text{eff}}$) อยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 32.3 ถึง 34.8 ของขนาด S_N

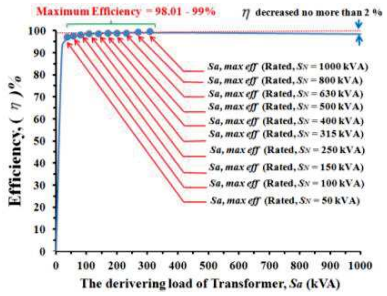
ข้อมูลจากรูปที่ 3. ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 จะได้ผลลัพธ์ค่าประสิทธิภาพสูงสุด (Maximum Efficiency, $\eta_{\max}$) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4 ซึ่งข้อมูลในภาพดังกล่าวได้แสดงให้เห็นว่าถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดที่ค่ากำลังปรากฏซึ่งมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดขณะจ่ายโหลด ($S_{a,\max\ \text{eff}}$) มีผลทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด ($\eta_{\max}$) มากกว่าร้อยละ 98 ขึ้นไป

ตารางที่ 1 ข้อมูลเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายยี่ห้อ Precise

Rated, S_N (kVA)	No Load Losses, P_o (W)	Load Losses, P_k (W)	Percent Impedance (%)	Oil Quantity (Liters)	Total Weight (kgs.)
50	160	950	3.6-4.4	88	420
100	250	1,550	3.6-4.4	115	600
160	360	2,100	3.6-4.4	130	730
250	500	2,950	3.6-4.4	170	950
315	700	3,900	3.6-4.4	200	1,120
400	850	4,600	3.6-4.4	260	1,310
500	1,150	6,600	3.6-4.4	365	1,855
630	1,350	8,500	3.6-4.4	375	1,855
800	1,450	12,000	5.4-6.6	510	2,200
1,000	1,600	13,500	5.4-6.6	660	2,550



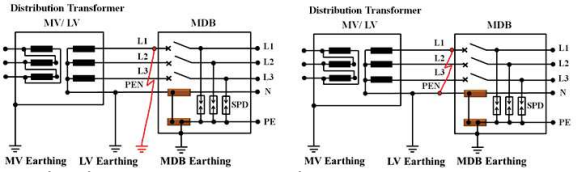
รูปที่ 3. การจ่ายโหลดประสิทธิภาพสูงสุด ($S_{a,max\ eff}$) ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาด S_N เท่ากับ 50 ถึง 1000 kVA



รูปที่ 4. ประสิทธิภาพสูงสุดของหม้อแปลงไฟฟ้าแต่ละพิกัด S_N ที่ทำการศึกษา เมื่อจ่ายโหลดขนาดกำลังเท่ากับ $S_{a,max\ eff}$

5. ผลลัพธ์แรงดันเกินชั่วครู่ที่กระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

ในหัวข้อนี้ จะทำการจำลองและวิเคราะห์หาแรงดันเกินชั่วครู่ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยทำการศึกษาจากระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ซึ่งมีเงื่อนไขพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ หม้อแปลงไฟฟ้าระบบจำหน่ายยี่ห้อ Precise [2] ขนาดพิกัดกำลัง 500 kVA และถูกต่อลงดินที่ด้านทุติยภูมิซึ่งมีความต้านทานดินเท่ากับ 2 โอห์ม เชื่อมต่อกับสายเคเบิลแรงดันสูงชนิด Space Ariel Cable (SAC) พิกัดแรงดัน 22 kV ขนาดสาย 185 ตารางมิลลิเมตร และสายเคเบิลแรงดันต่ำ พิกัดแรงดัน 230 / 400 V ขนาดสาย 185 ตารางมิลลิเมตร ขนาดพิกัดกระแส 400 แอมแปร์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.



รูปที่ 5. เงื่อนไขการความผิดพร่อง ที่กระทบต่ออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ

จากเงื่อนไขสำคัญดังที่กล่าวไปข้างต้น จะสามารถทำการสร้างสถานการณ์จำลองของระบบจำหน่ายขณะเกิดความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน (L1-PE) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถแสดงให้เห็นในรูปที่ 6. และตารางที่ 2 ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันเกิน

ชั่วครู่ดังกล่าว มีโอกาสจะเพิ่มสูงขึ้นที่ L2-PE และ L3 - PE เท่ากับ 258.4 โวลต์ (หรือ ประมาณ 1.123 เท่า ของแรงดันระบบแรงต่ำ 230 โวลต์) ซึ่งอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ที่นำมาใช้งานจะต้องสอดคล้องกับขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดต่อเนื่องที่อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ต้องคงทนได้ (Maximum Continuous Operating Voltage, U_C > 253 V_{AC}) ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC 60364-5-53

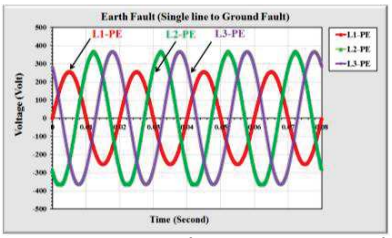
ในขณะที่เกิดการลัดวงจรระหว่างสายไลน์ 1 และสายนิวทรัล (L1-N) จะสามารถปรากฏผลลัพธ์ให้เห็นดังรูปที่ 7. และตารางที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันเกินชั่วครู่ที่ L2-PE และ L3-PE มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก (มากกว่ากรณีความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน) คือ 334.78 โวลต์ หรือประมาณ 1.455 เท่า ของแรงดันระบบแรงต่ำ 230 โวลต์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจะมีความสอดคล้องกับความสามารถในการคงทนต่อแรงดันเกินชั่วครู่ (Temporary Overvoltage Withstand, U_T > 333.5 V_{AC}/5sec) ของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ที่ระยะเวลาทดสอบ 5 วินาที โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 60364-5-5 เช่นกัน

โดยจากผลการจำลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า แรงดันเกินของระบบจำหน่าย กฟภ. อยู่ในเกณฑ์ที่ IEC 60364-5-53 กำหนด ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ที่มีความคงทนตามมาตรฐาน IEC นั้น จึงเป็นเกณฑ์ขั้นต่ำ ในการถูกนำมาพิจารณาใช้งานในทางปฏิบัติโดยไม่เกิดปัญหา

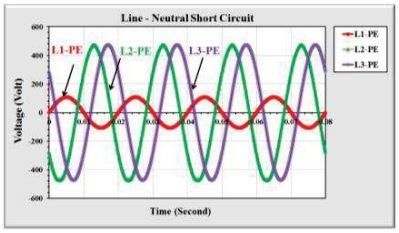
6. สรุป

บทความฉบับนี้ได้แสดงสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง $S_{a,max\ eff}$ และ S_N โดย S_N คือข้อมูลของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 50 ถึง 1000 kVA ยี่ห้อ Precise คือสมการที่ 5 ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพจ่ายโหลดสูงสุด และสามารถนำไปสู่การเชื่อมโยงในด้านการอนุรักษ์พลังงาน เมื่อมีการขยายความต้องการของโหลดในอนาคต

นอกจากนี้ อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ที่ถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่งสายที่ไม่เกิดความผิดพร่องหรือไม่เกิดการลัดวงจร จะมีความเสี่ยงสูงต่อการได้รับผลกระทบของแรงดันเกินชั่วครู่ ซึ่งจากการจำลองในบทความฉบับนี้สามารถแสดงเห็นได้ว่า อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ ที่ถูกติดตั้งบริเวณตำแหน่ง L2-PE และ L3-PE จะเกิดความเสี่ยงที่จะเสียหายขึ้นได้ ถ้าได้รับแรงดันเกินชั่วครู่ขนาด 1.455 เท่า ของแรงดัน 230 โวลต์ (คือ 334.78 โวลต์) เป็นระยะเวลานานเกิน 5 วินาที ขึ้นไป หรือได้รับแรงดันเกินชั่วครู่บ่อยครั้ง ซึ่งเป็นผลกระทบที่ผู้ออกแบบต้องตระหนักถึงในการเลือกใช้งานอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ โดยสามารถทราบพิกัดความคงทนได้จากค่า U_C และ U_T ในเอกสารคู่มือของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จฯ (SPD Manual)



รูปที่ 6. ผลลัพธ์แรงดันเกินชั่วครู่ เนื่องจากความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน



รูปที่ 7. ผลลัพธ์แรงดันเกินชั่วครู่ เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัล

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วครู่ (เป็นค่า R.M.S)

ประเภทของความผิดพร่องในระบบแรงต่ำ	แรงดันเกินชั่วครู่แต่ละสายไลน์เทียบสายป้องกันเมื่อพิจารณาผลลัพธ์เป็นค่ารากเฉลี่ยยกกำลังสอง (Root Mean Square, R.M.S) ซึ่งได้จากการจำลอง		
	L1-PE	L2-PE	L3-PE
ความผิดพร่องหนึ่งเฟสลงดิน (Single Line to Ground Fault)	$180\angle 0^\circ$	$258.4\angle -129.63^\circ$	$258.4\angle 129.63^\circ$
การลัดวงจรระหว่างสายไลน์และสายนิวทรัล (Line-Neutral Short Circuit)	$75.9\angle 0^\circ$	$334.78\angle -143.49^\circ$	$334.78\angle 143.49^\circ$

เอกสารอ้างอิง

[1] สุรวัฒน์ เสรีวิวัฒนา, “การออกแบบระบบไฟฟ้า” สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.

[2] Precise International Corporation LTD, “Precise Distribution Transformers (Specifications: Data for Transformer 3 Phase 22,000 -400/230 V Dyn11)” September 2023.

[3] (2015). Electrical installations of buildings – Part 5-53 : Selection and erection of electrical equipment – Isolation, switching and control. International Standard IEC 60364-5-53.

[4] (2001). Electrical installations of buildings – Part 1 : Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. International Standard IEC 60364-1.

[5] (2015). Electrical installations of buildings – Part 4-44 : Protection for safety – Protection against voltage disturbancesand electromagnetic disturbances. International Standard IEC 60364-4-44.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การสร้างแบบจำลองอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส

Modeling of Interdigital Electrodes for Non-Contact Solutions Inspection

คณิศร บุญรัตน์[1*] วสันต์ จันทรโชติ[1] ไพโรจน์ วุ่นชุม[1] และ คณดิล เจษฎ์พัฒนานนท์[1]
[1*]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
E-mail: sorn.supit@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการสร้างแบบจำลองอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส ดำเนินการโดย CST STUDIO SUITE® โดยกำหนดพอร์ตแบบสัญญาณท่อนำคลื่นในลักษณะเครือข่ายพอร์เดียว สารละลายตัวอย่างถูกบรรจุในขวดแก้วโดยกำหนดไดอิเล็กทริกในช่วง $10 \le \mathcal{E}_r \le 80$ ผลการดำเนินการพบว่าแบบจำลองที่สร้างสามารถแยะแยะเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วง $10 \le \mathcal{E}_r \le 20$, $20 \le \mathcal{E}_r \le 30$ และ $30 \le \mathcal{E}_r \le 80$ ด้วยการเลื่อนความถี่เรโซแนนต์ของ S_{11} มีการแยกแยะต่อหน่วยในแต่ละช่วงคือ 2.2 MHz, 3.8 MHz และ 0.44 MHz ตามลำดับ มีการทดลองเปรียบเทียบด้วยน้ำกลั่นและเมทานอลพบว่าสามารถแยกแยะได้อย่างชัดเจนโดยให้ผลที่สอดคล้องกัน

คำสำคัญ: เรโซเนเตอร์อินเตอร์ดิจิตอล, การตรวจจับแบบไม่สัมผัส, การตรวจจับคุณสมบัติไดอิเล็กตริก, การจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

Abstract

This paper presents the modeling of interdigital electrodes for non-contact solution inspection, implemented using CST STUDIO SUITE®. The model employs a waveguide signal port configured as a single-port network. Sample solutions were contained in glass vials with relative permittivity ($\mathcal{E}_r$) values ranging from 10 to 80. Simulation results demonstrate that the proposed model enables classification of the dielectric constants into three distinct ranges: $10 \le \mathcal{E}_r \le 20$, $20 \le \mathcal{E}_r \le 30$, and $30 \le \mathcal{E}_r \le 80$, based on the resonant frequency shifts observed in the S_{11} parameter. The sensitivity within each range is quantified as 2.2 MHz/unit, 3.8 MHz/unit, and 0.44 MHz/unit, respectively. Comparative experiments using distilled water and methanol confirm the model's capability for clear and consistent discrimination.

Keywords: Interdigital resonator, Non-contact sensing, Dielectric property Detection, 3D electromagnetic simulation

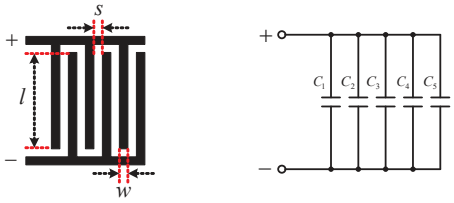
1. บทนำ

อิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลมีบทบาทสำคัญในการตรวจวัดและวิเคราะห์วัสดุในรูปแบบที่ไม่สัมผัสโดยตรง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของการปนเปื้อน อิเล็กโทรดชนิดนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยและอุตสาหกรรมมากมาย [1] เช่น การตรวจสอบคุณภาพอาหาร, การวิเคราะห์สารเคมีในเกษตรกรรม, การพัฒนาอุปกรณ์ทางการแพทย์, การวัดระดับน้ำและความชื้น, และการแยกแยะของเหลวชนิดต่างๆ เป็นต้น โดยอาศัยการทะลวงของสนามไฟฟ้าเข้าไปในเนื้อวัสดุ การมีโครงสร้างและหลักการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และต้นทุนการผลิตที่ต่ำ จึงทำให้อิเล็กโทรดชนิดนี้เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการวัดในอนาคต ในขณะที่การออกแบบอิเล็กโทรดในทางปฏิบัติให้เหมาะสมกับการใช้งานค่อนข้างมีความยุ่งยาก เนื่องจากโครงสร้างและพารามิเตอร์ของอิเล็กโทรด มีผลต่อความไว ความแม่นยำ และช่วงการวัดของเซ็นเซอร์ การปรับแต่งมิติต่างๆ ของอิเล็กโทรดอาจทำให้ต้องทำการผลิตหลายครั้งเพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับลักษณะของตัวอย่าง อย่างไรก็ตามด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบันผู้ออกแบบสามารถทราบพฤติกรรมการตอบสนองทางไฟฟ้าก่อนทำการผลิตของอิเล็กโทรดได้โดยการสร้างจำลองการวัดผ่านซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ [2], [3] ซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับปรุงมิติต่างๆ ทางโครงสร้างและการกำหนดขอบเขตการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การตรวจวัดสารละลายซึ่งเป็นของเหลวโดยทั่วไปมักทำการวัดด้วยวิธีการหยดหรือการจุ่มนั้นมีปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหา เช่น มีการปนเปื้อนง่าย ยุ่งยากต่อการใช้งานเนื่องจากต้องทำความสะอาดทุกครั้ง การควบคุมปริมาณและรูปทรงของสารในการหยดแต่ละครั้ง และรวมถึงปัญหาของสารละลายที่ทำละลายกับตัวทำละลายระเหยง่าย เช่น เมทานอล ซึ่งจะเกิดความผิดพลาดได้สูง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวัดแบบไม่สัมผัส [4] ดังนั้นบทความนี้จึงเสนอการสร้างแบบจำลองอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัสที่แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้สำหรับการประมาณค่าคุณสมบัติของสารละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกัน รวมถึงเป็นแนวทางสำหรับการผลิตเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมกับสารละลายเป้าหมายต่อไป

2. ทฤษฎีและหลักการ

อิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Electrode: IDE) เป็นอิเล็กโทรดแบบความจุไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง มีโครงสร้างคล้ายหวี ประกอบด้วยชี่ตัวนำที่เรียงสลับขั้วไฟฟ้ากันบนพื้นผิวดังแสดงไว้ในรูปที่ 1 (ก) เมื่อวางวัสดุทดสอบ (Material Under Test: MUT) บนพื้นที่ตรวจจับ (Sensing Area) ของ IDE สนามไฟฟ้าระหว่างชี่ตัวนำบนพื้นผิวจะเจาะทะลุผ่านวัสดุทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความจุไฟฟ้า ของ IDE เปลี่ยนแปลง



(ก) โครงสร้างกายภาพของ IDE (ข) วงจรสมมูลความจุไฟฟ้า

รูปที่ 1 โครงสร้างและวงจรสมมูลความจุไฟฟ้าของ IDE

วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของ IDE เสมือนเป็นเครือข่ายความจุไฟฟ้าหลายตัวขนานกันดังรูปที่ 1 (ข) การคำนวณค่าความจุไฟฟ้ามีพื้นฐานมาจากการแปลงตัวนำระนาบเป็นตัวนำขนาน โดยใช้หลักการ Schwarz-Christoffel Transformation และการทำแผนที่เชิงสอดคล้อง (Conformal Mapping) ดังสมการ (1) [5]

$$C = (N-1)l\left[\frac{\varepsilon_0(\varepsilon_3+\varepsilon_2)}{2}\frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)}+\varepsilon_0\varepsilon_1\left(\frac{h}{s}\right)\right] \quad (1)$$

โดยที่ N คือจำนวนชี่ตัวนำ, l คือความยาวของตัวนำ, ε_0 คือเปอร์มิตติวิตี้ในที่ว่าง (8.854×10^{-12} F/m), ε_1 คือเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างชี่ตัวนำ, ε_2 คือเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของซับสเตรต, ε_3 คือเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของ MUT, h คือความหนาของตัวนำ, k คือพารามิเตอร์โมดูลัสของฟังก์ชันวงรี กำหนดโดย $k = s/(s+w)$, และ $K(k)$ คือ ฟังก์ชันอินทิกรัลวงรีเชิงสมบูรณ์ชนิดที่หนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ของ MUT (ε_3) จะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์ของ IDE (Z_E) เมื่อให้ IDE ทำงานบนความถี่สูง (คลื่นไมโครเวฟ) อิมพีแดนซ์ดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์กระเจิง (S-parameters) ซึ่งจะใช้ประเมินคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ MUT โดยรูปที่ 2 (ก) แสดงวงจรเทียบเคียงเครือข่ายพอร์ตเดียว ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient: S_{11}) ถูกกำหนดโดยสมการ (2) [2]

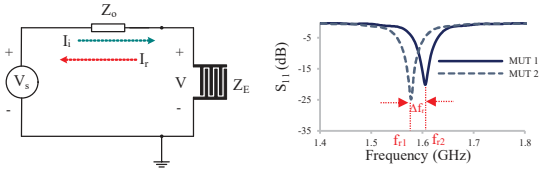
$$S_{11} = \frac{Z_E - Z_0}{Z_E + Z_0} \quad (2)$$

โดยที่ Z_E คืออิมพีแดนซ์ของ IDE และ Z_0 คืออิมพีแดนซ์ของพอร์ต (มาตรฐานเป็น 50Ω)

เมื่ออิมพีแดนซ์ของอิเล็กโทรด (Z_E) ซึ่งรับผลกระทบมาจากเปอร์มิตติวิตี้ของ MUT มีค่าเข้าใกล้อิมพีแดนซ์พอร์ต (Z_0) ที่ 50Ω ค่า S_{11} จะมีค่าต่ำโดยที่ค่าต่ำสุดเป็นภาวะเรโซแนนต์ ดังนั้นค่า S_{11} จะแตกต่างกันไปตามเปอร์มิตติวิตี้ของ MUT ภาวะเรโซแนนซ์สามารถอธิบายได้ดังสมการ (3) [2] และรูปที่ 2 (ข) แสดงให้เห็นลักษณะความถี่เรโซแนนต์ที่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลง (Δf_r) จากเปอร์มิตติวิตี้ของ MUT ที่ต่างกัน

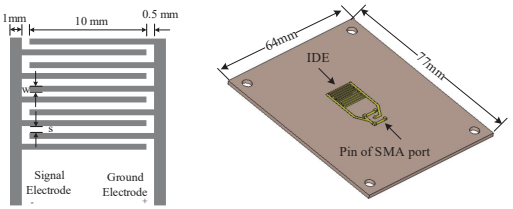
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

โดยที่ f_r คือความถี่เรโซแนนซ์ C คือความจุไฟฟ้าของโครงสร้างเรโซเนเตอร์ IDE และ L คือความเหนี่ยวนำปรสิต



ก) วงจรสมมูลของ IDE พอร์ตเดียว ข) การเลื่อนความถี่เรโซแนนต์

รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเครือข่ายพอร์ตเดียว IDE และการเลื่อนความถี่ f_r



(ก) การจัดเรียงชี่ตัวนำ (ข) แบบจำลอง

รูปที่ 3 รูปแบบการจัดเรียงชี่ตัวนำของ IDE และการสร้างแบบจำลอง

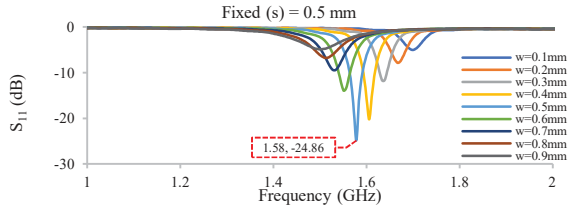
3. เทคนิคและวิธีการ

การสร้างแบบจำลอง IDE ที่ทำงานบนความถี่สูงดำเนินการโดย CST STUDIO SUITE® ซึ่งกำหนดให้ IDE ทำงานเป็นเซ็นเซอร์เครือข่ายพอร์ตเดียว และกำหนดความยาวชี่ตัวนำ (l) 10 มม. จำนวน (N) 10 ชี่ โดยวางเรียงสลับกันระหว่างสัญญาณและกราวด์ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ใช้ซับสเตรตชนิด FR-4 ที่มีมิติ (กว้าง x ยาว x สูง) เป็น (64 x 77 x 1.6) มม. มีค่าไดอิเล็กทริกเป็น 4.3 เชื่อมต่อกับพอร์ตมาตรฐาน (50Ω) แบบสัญญาณท่อนำคลื่น (Waveguide) รูปแบบการจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 3 (ข) จากนั้นปรับขนาดความกว้าง (w) และช่องว่าง (s) อิเล็กโทรดเพื่อหาขนาดมิติที่ดีที่สุดของ IDE โดยพิจารณาจาก S_{11} ที่มีการสะท้อนต่ำที่สุด หลังจากได้มิติของ w และ s ที่ดีที่สุดแล้วก็จะทำการสร้างแบบจำลองการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส พร้อมทั้งทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อยืนยันผล

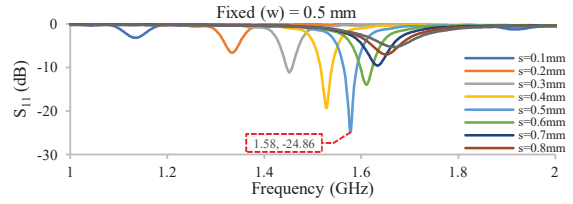
4. การดำเนินงาน

4.1 การจำลองเพื่อหามิติที่ดีที่สุดของ IDE

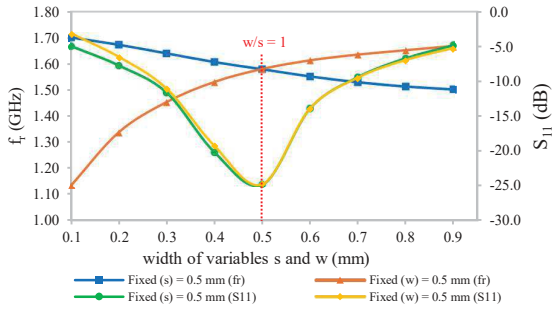
อิเล็กโทรดที่เสนอถูกจำลองและวิเคราะห์ในช่วงความถี่ 1-2 GHz การหามิติของอิเล็กโทรดที่ดีที่สุดในงานนี้แบ่งเป็นสองกรณี กรณีแรกกำหนด w ในช่วง 0.1 - 0.9 มม. โดย s เป็น 0.5 มม. กรณีที่สองกำหนด s ในช่วง 0.1 - 0.9 มม. โดย w เป็น 0.5 มม. และประเมินผลการตอบสนองจาก S_{11} โดยกรณี s คงที่ในรูปที่ 4 จะเห็น S_{11} ต่ำที่สุดคือ -24.86 dB ที่ความถี่ 1.58 GHz เมื่อ w เป็น 0.5 มม. ในทำนองเดียวกันในรูปที่ 5 เมื่อให้ w คงที่จะเห็น S_{11} ต่ำที่สุดคือ -24.86 dB ที่ความถี่ 1.58 GHz เมื่อ s เป็น 0.5 มม. เช่นกัน และหากพิจารณาอัตราความกว้างต่อช่องว่าง หรือ (w/s) ดังแสดงในรูปที่ 6 จะพบว่า w/s เท่ากับ 1 เป็นสัดส่วนที่ S_{11} สะท้อนต่ำที่สุด



รูปที่ 4 การตอบสนองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) กรณี s คงที่



รูปที่ 5 การตอบสนองของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S_{11}) กรณี w คงที่

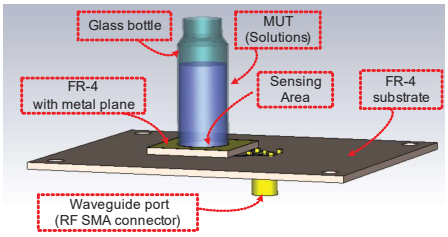


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ขนาดของ s และ w กับ f_r และ S_{11}

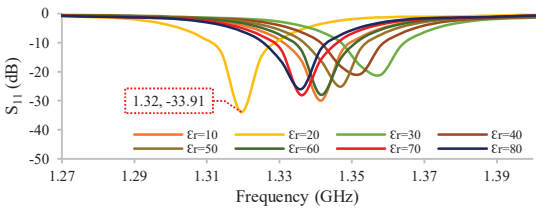
ความสัมพันธ์ของความถี่เรโซแนนต์ในรูปที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อให้ w เพิ่มขึ้น ความถี่เรโซแนนต์ (f_r) จะลดลง ในทางกลับกันเมื่อให้ s เพิ่มขึ้น ความถี่เรโซแนนต์ก็จะเพิ่มขึ้น การเลื่อนความถี่เรโซแนนต์ที่เกิดจากการปรับขนาดของ s และ w ทำให้เห็นจุดตัดของเส้นกราฟที่ตำแหน่ง w/s เท่ากับ 1 ซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นตำแหน่งที่เหมาะสำหรับการใช้งาน

4.2 การสร้างแบบจำลองการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส

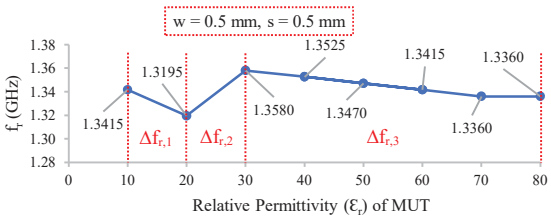
การสร้างแบบจำลองการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัสโดยกำหนดให้สารละลาย (Solutions) บรรจุในขวดแก้วหนา 0.4 มม. มีไดอิเล็กทริก เป็น 4.65 ความนำไฟฟ้า $1x10^{-12}$ S/m วางบนพื้นที่ตรวจจับของ IDE และตรึงอยู่กับที่ทุกครั้งเสมือนการทดสอบในสภาพจริงโดยใช้ FR-4 ขนาด (20 x 20) มม. ที่เจาะรูขนาดเท่ากับฐานของขวด มีระนาบโลหะช่วยควบคุมสนามไฟฟ้ารอบๆ โดยแบบจำลองแสดงไว้ในรูปที่ 7 และกำหนดค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายในช่วง $10 \leq \mathcal{E}_r \leq 80$



รูปที่ 7 แบบจำลองการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของ IDE ต่อไดอิเล็กทริกจากการจำลอง



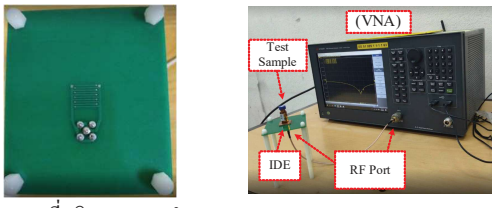
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ความถี่เรโซแนนต์กับไดอิเล็กทริก

ผลการจำลองในรูปที่ 8 พบว่า S_{11} ต่ำที่สุดเท่ากับ -33.91dB ที่ 1.32 GHz ซึ่งค่า $\mathcal{E}_r$ ของสารละลายเป็น 20 ความสัมพันธ์ f_r กับ $\mathcal{E}_r$ สามารถแบ่งวิเคราะห์การแยกแยะได้เป็น 3 ช่วงดังแสดงในรูปที่ 9 ได้แก่ ช่วงที่ 1 ($10 \leq \mathcal{E}_r \leq 20$) ช่วงนี้เมื่อค่า $\mathcal{E}_r$ เพิ่มขึ้น f_r จะลดลง $\Delta f_{r,1}$ คือ 22 MHz การแยกแยะต่อหน่วยคือ 2.2 MHz สารละลายในกลุ่มนี้ เช่น ไซโคลเฮกเซน, สารผสมโทลูอีน (Toluene) ช่วงที่ 2 ($20 \leq \mathcal{E}_r \leq 30$) เมื่อค่า $\mathcal{E}_r$ เพิ่มขึ้น f_r จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ $\Delta f_{r,2}$ คือ 38.5 MHz ความแยกแยะสูงคือ 3.8 MHz สารละลายในกลุ่มนี้ เช่น อะซิโตน, กรดอะซิติก และช่วงที่ 3 ($30 \leq \mathcal{E}_r \leq 80$) เมื่อค่า $\mathcal{E}_r$ เพิ่มขึ้น f_r จะค่อยๆ ลดลง ค่า $\Delta f_{r,3}$ คือ 22 MHz การแยกแยะ

ต่อหน่วยคือ 0.44 MHz ช่วงนี้มีช่วงการวัดไดอิเล็กทริกที่กว้างแต่จะให้ความแยกแยะของการวัดที่ต่ำ สารละลายในกลุ่มนี้ได้แก่ เมทานอล, น้ำ

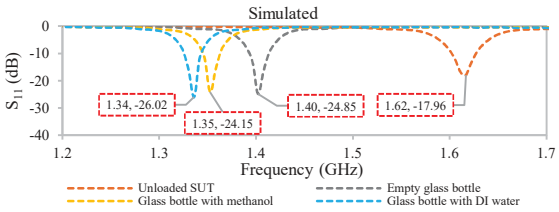
4.3 การทดลอง

การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถของการสร้างแบบจำลองโดยเทียบกับการทดลองจริงกับวัสดุที่ทราบค่าไดอิเล็กทริก ได้แก่ อากาศ (ε_r=1), ขวดแก้วเปล่า (ε_r=4.65), เมทานอล (ε_r=32.7), และน้ำกลั่น (ε_r=78) การทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง (25°C) ตัวอย่างจะบรรจุในขวดแก้วขนาด 2 mL วางบน IDE และเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์เครือข่ายเวกเตอร์ (VNA: ENA E5063A) ด้วยข้อต่อ SMA และสายนำสัญญาณความถี่สูง การตั้งค่าการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 10

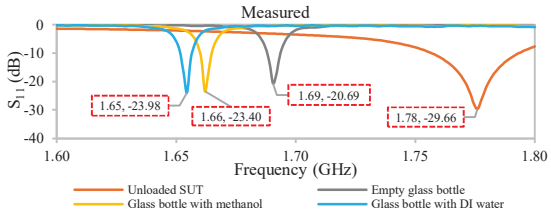


(ก) IDE ที่ผลิตตามแบบจำลอง (ข) การทดลอง

รูปที่ 10 การตั้งค่าการทดลอง



รูปที่ 11 ผลการจำลองการตอบสนองของอิเล็กโทรดต่อวัสดุต่างๆ



รูปที่ 12 ผลการทดลองการตอบสนองของอิเล็กโทรดต่อวัสดุต่างๆ

ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 11 พบว่ากรณีไม่โหลดสารละลาย (Unloaded SUT) เกิด f_r ที่ 1.62 GHz กรณีขวดแก้วเปล่า (Empty glass bottle) เกิด f_r ที่ 1.40 GHz กรณีเมทานอล (Glass bottle with methanol) เกิด f_r ที่ 1.35 GHz และกรณีน้ำกลั่น (Glass bottle with DI water) เกิด f_r ที่ 1.34 GHz ในขณะที่ผลการทดลองในกรณีเดียวกันในรูปที่ 12 ชี้ให้เห็นว่า f_r กรณีน้ำกลั่นไปถึงขวดแก้วเปล่าอยู่ในช่วง 1.65 GHz ≤ f_r ≤ 1.69 GHz ทั้งนี้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่ตรงกัน อย่างไรก็ตามทั้งผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่มีความสอดคล้องกัน โดยสามารถแยกแยะสารละลายที่มีไดอิเล็กทริกต่างกันได้

5. สรุป

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้อิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจสอบสารละลายแบบไม่สัมผัส โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองเชิงแม่เหล็กไฟฟ้า 3 มิติในย่านความถี่ไมโครเวฟ ซึ่งช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมการตอบสนองของ IDE มิติของความกว้างของขี่ตัวนำ และช่องว่างระหว่างขี่ตัวนำมีผลต่อการเลื่อนความถี่เรโซแนนต์ของค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการจำลองแสดงความละเอียดสูงในกลุ่มสารละลายที่มีไดอิเล็กทริกค่าปานกลาง เช่น เอทานอล, อะซิโตน, และกรดอะซิติก และประสิทธิภาพการแยกแยะอาจลดลงในสารละลายกลุ่มเมทานอลถึงน้ำแต่จุดเด่นคือมีช่วงค่าไดอิเล็กทริกกว้าง ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าอิเล็กโทรดที่เสนอสามารถแยกแยะสารละลายที่มีค่าไดอิเล็กทริกต่างกันได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นการเลือกใช้งาน IDE ควรพิจารณาให้สอดคล้องกับสมรรถนะที่ต้องการและลักษณะของสารละลายเป้าหมาย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสำหรับการสนับสนุน

เอกสารอ้างอิง

[1] N. Afsarimanesh, A. Nag, M. E. E. Alahi, T. Han, และ S. C. Mukhopadhyay, "Interdigital sensors: Biomedical, environmental and industrial applications," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 305, p. 111923, 2020.

[2] J. Bao, T. Markovic, G. Maenhout, I. Ocket, and B. Nauwelaers, "An impedance matched interdigital capacitor at 1.5 GHz for microfluidic sensing applications," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 330, p. 112867, Jan. 2021.

[3] M. F. A. bin Yunos, A. N. Nordin, A. Zainuddin, and S. Khan, "Modeling and development of radio frequency planar interdigital electrode sensors," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 8, no. 3, pp. 985–993, Sep. 2019.

[4] T. Islam, O. P. Maurya, and A. U. Khan, "Design and fabrication of fringing field capacitive sensor for non-contact liquid level measurement," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 21, pp. 24812–24819, Nov. 2021.

[5] P. K. Kythe, Handbook of conformal mappings and applications. Chapman and Hall/CRC, 2019.

การออกแบบและสร้างแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก

Design and Modeling of Autonomous Vehicles Using Deep Learning

กฤตินันท์ เพ็ชรศรี[1*] กรวิทย์ กระจ่างพันธ์[1]
[1*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้าประยุกต์ คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
E-mail: kittinan.p@fte.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ได้รับการสนับสนุนทั้งภาครัฐ และเอกชน ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีดังกล่าวจึงออกแบบ เพื่อสร้างแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยการออกแบบ และสร้างแบบจำลองนั้นประกอบด้วยการเตรียมเครื่องมือ และการพัฒนาอัลกอริทึมด้วยการเรียนรู้เชิงลึก และมีการพัฒนาให้แบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถทำตามข้อบังคับของป้ายจราจร ด้วยการพัฒนาการอัลกอริทึมการเรียนรู้เชิงลึกให้ใช้งานร่วมกับบอร์ด Google Coral และในท้ายที่สุดผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนของแบบจำลองดังกล่าวโดยกำหนดเงื่อนไขให้แบบจำลองขับขี่ในสนาม ที่มีตัวแปรต่างกันเพื่อเก็บผลค่าความผิดพลาด

คำสำคัญ: การเรียนรู้เชิงลึก, ขับเคลื่อนอัตโนมัติ, อัลกอริทึม

Abstract

This paper discusses autonomous vehicle technology, which has been continuously evolving with support from both the public and private sectors. Recognizing the significance of this technology, the researchers has designed and developed a model of an autonomous vehicle. The design and development process includes tool preparation and the implementation of deep learning algorithm. Furthermore, the model has been enhanced to comply with traffic sign regulations through the integration of deep learning algorithm with the Google Coral board. Finally, the researchers conducted driving tests under various conditions on a controlled track to measure errors and analyze variables affecting driving performance.

Keywords: Deep Learning, Autonomous Driving, Algorithms

1. บทนำ

ในปัจจุบันยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติหรือรถยนต์ไร้คนขับกำลังเป็นที่สนใจอย่างมากในวงการยานยนต์ ด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีและความต้องการยานพาหนะที่ปลอดภัยและสะดวกสบายยิ่งขึ้น เนื่องจากแนวโน้มสำคัญของนวัตกรรมในปี 2025 ได้แก่ การขับขี่อัตโนมัติเต็มรูปแบบ (Full Self-Driving) [1] ผู้ผลิตรถยนต์หลายรายกำลังพัฒนาระบบขับขี่อัตโนมัติที่สามารถควบคุมรถได้โดยไม่ต้องพึ่งพาผู้ขับขี่ ด้วยสาเหตุในการควบคุมตัวแปรหลายๆด้านได้ดีกว่าใช้มนุษย์ในการขับขี่ ซึ่งหากกล่าวถึงการขับเคลื่อนโดยไร้คนขับแล้วนั้น ก็ไม่สามารถหนีจากเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) [2] ได้ เพราะเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ถูกพัฒนาให้ใช้ในระบบสั่งการ และการควบคุมฟังก์ชันต่าง ๆ ภายในรถ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับตัดสินใจ ทำให้รถยนต์ขับขี่เป็นธรรมชาติมากขึ้น แต่หากการจะให้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มีประสิทธิภาพมากจำเป็นต้องใช้ข้อมูลมหาศาลจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในปัจจุบันจะต้องมีการเชื่อมต่อและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data & Analytics) [3] แต่ยานยนต์ในปัจจุบัน ถูกออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตและเก็บรวบรวมข้อมูลการขับขี่ เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงประสบการณ์การขับขี่ รวมถึงเพิ่มความปลอดภัยด้วย

ในประเทศไทย การพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับยานยนต์ไร้คนขับกำลังมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันกำลังพัฒนาในระดับ 3 ซึ่งหมายถึงระบบที่ยานพาหนะสามารถควบคุมตัวเองได้ในบางสถานการณ์ แต่ยังต้องการ การเฝ้าระวังและควบคุมจากผู้ขับขี่ โครงการนำร่องที่สำคัญได้แก่โครงการของศูนย์วิจัย Mobility & Vehicle Technology Research Center (MOVE) แต่ก็มีปัจจัยที่ผลต่อการยอมรับเทคโนโลยีนี้ งานวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับยานยนต์ไร้คนขับในประเทศไทย [4] พบว่าความกังวลด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของเทคโนโลยีเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค จากเทคโนโลยีในการพัฒนา ทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงความสำคัญของการออกแบบและสร้างยานยนต์ขับเคลื่อน

อัตโนมัติ แต่เนื่องจากการสร้างหรือการพัฒนาในยานยนต์ขนาดใหญ่มีข้อจำกัดในหลายด้าน ได้แก่ ความปลอดภัย งบประมาณ และสถานที่ จึงทำให้ผู้วิจัยสร้างและออกแบบรถบังคับเพื่อจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยการใช้การเรียนรู้เชิงลึก

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

การเรียนรู้เชิงลึก [5] คือ การนำซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ที่เลียนแบบการทำงานของระบบโครงข่ายประสาท (Neurons) ในสมองมนุษย์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning Algorithm) โดยการเรียนรู้เชิงลึกถูกสร้างขึ้นจากการนำเอาโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้นมาต่อกัน โดยชั้นแรกทำหน้าที่ในการรับข้อมูล เรียกว่า ชั้นข้อมูลอินพุต (Input Layer) และชั้นสุดท้าย ทำหน้าที่ส่งผลลัพธ์การประมวลผล เรียกว่า ชั้นข้อมูลเอาต์พุต (Output Layer) ส่วนชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นแรกกับชั้นสุดท้าย จะถูกเรียกว่า ชั้นที่ซ้อนอยู่ (Hidden Layer) คำว่า การเรียนรู้เชิงลึก มาจากการที่ใช้ชั้นของโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้นมาต่อกัน จากข้างต้นผู้วิจัยได้เลือกใช้ Linear regression ซึ่งเป็นอัลกอริทึมของ Keras โดยเป็นการเรียนรู้เชิงลึกที่พัฒนาจาก Google

2.2 การตรวจจับวัตถุ (Object detection)

การตรวจจับวัตถุสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชัน stop_sign_detector เป็นโมดูลที่ใช้สำหรับตรวจจับป้ายหยุด (Stop Sign) โดยใช้เทคนิค Computer Vision และ Machine Learning [6] เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับยานยนต์อัตโนมัติ (Autonomous Vehicles) หรือหุ่นยนต์ที่ต้องการตรวจจับป้ายจราจร ซึ่งหลักการทำงานตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของ Function stop_sign_detector (SSD)

2.3 การติดต่อสื่อสาร

ในการสร้างแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจำเป็นต้องใช้การสื่อสารด้วยกัน 2 แบบ ดังนี้

(I²C) หรือ Inter Integrate Circuit เป็นการสื่อสารที่นิยมสำหรับระบบฝังตัว (Embedded System) เนื่องจากใช้จำนวนสายเพียงแค่ 2 เส้นในการส่งข้อมูลผู้วิจัยจึงใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง Raspberry Pi 5 กับบอร์ด PCA 9685

SSH (Secure Shell) [7] เป็นการเชื่อมต่อโปรโตคอลระยะไกลเพื่อไปยังเครื่องเซิร์ฟเวอร์ (Server) หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างปลอดภัย โดยผ่านเครือข่าย TCP/IP และมีการเข้ารหัสข้อมูล ในส่วนการสื่อสารนี้ผู้วิจัยใช้สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ และ Raspberry Pi 5

2.4 อุปกรณ์ควบคุมประมวลผล

Raspberry Pi 5 เป็นบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Single-Board Computer: SBC) มีประสิทธิภาพสูง ความเร็ว 2.4 GHz มีหน่วยความจำ LPDDR4X-4267 ขนาด 8b GB พร้อมชิพ Wireless LAN และ Bluetooth 5.0 BLE นิยมนำมาพัฒนางานในด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI), การประมวลผลภาพ (Image Processing), ระบบอัตโนมัติ (Automation Systems) และอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง (IoT)

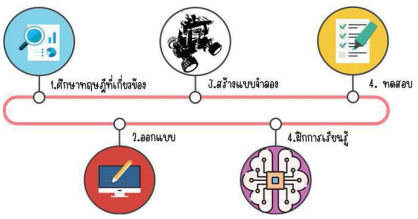
Webcam หรือ เว็บแคม เป็นอุปกรณ์รับภาพดิจิทัลที่ใช้สำหรับจับภาพและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ผ่านการเชื่อมต่อแบบ USB โดยปัจจุบันเว็บแคมถูกนำมาใช้ในหลากหลายด้าน เช่น การสื่อสารผ่านวิดีโอ, การจดจำใบหน้า, และการประมวลผลภาพ

PCA9685 เป็นไอซี (IC) ควบคุมสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) สามารถควบคุมเอาต์พุต PWM ได้สูงสุด 16 ช่องสัญญาณ ผ่านการเชื่อมต่อแบบ I²C (Inter-Integrated Circuit) โดยมีความแม่นยำสูงและรองรับการทำงานที่เป็นอิสระจากไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

Electronic Speed Controller (ESC) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับ ควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะ Brushless DC Motor (BLDC) และ Brushed DC Motor ซึ่งมักพบใน โดรน, รถยนต์ไฟฟ้า, หุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติอื่น ๆ

3. การออกแบบและการสร้างแบบจำลอง

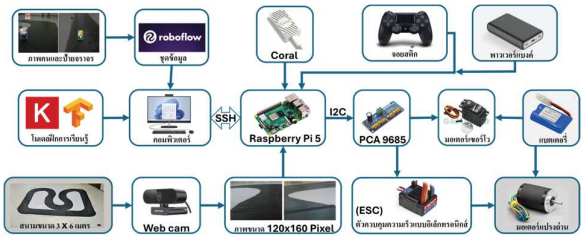
กระบวนการออกแบบและการสร้างแบบจำลอง (Simulation) เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการวิจัยสามารถดำเนินการได้ตาม รูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการวิจัย

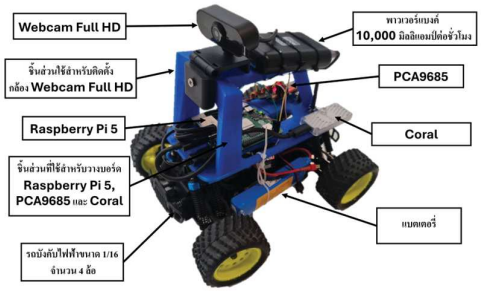
เมื่อศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยมีองค์ความรู้เพียงพอที่จะสามารถออกแบบการสร้างแบบจำลองได้แล้วนั้น ทางผู้วิจัยจึง

ออกแบบเครื่องมือ โดยแยกส่วนสำคัญเป็น 2 ส่วนได้แก่ เครื่องมือที่เป็นฮาร์ดแวร์ และเครื่องมือทางซอฟต์แวร์ และสรุปภาพรวมได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 การออกแบบของแบบจำลองการขับเคลื่อนอัตโนมัติ

เมื่อผู้วิจัยออกแบบโครงสร้างแล้วเสร็จ จะมีส่วนประกอบที่สำคัญอีก 3 ส่วน ได้แก่ แบบจำลองรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ แบบจำลองสนาม และแบบจำลองสิ่งกีดขวางหรือป้ายจราจร



รูปที่ 4 โครงสร้างแบบจำลองรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ

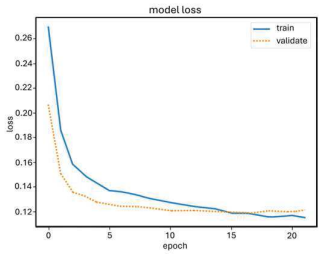
จากรูปที่ 4 เป็นรูปการประกอบแบบจำลองรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ จากการออกแบบ และอธิบายตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์กับโครงสร้างของรถบังคับ

4. ผลการวิจัย

จากกระบวนการในขั้นตอนของการออกแบบและสร้างแบบจำลองนั้นมีผลของการวิจัยที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

4.1 ผลจากการฝึกการเรียนรู้ (Result Training)

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองจะต้องฝึกการเรียนรู้ให้อัลกอริทึม Linear regression เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนได้อัตโนมัติ ผลของการฝึกตาม รูปที่ 5 โดยมีค่าความผิดพลาดของอัลกอริทึม [8] (Mean Square Error : MSE) 0.137 ใช้เวลาในการฝึกการเรียนรู้ 52 นาที และรอบฝึกการเรียนรู้จำนวน 20 epoch



รูปที่ 5 ผลของการฝึกอัลกอริทึม Linear regression

ส่วนของการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และทำตามเงื่อนไขของป้ายจราจรเมื่อทำการเตรียมชุดข้อมูล (Dataset) และทำการฝึกการเรียนรู้ในระบบปฏิบัติการ Linux มีค่าความผิดพลาด (MSE) 0.4544 มีรอบฝึกการเรียนรู้จำนวน 50 epoch และใช้ระยะเวลาในการฝึกการเรียนรู้ 65 นาที

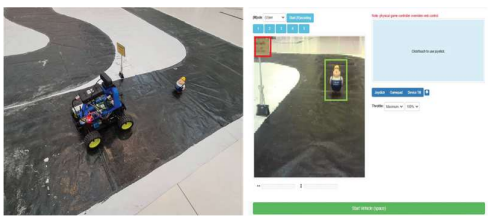
4.2 ผลจากการทดสอบ (Result Test)

ผู้วิจัยกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ โดยสนามที่จำลองขึ้นมามีขนาดความกว้าง 3 เมตร ความยาว 6 เมตร มีเส้นทางตรง และทางโค้งสำหรับจำลองเส้นทางขับเคลื่อนบนถนนจริง โดยผู้วิจัยกำหนดให้มีป้ายจราจร และมนุษย์จำลองตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 สนามจำลองขนาด 3x6 เมตร พร้อมป้ายจราจรและสิ่งกีดขวาง

จากนั้นนำแบบจำลองทดสอบขับเคลื่อนในสนามที่มีตัวแปรที่กำหนด โดยแบบจำลองจะต้องหยุด หากตรวจสอบพบมนุษย์จำลอง และแบบจำลองจะต้องชะลอความเร็วลง ร้อยละ 30 ของความเร็วเดิม เมื่อเจอป้ายจราจรทั้ง 3 แบบ ที่กำหนดไว้ตามรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบบนสนามและภาพจาก Webcam

จากรูปที่ 7 แบบจำลองตรวจพบมนุษย์จำลอง และป้ายเขตชุมชน ซึ่งแบบจำลองชะลอความเร็วลงตามที่กำหนด และหยุดการเคลื่อนที่ก่อนจะชนมนุษย์จำลอง ซึ่งการทดสอบแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ คือกำหนดแบบจำลองขับเคลื่อนในสนามจำลองโดยอัตโนมัติจำนวน 4 ครั้ง ซึ่งจะมีตัวแปรเป็นป้ายจราจรต่างๆ โดยจะเปลี่ยนและเพิ่มป้ายจราจรตามตารางที่ 1 การทดสอบแต่ละครั้งจะให้แบบจำลองขับเคลื่อนจำนวน 5 รอบ ต่อครั้ง

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (Object detection)

ครั้งที่	ป้ายจราจร			ชนวัตถุหรือไม่	จำนวนครั้งที่ชน	หมายเหตุ
	ป้ายเขต	ทางม้าลาย	ผล			
1	✓	-	-	✓	1	ไม่ชะลอความเร็วป้ายลูกระนาด 1 ครั้ง
2	-	✓	-	✓	2	ไม่ชะลอความเร็วป้ายเขตชุมชน 2 ครั้ง
3	-	-	✓	✓	0	ทำงานได้ตามเงื่อนไขทั้งหมด
4	✓	✓	✓	✓	1	ไม่ชะลอความเร็วป้ายเขตชุมชน 1 ครั้ง

5.สรุปผล

จากการออกแบบและสร้างแบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัย คือ ได้แบบจำลองยานยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งสามารถขับเคลื่อนบนสนามจำลอง ที่มีป้ายจราจร และมนุษย์จำลอง โดยฝึกการเรียนรู้ให้สามารถขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วย Linear regression ซึ่งใช้เวลาในการฝึก 52 นาที จำนวน 20 epoch มีค่าความผิดพลาดของอัลกอริทึม (MSE) 0.137 และนำไปฝึกการเรียนรู้อีกครั้งเพื่อต้องการตรวจจับวัตถุ ใช้เวลา 65 นาที จำนวนรอบ 50 epoch มีค่าความผิดพลาด (MSE) 0.4544

หลังจากนั้นทำการทดสอบการขับเคลื่อนในสนามจำลอง โดยกำหนดการทดสอบเป็น 4 ครั้ง ครั้งละ 5 รอบ ผลที่ได้คือ แบบจำลองสามารถขับเคลื่อนโดยไม่มีความผิดพลาดเลยในการทดสอบครั้งที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยได้ตรวจสอบพบว่า ครั้งที่ 3 เป็นป้ายลดความเร็ว และเมื่อแบบจำลองเคลื่อนที่ผ่าน มีร้อยละความถูกต้องของภาพอยู่ที่ ร้อยละ 80 ซึ่งมีค่าสูงกว่าป้ายจราจรอื่น เนื่องจากป้ายลดความเร็วมีขนาดใหญ่ที่สุด มีรายละเอียดน้อย และมีสีส้มซึ่งเป็นป้ายที่มีความโดดเด่นกว่าป้ายอื่นๆ ผู้วิจัยได้พบกับข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ความเร็วในการประมวลผลของบอร์ด ความสว่างของพื้นที่ทดลอง มุมกล้องของเว็บแคม ความละเอียดของภาพในการนำมาฝึกการเรียนรู้ ขนาดความกว้างของสนาม รายละเอียดของป้าย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของอุปกรณ์ สภาพแวดล้อมในการทดสอบ

จากผลลัพธ์ที่ได้ รวมกับข้อจำกัดข้างต้น หากเปลี่ยนอุปกรณ์จะสามารถเปลี่ยนความละเอียดของภาพในการนำมาฝึกการเรียนรู้ อาจทำให้ขับเคลื่อนอัตโนมัติได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Hindoriya and P. Talele, "Self-Driving Car," 2024 First International Conference on Technological Innovations and Advance Computing (TIACOMP), Bali, Indonesia, 2024, pp. 314-319.

[2] H. Washizaki and N. Yoshioka, "AI Security Continuum: Concept and Challenges," 2024 IEEE/ACM 3rd International Conference on AI Engineering – Software Engineering for AI (CAIN), Lisbon, Portugal, 2024, pp. 269-270.

[3] A. Cuzzocrea, "Big Data Lakes: Models, Frameworks, and Techniques," 2021 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp), Jeju Island, Korea (South), 2021, pp. 1-4.

[4] ธีรนันท์ สุวรรณชวลิต, “ปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับเทคโนโลยียานยนต์ไร้คนขับในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2565.

[5] Y. -H. V. Chiang, Y. -R. Lin and N. -S. Chen, "Using deep learning models to predict student performance in introductory computer programming courses," 2022 International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), Bucharest, Romania, 2022, pp. 180-182.

[6] B. Wang and W. Zhang, "Research on Edge Network Topology Optimization Based on Machine Learning," 2023 5th International Conference on Applied Machine Learning (ICAML), Dalian, China, 2023, pp. 41-46.

[7] Q. Wan and S. Zhang, "Online Teaching System of Advertising Art Design Course Based on Redux with Secure Shell Framework," 2024 International Conference on Integrated Intelligence and Communication Systems (ICIICS), Kalaburagi, India, 2024, pp. 1-5.

[8] เธียรธร จุฬานุตรกุล และอังศุมาลิน เสนจันทร์ติไชย, “การศึกษาผลของปัจจัยภูมิภาคและเพศต่อการพยากรณ์อัตรามรณะของประชากรไทย,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2561.



นายกฤตินันท์ เพ็ชรศรี
ค.อ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า มจพ.
วศ.ม. (เทคโนโลยีไฟฟ้าประยุกต์) มจพ.
สาขางานวิจัยที่สนใจระบบอัตโนมัติและการเรียนรู้เชิงลึก



ดร. กรวิทย์ กระจ่างพันธ์
อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสชนิดคาปาซิเตอร์รัน

Investigation of Capacitor Variation Effects on Efficiency Of Single-Phase Permanent Split Capacitor (PSC) Motors

วรรณวินิต วิจิตรเตมีย์ และ บุญยัง ปลั่งกลาง*

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

E-mail: wanwinit_w@mail.rmutt.ac.th and boonyang.p@en.rmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสแบบสปลิตคาปาซิเตอร์มีบทบาทสำคัญในเครื่องใช้ในครัวเรือน ประสิทธิภาพของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น มุมเฟสระหว่างกระแสไฟฟ้าในขดลวดหลักและขดลวดช่วย การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลของมุมเฟสที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์โดยการปรับค่าคาปาซิเตอร์อย่างเป็นระบบ และวัดผลที่เกิดขึ้นผ่านอุปกรณ์วัดค่า เช่น Clamp Meter, Power Analyzer และ Torque Sensor

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านค่ากระแสไฟฟ้า แรงบิด และประสิทธิภาพโดยรวม โดยมีแนวโน้มของประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสม งานวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดในงานออกแบบหรือปรับปรุงประสิทธิภาพของมอเตอร์ในอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิผล

คำสำคัญ: มุมต่างเฟส, ประสิทธิภาพมอเตอร์, มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสคาปาซิเตอร์รัน

Abstract

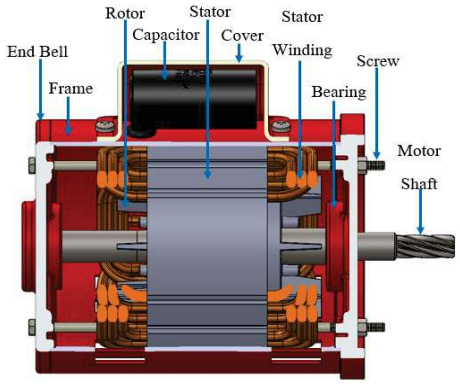
The single-phase split capacitor induction motor plays a significant role in household appliances. Its efficiency depends on several factors, such as the phase angle between the currents in the main and auxiliary windings. This study focuses on analyzing the effect of optimal phase angle on motor efficiency by systematically adjusting the capacitor value. The outcomes were measured using instruments such as a clamp meter, power analyzer, and torque sensor.

The experimental results indicate that selecting an appropriate capacitor value can significantly enhance motor efficiency, including improvements in current, torque, and overall performance. The findings provide a practical foundation for further development or optimization of motors in industrial applications.

Keywords: Phase Angle Difference, Motor Efficiency, Permanent Split Capacitor (PSC) Motor

1. บทนำ

มอเตอร์ที่มีขานำเฟสเดียว (ตามรูปที่ 1) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้งานแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน แม้โครงสร้างจะเรียบง่าย แต่ประสิทธิภาพยังขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น การจับคู่ค่าพารามิเตอร์ การออกแบบโครงสร้าง และการเลือกชนิดของมอเตอร์ โดยเฉพาะ Series Motor ที่มีประสิทธิภาพสูง [1] นิยมใช้งานกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยต่ำ เนื่องจากตอบสนองรวดเร็วและขนาดเล็กการออกแบบและวิเคราะห์สมรรถนะของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส [2] แสดงให้เห็นว่าการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงการปรับแต่งโครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์ ซึ่งมีผลต่อรอบการขับเคลื่อนและพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ [3]



รูปที่ 1 มอเตอร์เหนี่ยวนำหนึ่งเฟสคาปาซิเตอร์รัน

2. การออกแบบและพัฒนา

งานวิจัยนี้มุ่งออกแบบและทดลองหามุมเฟสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับมอเตอร์เฟสเดียวที่ใช้ในระบบ HVAC และปั๊มน้ำ โดยวิเคราะห์ผลต่อประสิทธิภาพและพลังงานที่ใช้ พร้อมทดสอบกับมอเตอร์ที่ใช้จริงและวงจรไฟฟ้าการต่อใช้งานโดยมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองจะมีขนาดพารามิเตอร์เฟสตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

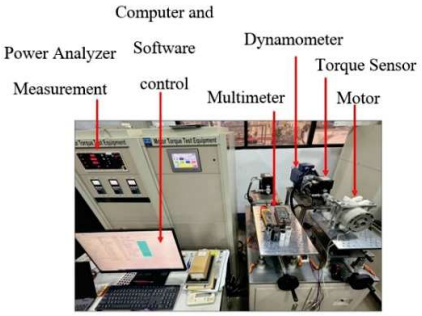
รายการ	พารามิเตอร์	
จำนวนขั้วขดลวด	6 โพล	2 โพล
กำลังไฟฟ้า	560 วัตต์	1500 วัตต์
ความเร็วรอบ	900 รอบต่อนาที	2900 รอบต่อนาที
พิกัดแรงดัน / ความถี่	220 โวลท์ / 50 เฮิร์ท	
คาปาซิเตอร์	20 ไมโครฟารัด	50 ไมโครฟารัด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สเตเตอร์ / โรเตอร์	140 / 84 มม.	160 / 100 มม.
ความหนาก้อนสเตเตอร์	90 มม.	90 มม.
เกรดเหล็กซิลิกอน	50A1300	50A1300

3. วิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวพร้อมตัวเก็บประจุประกอบด้วย Capacitor, Power Analyzer, Torque Sensor, Tachometer และ Load จำลอง

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

- ติดตั้งมอเตอร์บนเครื่องทดสอบไดนาโมและเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าทีละค่าตามรูปที่ 2
- เปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์และบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I_m), (I_a) และ (I_{total})
- เปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์และบันทึกค่ากระแสไฟฟ้า (I_m), (I_a) และ (I_{total})



รูปที่ 2 Dynamo Machine

- วัดและบันทึกค่าพลังงานที่ใช้ กำลังขับ แรงบิด และความเร็วรอบของมอเตอร์ในแต่ละค่าคาปาซิเตอร์
- คำนวณค่ามุมต่างเฟสจากค่ากระแสไฟฟ้า (I_m), (I_a) และ (I_{total})
- วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อตรวจสอบค่ามุมเฟสที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์

3.3 คำนวณมุมต่างเฟส

การคำนวณมุมต่างเฟส $(\emptyset_{diff})$ โดยใช้ค่ากระแสของขดลวดหลัก, ขดลวดสตาร์ท, และกระแสรวมของมอเตอร์ กำหนดให้ค่ากระแสเป็นดังนี้:

I_m = กระแสขดลวดหลัก

I_a = กระแสขดลวดสตาร์ท

I_{total} = กระแสรวมของมอเตอร์

คำนวณโดยใช้กฎของโคไซน์:

$$\cos(\emptyset_{diff}) = \frac{I_m^2 + I_a^2 - I_{total}^2}{2I_m * I_a} \quad (1)$$

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

- นำค่าที่วัดได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสกับประสิทธิภาพของมอเตอร์

4. ผลการทดสอบ

จากตารางที่ 2 และ 3 สามารถนำค่ากระแสไฟรวม กระแสขดลวดหลัก และกระแสขดลวดช่วยมาคำนวณมุมเฟสตามสมการที่ 1 เพื่อใช้วิเคราะห์แนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพมอเตอร์และผลทดสอบในรูปกราฟที่ 3 และ 4

ตารางที่ 2 ผลทดสอบมอเตอร์ 6 โพล โหลด 560 วัตต์ 220 โวลท์ 50 เฮิร์ท

Capacitor (Mfd)	Current (A) I_t	I_m	I_a	Speed (rpm)	Tq. (Nm.)	Eff. (%)	PF. (%)	Phase angle (Deg.)
10.1	5.61	5.67	0.83	872	6.14	55.7	81.8	81.7
15.1	4.59	4.58	1.36	900	5.97	64.7	86.3	81.9
17.2	4.29	4.23	1.6	913	5.87	67.5	88.2	81.3
19.3	4.09	3.96	1.83	918	5.86	69.2	90.5	80.9
20.4	3.99	3.82	1.96	920	5.83	69.7	91.8	80.3
21.4	3.89	3.68	2.09	925	5.8	70.8	92.7	79.6
22.3	3.83	3.57	2.2	927	5.77	71.2	93.6	79.3
23.2	3.78	3.46	2.31	927	5.77	71.2	94.7	79.1
24.5	3.74	3.32	2.48	928	5.79	71.3	95.9	78.8
25.0	3.72	3.27	2.54	929	5.77	71.2	96.3	78.5
30.3	3.72	2.75	3.25	936	5.73	69.5	98.7	76.1

4.1 ผลของค่าคาปาซิเตอร์ต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 6 โพล

- ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อค่าคาปาซิเตอร์อยู่ที่ 22-25 µF
- ค่าที่เหมาะสมที่สุดให้ประสิทธิภาพ ~71%-72%

4.2 ผลของความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 6 โพล

- ทำงานที่ รอบต่ำกว่า (~860-940 RPM)
- ประสิทธิภาพสูงสุดที่รอบ 920-930 RPM

4.3 ผลของค่าคาปาซิเตอร์ต่อมุมเฟสมอเตอร์ 6 โพล

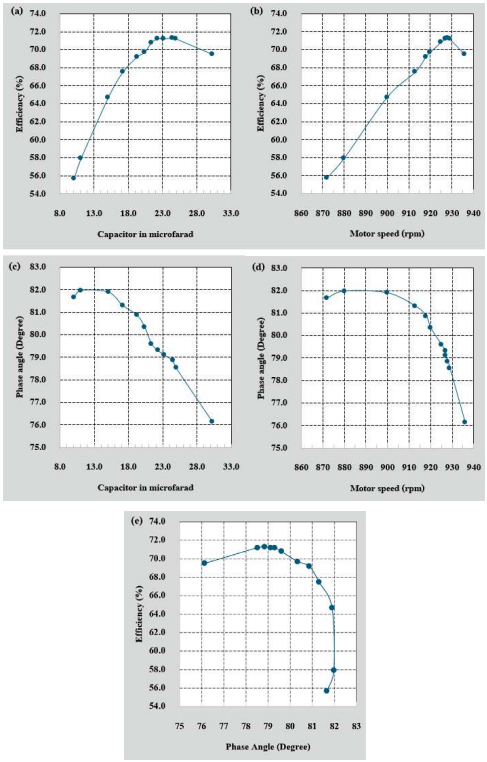
- มุมเฟสเริ่มต้นที่ ~82° และลดลงเมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้น
- ที่ค่าคาปาซิเตอร์ ~28-30 µF มุมเฟสลดลงเหลือ ~76°

4.4 ผลของความเร็วรอบต่อมุมเฟสมอเตอร์ 6 โพล

- ที่รอบต่ำ (~860 RPM) มุมเฟสเริ่ม ~82°
- เมื่อรอบเพิ่มขึ้น มุมเฟสลดลงเหลือ ~76° ที่ ~940 RPM

4.5 ผลของค่ามุมเฟสต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 6 โพล

- มุมเฟสที่เหมาะสม (~78.5–79.5°) ให้ประสิทธิภาพสูงสุด
- เมื่อมุมเฟสสูงเกิน ~82° หรือ ต่ำกว่า ~78° ⟶ ประสิทธิภาพลดลง



รูปที่ 3 กราฟมอเตอร์ 6 โพล

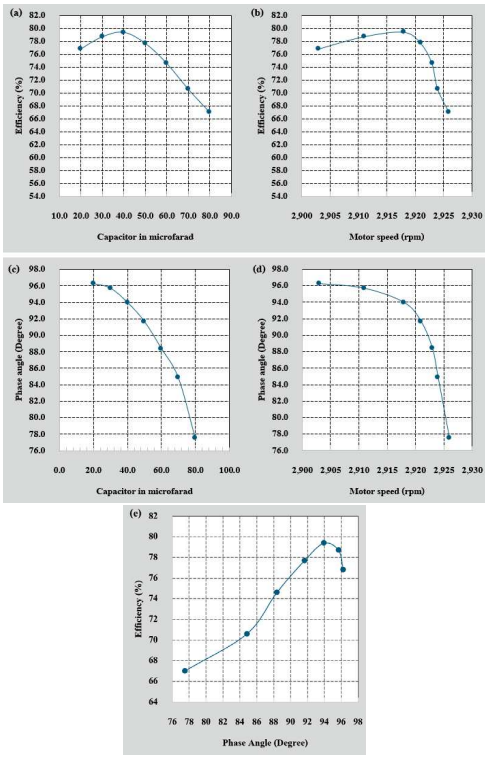
(a) Capacitor vs Efficiency, (b) Motor speed vs Efficiency

(c) Capacitor vs Phase angle, (d) Motor speed vs Phase angle

(d) Phase Angle vs Efficiency

ตารางที่ 3 ผลทดสอบมอเตอร์ 2 โพล โหลด 1500 วัตต์ 220 โวลท์ 50 เฮิร์ท

Capacitor (Mfd)	Current (A) I_t	I_m	I_a	Speed (rpm)	Tq. (Nm.)	Eff. (%)	PF. (%)	Phase angle (Deg.)
80	10.54	4.02	10.65	2926	4.91	67.0	97	77.5
70	9.87	4.79	9.07	2924	4.91	70.6	98.2	84.9
60	9.34	5.55	7.67	2923	4.91	74.6	98.2	88.4
50	9.12	6.52	6.19	2921	4.92	77.7	96.7	91.7
40	9.24	7.63	4.71	2918	4.91	79.4	92.9	94.0
20	9.9	8.98	3.37	2911	4.93	78.7	87.7	95.7



รูปที่ 4 กราฟมอเตอร์ 2 โพล

(a) Capacitor vs Efficiency, (b) Motor speed vs Efficiency

(e) Capacitor vs Phase angle, (d) Motor speed vs Phase angle

(f) Phase Angle vs Efficiency

4.6 ผลของค่าคาปาซิเตอร์ต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 2 โพล

- ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจนถึงค่าคาปาซิเตอร์ 30-40 µF แล้วเริ่มลดลง
- จุดประสิทธิภาพสูงสุดสูงกว่ามอเตอร์ 6 ขั้ว (~79%-80%)
- หากใช้คาปาซิเตอร์สูงเกิน 80 µF ประสิทธิภาพลดลงชัดเจน

4.7 ผลของความเร็วรอบต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 2 โพล
- ทำงานที่รอบสูง (~2,900-2,930 RPM)
- ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2,910-2,920 RPM

4.8 ผลของค่าคาปาซิเตอร์ต่อมุมเฟสมอเตอร์ 2 โพล
- มุมเฟสเริ่มต้นสูงกว่ามอเตอร์ 6 ขั้ว อยู่ที่ ~98°
- ค่าคาปาซิเตอร์สูงสุด (~80 µF) ทำให้มุมเฟสต่ำสุด

4.9 ผลของความเร็วรอบต่อมุมเฟสมอเตอร์ 2 โพล
- รอบต่ำ (~2,900 RPM) มุมเฟสเริ่มสูง
- รอบสูง (~2,930 RPM) มุมเฟสลดลงเหลือ ~78°

4.10 ผลของค่ามุมเฟสต่อประสิทธิภาพมอเตอร์ 2 โพล
- มุมเฟสที่เหมาะสมอยู่ช่วง ~89–94° ให้ประสิทธิภาพสูง
- หากต่ำกว่า ~89° หรือสูงเกิน ~96° ประสิทธิภาพจะลดลง

4. สรุป

ตารางที่ 5 ผลของค่าคาปาซิเตอร์ต่อมุมเฟสและประสิทธิภาพ

คุณสมบัติ	มอเตอร์ 6 โพล (HVAC, 560W)	มอเตอร์ 2 โพล (Pump, 1500W)
แนวโน้มมุมเฟสเมื่อเพิ่มคาปาซิเตอร์	เพิ่มค่าคาปาซิเตอร์จาก (8 µF ⟶ 28 µF) ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (~55% ⟶ 72%) มุมเฟสลดลง (~82° ⟶ 76°)	เพิ่มค่าคาปาซิเตอร์จาก (10 µF ⟶ 80 µF) ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น (~68% ⟶ 80%) มุมเฟสลดลง (~98° ⟶ 76°)
ค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสม	~22-25 µF ประสิทธิภาพสูงสุด (~72%)	~30-40 µF ประสิทธิภาพสูงสุด (~80%)
แนวโน้มหากเพิ่มคาปาซิเตอร์เกิน	เกิน 28 µF ประสิทธิภาพลดลง	เกิน 60-80 µF ประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว
ความเร็วรอบใช้งาน (RPM)	860 - 940	2,900 - 2,930
ลักษณะการใช้งาน	HVAC (เครื่องปรับอากาศ, ระบบระบายอากาศ)	ปั๊มน้ำ (โหลดที่ต้องการความเร็วสูง)

5. การนำไปใช้ประโยชน์

การศึกษาพฤติกรรมของ มุมเฟส (Phase Angle) ประสิทธิภาพ (Efficiency) ค่าแรงบิด (Torque) และกระแสไฟฟ้า (Current) ของ Permanent Split Capacitor (PSC) Motor ทั้งแบบ 6 Poles (HVAC) และ 2 Poles (Pump) มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนามอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งสามารถสร้าง contribution ทางวิชาการและอุตสาหกรรม เช่น การสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสและประสิทธิภาพมอเตอร์ การพัฒนาโมเดลทางทฤษฎีเพื่อวิเคราะห์มอเตอร์เฟสเดียว การปรับปรุงการออกแบบมอเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และการออกแบบมอเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] J. d'Amour Ntawiheba, L. Qiao, and J. De Dieu Niyonteze, "Design and performance analysis of a high-efficiency Y3 induction motor," in Journal of Physics: Conference Series, vol. 2345, 2022, pp. 012010, doi: 10.1088/1742-6596/2345/1/012010.

[2] A. G. Yetgin, A. I. Canakoglu, K. N. Bekiroglu, and S. Zorlu, " Optimum Design and Performance Analysis of Three- Phase Induction Motor," in ELMA 2005 - 4th International Conference on Electrical Machines and Drives, Sofia, Bulgaria, 15-16 Sept. 2005, doi: 10.13140/RG.2.2.32162.46400.

[3] F. Mahmouditabar and N. J. Baker, " Design Optimization of Induction Motors with Different Stator Slot Rotor Bar Combinations Considering Drive Cycle," Energies, vol. 17, no. 154, pp. 1-26, 2024. doi: 10.3390/en17010154.



นายวรรณวินิต วิจิตรเตมีย์ ได้รับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมออกแบบระบบอุตสาหกรรม จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และปริญญาตรี สาขาวิชาไฟฟ้ากำลังจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม ปัจจุบันกำลังอยู่ระหว่างการศึกษาปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี งานวิจัยที่สนใจคือการออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานในมอเตอร์ไฟฟ้า



Boonyang Plangklang: He received Dr.-Ing. in Electrical Engineering from University of Kassel, Germany in 2005. He is currently working at Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand. His main research interests are including applications of renewable energy and power system.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบเย็นแช่ผักด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกและแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่

Development of a Thermoelectric Vegetable Cooling System with Mobile Solar Panels

ขจรศักดิ์ สีเมฆ[1*] บุญธง วสุริย์[2] และ พรชัย กิจเจริญ[2]
[1*] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
E-mail: khachonsak@npru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบทำความเย็นสำหรับแช่ผักสดโดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับแผงสุริยะเคลื่อนที่ได้ เพื่อลดการใช้แรงงานและพลังงานในกระบวนการเก็บรักษา ระบบต้นแบบถูกออกแบบและทดสอบกับผักสามชนิด ได้แก่ ผักกาดหอม กะหล่ำปี และคะน้า ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดอุณหภูมิและคงความสดของผักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: เครื่องให้ความเย็น, เทอร์โมอิเล็กทริก, แผงสุริยะ

Abstract

This research developed a thermoelectric cooling system integrated with a movable solar panel to enhance energy efficiency and reduce labor in fresh vegetable storage. The prototype was designed and tested with lettuce, cabbage, and kale. Experimental results demonstrated the system's effectiveness in lowering temperature and preserving vegetable freshness.

Keywords: Coolers, Thermoelectric, Solar Panels

1. บทนำ

การรักษาคุณภาพและความสดของผักสดเป็นความท้าทายสำคัญที่ผู้ผลิตและผู้จัดจำหน่ายต้องเผชิญ โดยเฉพาะในสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย เทคนิคการเก็บรักษาที่มีประสิทธิภาพช่วยลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวและเพิ่มความคุ้มค่าในห่วงโซ่อุปทาน งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาเครื่องทำความเย็นแช่ผักสดโดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับแผงสุริยะเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นนวัตกรรมที่สนับสนุนการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

อุณหภูมิและความชื้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของผัก ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดอุณหภูมิได้โดยไม่ใช้สารทำความเย็นที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม พร้อมใช้พลังงานหมุนเวียนจากแผงสุริยะ ผลการทดสอบเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิและชะลอการเสื่อมสภาพของผักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาและทดสอบต้นแบบระบบทำความเย็นที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับแผงสุริยะ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและรักษาคุณภาพของผักสดอย่างยั่งยืน

2. ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Technology) เป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (Thermoelectric Generator: TEG) หรือใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อสร้างความเย็นและความร้อน (Thermoelectric Cooler: TEC) โดยอาศัย ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และ เพลเทียร์ (Peltier Effect) โดยจุดเด่นของเทคโนโลยีนี้คือ ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว (Solid-state) ทำให้ เสถียร ทนทาน เสียงเงียบ และไม่ต้องใช้ สารทำความเย็น (Refrigerant) ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งแตกต่างจากระบบทำความเย็นแบบคอมเพรสเซอร์ทั่วไป [1] ระบบเทอร์โมอิเล็กทริกยังมีโครงสร้างเรียบง่าย ช่วยลดต้นทุนการผลิตและค่าบำรุงรักษา ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ โมดูล TEC1-12706 ซึ่งเป็นรุ่นที่นิยมสำหรับระบบทำความเย็นขนาดเล็ก มีขนาด 40 × 40 × 3.6 มม. แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม 12V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 6A และความต้านทานภายใน 1.98 Ω ±10% ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นได้ดีซึ่งเหมาะสำหรับระบบทำความเย็นขนาดเล็ก

2.2 การใช้พลังงานจากแผงสุริยะ

แผงสุริยะเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้ แผงสุริยะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานหลักในการขับเคลื่อนระบบเทอร์โมอิเล็กทริก ทำให้ระบบสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาโครงข่ายไฟฟ้า ลดต้นทุนพลังงาน และเพิ่มศักยภาพในการใช้งานในพื้นที่ที่ขาดแคลนพลังงาน การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับระบบเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถคำนวณได้จากสมการ [2-3]

$$P_{TEG} = \alpha \Delta T I \quad (1)$$

เมื่อ P_{TEG} คือ พลังงานที่ได้จาก TEG (Watt)
α คือ ค่าสัมประสิทธิ์เทอร์โมอิเล็กทริก (V/K) ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการแปลงความร้อนเป็นไฟฟ้า
ΔT คือ ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างจุดร้อนและจุดเย็น(K)
I คือ กระแสไฟฟ้าที่สร้างจาก TEG (A)

การคำนวณความสามารถในการทำความเย็นของ Thermoelectric Cooler (TEC) หรือเครื่องทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกนั้น สามารถคำนวณพลังงานที่ TEC สามารถดูดซับจากด้านเย็นได้โดยใช้สมการ[1-3]

$$Q_c = aIT_c - \frac{1}{2}I^2R - K(T_h - T_c) \quad (2)$$

เมื่อ Q_c คือ พลังงานที่ดูดซับจากด้านเย็น
a คือ สัมประสิทธิ์ซีเบก มีค่า 0.045 V/k
I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
T_c คือ อุณหภูมิด้านเย็น (ºC)
T_h คือ อุณหภูมิด้านร้อน (ºC)
R คือ ความต้านทานภายในมีค่า 2 Ω
K คือ ค่าการนำความร้อนระหว่างด้านร้อนและเย็นมีค่า 1 W/K

สำหรับการทำความเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในระบบ Thermoelectric Cooler (TEC) ควรให้ ค่า T_c (อุณหภูมิที่ด้านเย็น) ต่ำที่สุดเพื่อให้สามารถดูดซับความร้อนได้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นของ TEC ดีขึ้น

ค่า Coefficient of Performance (COP) หรือ ค่าประสิทธิภาพของ Peltier ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการทำความเย็น โดยมีสมการคือ

$$COP = \frac{Q_C}{P} \quad (3)$$

โดยทั่วไป COP ของ TEC1-12706 อยู่ที่ประมาณ 0.3-0.6 เท่านั้น ซึ่งต่ำกว่าเครื่องทำความเย็นแบบคอมเพรสเซอร์มาก

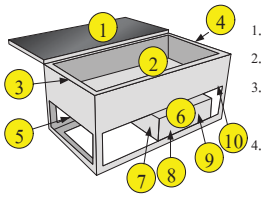
2.3 ประสิทธิภาพและการใช้งาน

การศึกษาในอดีตแสดงให้เห็นว่าระบบเทอร์โมอิเล็กทริกมีศักยภาพในการรักษาอุณหภูมิอย่างแม่นยำและสม่ำเสมอในช่วงที่กว้าง เหมาะสำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ เช่น การเก็บรักษาอาหารและยา ทั้งยังเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและใช้พลังงานต่ำกว่าระบบทำความเย็นแบบดั้งเดิม [4] ในงานวิจัยนี้มุ่งประเมินประสิทธิภาพของต้นแบบเครื่องทำความเย็นสำหรับผักโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับแผงสุริยะแบบเคลื่อนที่ได้ การทดลองดำเนินการกับผัก 3 ชนิด ได้แก่ ผักกาดหอม กะหล่ำปลี และคะน้า โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นภายในเครื่องทำความเย็นกับสภาพแวดล้อมภายนอก เพื่อประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบ การวิเคราะห์ผลใช้สถิติค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณที่แม่นยำ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

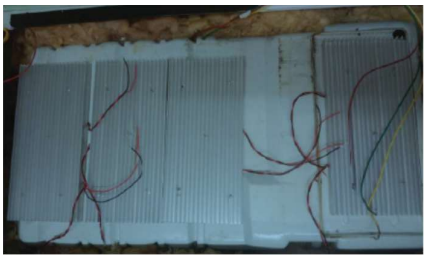
3.1 การออกแบบและพัฒนาระบบ

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบทำความเย็นสำหรับแช่ผักสดด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก โดยใช้พลังงานจากแผงสุริยะเป็นแหล่งจ่ายไฟหลัก เพื่อลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ทำให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึง ระบบนี้ออกแบบให้สามารถจ่ายไฟจากแผงสุริยะที่ผ่าน Solar Charge Controller เข้าสู่เทอร์โมอิเล็กทริก (TEC) โดยตรงในช่วงกลางวันที่มีแสงแดดเพียงพอ และสลับมาใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12V ที่ติดตั้งไว้ในช่วงกลางคืนหรือช่วงที่แสงอ่อน เช่น ตอนเช้าหรือเย็น เพื่อให้ระบบทำความเย็นทำงานได้ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง การผสานการทำงานระหว่างแผงสุริยะและแบตเตอรี่ขนาด 12V ในลักษณะนี้ ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพ รองรับการใช้งานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนโดยไม่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

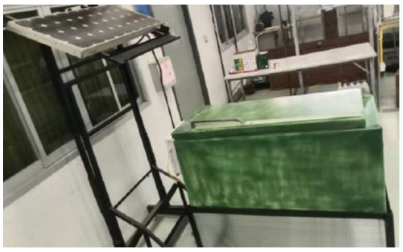


1. แผงสุริยะ
2. พื้นที่แช่ผักสด
3. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (1)
4. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น (2)
5. ครีบอะลูมิเนียม
6. ตู้ควบคุม
7. แบตเตอรี่
8. Solar charge controller
9. พัดลม
10. TEC1-12706

รูปที่ 1 ส่วนประกอบต้นแบบเครื่องให้ความเย็นผักด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

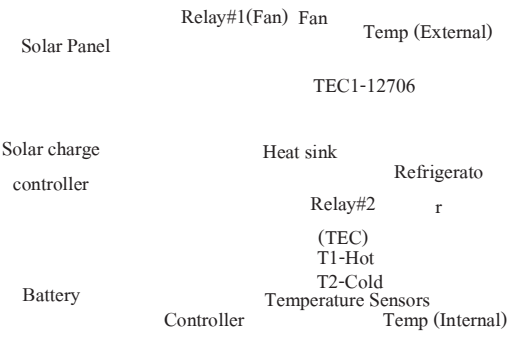


รูปที่ 2 ระบบควบคุมความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก



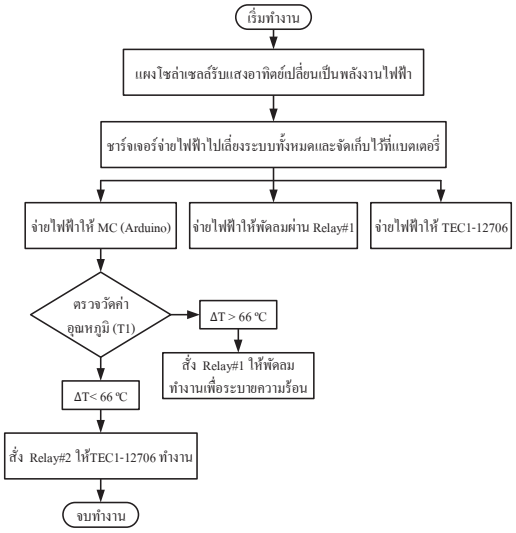
รูปที่ 3 เครื่องต้นแบบเครื่องให้ความเย็นผักด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

วัสดุที่ใช้ในการสร้างตัวเครื่องและระบบความเย็นได้ถูกเลือกเพื่อให้ทนทานต่อสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โครงสร้างหลักใช้เหล็กทนสนิมหรือพลาสติกเสริมแรงที่แข็งแรงสูงเพื่อความคงทนและป้องกันการกัดกร่อน



รูปที่ 4 วงจรการทำงานของระบบควบคุมความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

การจัดวางส่วนประกอบภายในออกแบบให้รองรับการทำงานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริกและง่ายในการบำรุงรักษา แผงสุริยะติดตั้งบนส่วนบนสุดของเครื่องเพื่อรับแสงอาทิตย์สูงสุด พร้อมระบบระบายความร้อนเสริมประสิทธิภาพการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4

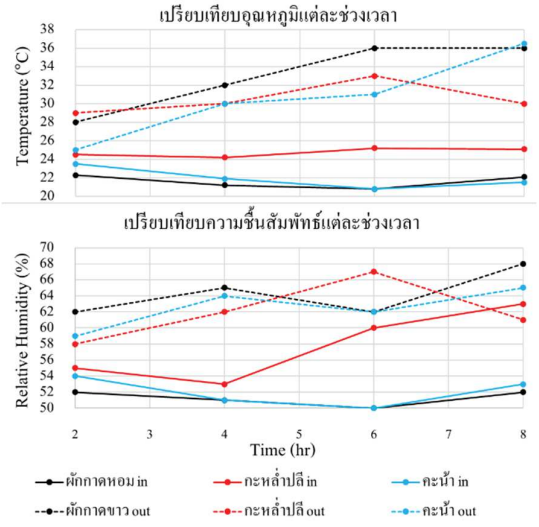


รูปที่ 5 ผังการทำงานของเครื่องให้ความเย็นผักด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก

หลังจากสร้างต้นแบบเครื่องทำความเย็นแช่ผักสด การทดสอบจะดำเนินการเพื่อประเมินประสิทธิภาพ โดยวัดอุณหภูมิภายในเครื่อง ระยะเวลาการคงความเย็น และประสิทธิภาพของเทอร์โมอิเล็กทริกภายใต้ความเข้มแสงที่แตกต่างกัน.

4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบต้นแบบเพื่อหาประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของระบบเย็นแช่ผัก

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นของระบบเย็นแช่ผักด้วยเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก

Time (hr)	ผักกาดหอม		กะหล่ำปลี		คะน้า	
	T (°C) in / out	RH (%) in / out	T (°C) in / out	RH (%) in / out	T (°C) in / out	RH (%) in / out
2	22.3 / 28	52 / 62	24.5 / 29	55 / 58	23.5 / 25	54 / 59
4	21.2 / 32	51 / 65	24.1 / 30	53 / 62	21.9 / 30	51 / 64
6	20.8 / 36	50 / 62	25.2 / 33	60 / 67	20.8 / 31	50 / 62
8	22.1 / 36	52 / 68	25.1 / 30	63 / 61	21.5 / 32	53 / 65

ประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิ

ผลการทดสอบแสดงว่าเครื่องสามารถลดอุณหภูมิภายในจาก 30°C เหลือ 5°C ภายใน 30 นาที และรักษาระดับอุณหภูมิคงที่ตลอด 8 ชั่วโมง

ความสามารถในการรักษาความสดของผัก

ผักกาดหอม กะหล่ำปี และคะน้าที่เก็บรักษาภายในเครื่องยังคงความสดและสีสันเหมือนขณะเก็บเกี่ยว ไม่มีอาการเหี่ยวหรือเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการเก็บรักษา

การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของแผงสุริยะ

แผงสุริยะผลิตพลังงานได้เพียงพอตลอด 8 ชั่วโมงของการทดสอบ โดยไม่มีการหยุดชะงักของพลังงานไฟฟ้า แสดงถึงความสามารถในการทำงานโดยไม่ต้องเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าหลัก.

5. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ได้พัฒนาเครื่องให้ความเย็นแช่ผักสดโดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกควบคู่กับแผงสุริยะเคลื่อนที่ได้ ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิผลและสามารถรักษาความสดของผักได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้พลังงานจากแผงสุริยะได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก ซึ่งสนับสนุนการใช้พลังงานหมุนเวียนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

5.1 อภิปรายผล

การวิจัยนี้พัฒนาเครื่องทำความเย็นแช่ผักสดโดยใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกและแผงสุริยะเคลื่อนที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิและคงความสดของผักได้อย่างมีประสิทธิผล ผลการทดลองยืนยันว่าระบบสามารถใช้พลังงานจากแผงสุริยะได้เต็มประสิทธิภาพโดยไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม.

5.2 ข้อเสนอแนะ

แนะนำให้ศึกษาการปรับปรุงระบบระบายความร้อนและการควบคุมอุณหภูมิให้เสถียรยิ่งขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานในสภาพอากาศที่หลากหลายและการทดสอบในระยะยาว นอกจากนี้ ควรพัฒนาแนวทางการออกแบบให้เครื่องมีขนาดกะทัดรัดและเคลื่อนย้ายสะดวกยิ่งขึ้น

การวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเก็บรักษาผักสดที่สามารถประยุกต์ใช้กับภาคเกษตรกรรมระดับโลก ส่งเสริมคุณภาพชีวิตและความยั่งยืนของการผลิตทางการเกษตร

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ นักวิจัยที่ให้การสนับสนุนทั้งด้านวิชาการและด้านจิตใจ การวิจัยนี้ไม่อาจสำเร็จได้หากขาดการช่วยเหลือจากท่านทุกท่าน ผลงานวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะเป็นประโยชน์ต่อสังคม และขอให้ผลลัพธ์ที่ได้สะท้อนถึงความรู้และความอุตสาหะของทุกท่านที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

[1] สรายุธ ทองกุลภัทร์ และ พัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร. (2560). "การผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กตริกจากเครื่องปรับอากาศ". วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, 5(1): 60-67.

[2] Rowe, D.M. (2006). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. USA, CRC Press.

[3] อาจรี ศุภสุธีกุล. (2553). “การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กตริก”. วรสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทร์วิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 2 ฉบับที่ 3 มกราคม - มิถุนายน 2553: 14-26.

[4] คณิต ทองพิสิฐสมบัติ. (2553) การพัฒนาเครื่องทำความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก. มหาวิทยาลัยสยาม:กรุงเทพฯ. DOI: https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_DOI=10.14458/SIAM.res.2010.6

[5] ธนากร ขุบล เอื้อบุญ ที่พึ่ง และนิวัตร พัฒนะ. (2564). “การศึกษาระบบเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อควบคุมอุณหภูมิสำหรับการจัดส่งอาหาร”.วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 พ.ศ. 2564: 80-92.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกลือสินเธาว์ร่วมกับถ่านในการปรับปรุงความต้านทานดิน

Feasibility Study on Enhancing Soil Resistance Using Rock Salt and Charcoal

ทนงศักดิ์ โกสีย์[1] ดุสิต อุทิศสุนทร[2*] และ กีรติ ชยะกุลคีรี[3]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[2*]สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
E-mail: dusit.ut@bru.ac.th*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เกลือสินเธาว์ผสมกับถ่านเป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อช่วยลดค่าความต้านทานดินในพื้นที่ทางธรณีวิทยาลักษณะดินร่วนปนดินเหนียวหรือดินร่วนเหนียวปนทราย โดยใช้การต่อหลักดินแบบแผ่นทองแดงขนาด 10x10 เซนติเมตร 11x16 เซนติเมตร และ 20x20 เซนติเมตร ทั้งหมดมีความหนา เท่ากับ 0.3 เซนติเมตร ที่ระดับความลึกเท่ากับ 100 เซนติเมตร จากผลการการทดลองพบว่าหลักดินแบบแผ่นทองแดงขนาด 10x10 เซนติเมตร เมื่อไม่มีปรับปรุงมีค่าความต้านทานดินมีค่าสูงมากที่สุด 121.01 โอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 38.620 โอห์ม-เมตร หลักดินแบบแผ่นทองแดงขนาด 20x20 เซนติเมตร เมื่อปรับสภาพดินโดยการเพิ่มเกลือและถ่านในอัตราส่วน 3 ต่อ 3 กิโลกรัมเท่ากันมีค่าความต้านทานดินมีค่าต่ำสุด 6.19 โอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 3.951 โอห์ม-เมตร เกลือสินเธาว์ผสมกับถ่านเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสำหรับการปรับปรุงค่าความต้านทานดิน เป็นตัวเลือกที่ประหยัดและเหมาะสมเมื่อเทียบกับวัสดุปรับปรุงดินชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการบริหารจัดการผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและการนำไปใช้ในอนาคต

คำสำคัญ: เกลือสินเธาว์, ความต้านทานดิน, การปรับปรุงดิน

Abstract

This study evaluates the feasibility of using a rock salt and charcoal mixture as a soil amendment to reduce soil resistance in clay loam and sandy clay loam geological areas. Copper sheet ground rods of 10×10 cm, 11×16 cm, and 20×20 cm, each with a thickness of 0.3 cm, were installed at a depth of 100 cm. Experimental results showed that the 10×10 cm copper sheet ground rod without amendment had the highest soil resistance at 121.01 ohms, with a specific soil resistance of 38.620 ohm-meters. In contrast, the 20×20 cm copper sheet ground rod, treated with 3 kg of rock salt and 3 kg of charcoal, exhibited the lowest soil resistance at 6.19 ohms, with a specific soil resistance of 3.951 ohm-meters. These findings indicate that rock salt mixed with charcoal is a cost-effective and viable material for reducing soil resistance. Further research on environmental impact management and potential applications is recommended.

.

Keywords: Rock salt, Soil resistivity, Soil improvement

1. บทนำ

ระบบต่อหลักดิน (Grounding System) เป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างทางไฟฟ้าที่ช่วยป้องกันความปลอดภัยผู้ใช้งานและอุปกรณ์จากความเสียหายที่เกิดจากกระแสไฟฟ้ารั่วหรือฟ้าผ่า ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นไม่ได้ต่อสายดินหรือสายดินมีความต้านทานสูงเกินทำให้กระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลออกมาไม่สามารถลงสู่พื้นดิน เมื่อผู้ใช้สัมผัสพื้นผิวหรือโครงเครื่องใช้ไฟฟ้าก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายไปลงสู่ดินเกิดอันตรายต่อชีวิต โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าส่วนที่รั่วจะใช้สายดินเป็นเส้นทางการไหลลงดินเพราะสายดินมีความต้านทานต่ำกว่าร่างกายมนุษย์ [1]-[2] ระบบต่อหลักดินขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของดิน (Soil Resistivity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางธรณีวิทยาและสภาพแวดล้อมในพื้นที่ติดตั้ง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีค่าความต้านทานดินสูง เช่น ดินทรายหรือดินที่มีความแห้งแล้ง การลดค่าความต้านทานของดินจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง การใช้วัสดุปรับปรุงดิน เช่น แร่ธาตุหรือสารเคมี เป็นวิธีที่ได้รับการพิจารณาในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เกลือสินเธาว์ (Rock Salt) เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทยและมีต้นทุนต่ำมีคุณสมบัติที่สามารถช่วยเพิ่มความนำไฟฟ้าในดินได้ [3] ด้วยเหตุนี้การศึกษานี้มุ่งเน้นเสนอแนวทางในการประยุกต์ใช้เกลือสินเธาว์และถ่านในการปรับปรุงค่าความต้านทานดินของระบบต่อหลักดินแบบแผ่นทองแดงที่มีผลต่อค่าความต้านทานดิน

2. แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงค่าความต้านทานจำเพาะของดินโดยใช้เกลือสินเธาว์ผสมกับถ่านจากการต่อหลักดินแบบแผ่นทองแดงมีขนาดแตกต่างกัน มีรายละเอียดทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 ค่าความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานดิน (Soil Resistivity) เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่แสดงถึงความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า โดยค่าความต้านทานดินขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของดิน เช่น ปริมาณแร่ธาตุ ความชื้น และความหนาแน่นของดิน โดยดินที่มีความชื้นสูงมีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งระบบต่อหลักดิน ในขณะที่ดินทรายหรือดินหินที่แห้งแล้งมักมีค่าความต้านทานดินสูงลักษณะดินแต่ละแหล่งจะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินไม่เท่ากัน โดยทั่วไปในทางปฏิบัติเมื่อหลักดินมีความยาวมากจะทำให้ค่าความต้านทานลดลง [4]-[5] ส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานดิน สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = 2\pi aR \tag{1}$$

กำหนดให้

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

a คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็คโทรด (เมตร)

R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)

2.2 หลักดิน (Grounding Electrode)

หลักดินเป็นตัวนำที่ฝังใต้ดินโดยจะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งมีการกำหนดหลักดินตามมาตรฐาน NEC250 วัตถุประสงค์ในการเลือกใช้หลักดินสำหรับการต่อสายดินแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความลึกที่มีอยู่ [6]-[7] ทั้งนี้เพื่อป้องกันในจุดที่เป็นอันตรายการทดลองครั้งนี้ใช้หลักดินแบบแผ่นฝัง (Buried Plate) หลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงเพื่อไม่ต้องการขุดดินลงไปลึกมาก การฝังแผ่นทองแดงจะทำในแนวดิ่งแล้วกลบด้วยดิน [8]-[9] ดังรูปที่ 1 ค่าความต้านทานดินจากหลักดินแบบนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

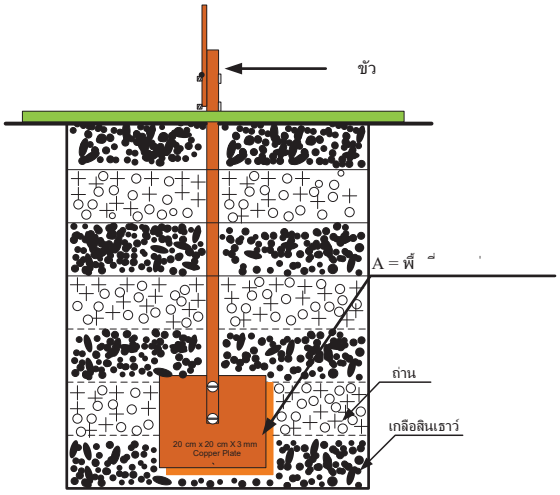
$$R = \frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}} \tag{2}$$

กำหนดให้

R คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

A คือ พื้นที่ของแผ่นทองแดง (ตารางเมตร)



รูปที่ 1 หลักดินแบบแผ่นทองแดง

2.3 การปรับปรุงค่าความต้านทานดิน

การปรับปรุงค่าความต้านทานดินสามารถทำได้โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้าของดินผ่านการเติมวัสดุปรับปรุง เช่น สารเคมี หรือแร่ธาตุที่ช่วยเพิ่มความชื้นและความนำไฟฟ้าแนวทางที่นิยมใช้ประกอบด้วย

- การเติมสารเคมี: เช่นเกลือแร่หรือสารละลายเกลือที่เพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า
- การเพิ่มความชื้น: ผ่านการออกแบบระบบระบายน้ำหรือการเติมน้ำสู่ดิน
- การปรับปรุงโครงสร้างดิน: เช่น การเติมสารอินทรีย์เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัส

ในการปรับปรุงดินโดยใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าในการเติมสารเคมี เช่น เกลือ ถ่าน เถ้าเตา ตะกรันปุ๋ยไนโตรเจน ตะกรันแคลเซียมคาร์ไบด์ มะนาว ลงในดินรอบ ๆ ตัวกราวด์เพื่อปรับปรุงค่าการนำไฟฟ้าของดินรอบ ๆ ตัวกราวด์โดยใช้เกลือสินเธาว์ (Rock Salt) เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีองค์ประกอบหลักคือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และถ่าน (C) ซึ่งวัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า [10] –[11] การใช้เกลือสินเธาว์ในดินสามารถช่วยลดค่าความต้านทานของดินได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนในดินเมื่อเกิดการละลาย แต่ผลกระทบของการใช้เกลือสินเธาว์ขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมและสภาพของดิน เช่น ความชื้นและความสามารถในการซึมผ่าน

3. วิธีดำเนินการและผลการทดลอง

การศึกษานี้มีการดำเนินการวิจัยที่ออกแบบเพื่อให้ได้ข้อมูลของการใช้เกลือสินเธาว์ร่วมกับถ่านในการปรับปรุงค่าความต้านทานดิน

โดยกำหนดพื้นที่ข้อมูลทำศึกษา ณ บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย จ.บุรีรัมย์



รูปที่ 2 ดินร่วนสีดำบ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย

พื้นที่ลักษณะดินที่ใช้ทดสอบดังรูปที่ 2 เป็นดินร่วนปนดินเหนียวหรือดินร่วนเหนียวปนทราย สีน้ำตาลหรือสี น้ำตาลอ่อนตลอดชั้นดินในฤดูแล้งพบคราบเกลือบริเวณผิวหน้าดิน ทำการทดสอบเปรียบเทียบวัดค่าความต้านทานดินโดยใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดง ขนาด 10x10 เซนติเมตร 11x16 เซนติเมตร และ 20x20 เซนติเมตร ทั้งหมดมีความหนา เท่ากับ 0.3 เซนติเมตร ฝังลงในหลุมดินที่ระดับความลึกเท่ากับ 100 เซนติเมตร จากนั้นใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน (Earth Tester) วัดค่าความต้านทานดิน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน

ทำการทดสอบเปรียบเทียบความต้านทานดินจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแผ่นทองแดงดังกล่าวข้างต้น โดยการเติมเกลือและถ่านในอัตราส่วน1 : 1 กิโลกรัม 2 : 2 กิโลกรัม และ 3 : 3 กิโลกรัม ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 การเติมเกลือ



รูปที่ 5 การเติมถ่าน

โดยการใส่เกลือและถ่านอย่างละ 50 กรัมในแต่ละชั้นสลับกันดังรูปที่ 1 เพื่อให้ได้อัตราส่วนตามพิกัดในตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 3 แล้วใช้เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน (Earth Tester) วัดค่าความต้านทานดิน จากผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานจำเพาะดินและค่าความต้านทานดินของหลักดินแบบแผ่นขนาด 10x10 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร

ชนิดดิน	อัตราสัดส่วน เกลือ : ถ่าน (กิโลกรัม)	ค่าความต้านทาน จำเพาะดิน (Ω-m)	ค่าความต้านทานดิน (Ω)
ดินร่วนสีดำ	ไม่ใส่	38.620	121.01
	1 : 1	27.807	87.13
	2 : 2	16.663	52.21
	3 : 3	3.960	12.41

จากตารางที่ 1 ค่าความต้านทานสูงมากที่สุดอยู่ที่ 121.01 โอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 38.620 โอห์ม-เมตร เมื่อสามารถปรับสภาพดินโดยการเพิ่มเกลือและถ่านในอัตราส่วนเท่ากันตามตารางที่ 1 ก็จะทำให้ค่าความต้านทานดินที่ต่ำลงขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าความต้านทานน้อยที่สุดอยู่ที่ 12.41 โอห์ม ความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 3.960 โอห์ม-เมตร

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานจำเพาะดินและค่าความต้านทานดินของหลักดินแบบแผ่นขนาด 11x16 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร

ชนิดดิน	อัตราสัดส่วน เกลือ : ถ่าน (กิโลกรัม)	ค่าความต้านทานจำเพาะดิน (Ω-m)	ค่าความต้านทานดิน (Ω)
ดินร่วนสีดำ	ไม่ใส่	32.348	76.40
	1 : 1	25.417	60.03
	2 : 2	15.246	36.01
	3 : 3	3.086	7.29

จากตารางที่ 2 ค่าความต้านทานสูงมากที่สุ ดอยู่ที่ 76.40 โอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 32.348 โอห์ม-เมตร เมื่อสามารถปรับสภาพดินโดยการเพิ่มเกลือและถ่านในอัตราส่วนเท่ากันตามตารางที่ 2 ก็จะทำให้ค่าความต้านทานดินที่ต่ำลงขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าความต้านทานน้อยที่สุดอยู่ที่ 7.29 โอห์ม ความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 3.086 โอห์ม-เมตร

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานจำเพาะดินและค่าความต้านทานดินของหลักดินแบบแผ่นขนาด 20x20 เซนติเมตร ที่ระดับความลึก 100 เซนติเมตร

ชนิดดิน	อัตราสัดส่วน เกลือ : ถ่าน (กิโลกรัม)	ค่าความต้านทานจำเพาะดิน (Ω-m)	ค่าความต้านทานดิน (Ω)
ดินร่วนสีดำ	ไม่ใส่	42.894	67.20
	1 : 1	19.021	29.80
	2 : 2	6.108	9.57
	3 : 3	3.951	6.19

จากตารางที่ 3 ค่าความต้านทานสูงที่สุดอยู่ที่ 67.20 โอห์ม ค่าความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 42.894 โอห์ม-เมตร เมื่อสามารถปรับสภาพดินโดยการเพิ่มเกลือและถ่านในอัตราส่วนเท่ากันตามตารางที่ 3 ก็จะทำให้ค่าความต้านทานดินที่ต่ำลงขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าความต้านทานน้อยที่สุดอยู่ที่ 6.19 โอห์ม ความต้านทานจำเพาะดินเท่ากับ 3.951 โอห์ม-เมตร

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เกลือสินเธาว์ปรับปรุงค่าความต้านทานดินต่อหลักดิน พบว่าอัตราส่วนเกลือสินเธาว์และถ่านมีประสิทธิภาพในการลดค่าความต้านทานของดินได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ดินมีค่าความต้านทานสูงและมีความชื้นต่ำ เช่น พื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ การเพิ่มการนำไฟฟ้าของดินเกิดจากจากคาร์บอนและโซเดียมคลอไรด์ที่ช่วยเพิ่มประจุไอออนในดิน การใช้งานเกลือสินเธาว์อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อความเค็มของดิน ซึ่งต้องควบคุมปริมาณให้เหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียต่อการเกษตรและสิ่งแวดล้อม

เอกสารอ้างอิง

[1] สุชาติ สุขสมปอง. (2560). การปักหลักดินในระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[2] IEEE 80-2000 Standard., “ IEEE guide for safety in AC substation grounding -ANSI/IEEE Std 80-2000,” New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.

[3] Morales, J. L. and Barba, J. A.,"Enhancing Grounding System Performance Using Chemical Grounding Materials," in IEEE Transactions on Power Delivery, 34(2), 2019, pp.987–994.

[4] ธนกร วรประเสริฐ (2564). การใช้วัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมในการปรับปรุงค่าความต้านทานดิน. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

[5] ยุทธณา คงจีน และคณะ. (2563). การเปรียบเทียบการวัดค่าความต้านทานหลักดินด้วยเครื่องมือวัดแบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 11.*

[6] วิฑูรย์ เลิศพรไพบูลย์ (2562). วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง: ระบบสายดินและความปลอดภัย. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ด ยูเคชั่น.

[7] Attia A, El-n., “Design and Optimize Substation Grounding Grid Based on IEEE Std.80-2000 using GUI and MATLAB Codes,” in International Journal of engineer Science and Technology, Vol. 3 No. 7, 2011, pp.6033-6039.

[8] S. Yunus, A. Suratman, N. Mohamad Nor, M. Othman, “Effectiveness of Earthing System in Vertical Configurations,” in World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering. Vol.15(1), 2020, pp. 38-41.

[9] ชำนาญ ห่อเกียรติ และเทพกัญญา ขัดแสง.(2552). การต่อลงดิน, กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[10] Suthar, M. B. and Patel, P. J., "Effects of Salt and Chemicals on Soil Resistivity for Grounding Systems," in International Journal of Electrical Engineering & Technology, 11(4), 2020, pp. 321–328.

[11] ชลธิชา สายชล. (2563). ผลของการใช้สารเคมีลดค่าความต้านทานดินต่อการปักหลักดินในพื้นที่แห้งแล้ง. วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าในพื้นที่จังหวัดปราจีนบุรี

Evaluation of Electric Energy Consumption of The Electric Motorcycle in Prachinburi Province

สุพร หนูคง, นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ และ สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สวาง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: suporn-n@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้การตรวจวัดค่าพลังงานด้วยการทดสอบใช้งานจริง จักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ทดสอบนั้น มอเตอร์มีพิกัดกำลัง 1,000 W ใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออนที่มีพิกัดแรงดัน 62.9 V 20 Ah เมื่อน้ำหนักรถรวมผู้ขับขี่ 141.30 kg จะได้ความเร็วสูงสุดที่ 60 km/h ทำการทดสอบที่ความเร็ว 3 ระดับ คือ 35 45 และ55 km/hโดยทดสอบ 5 ครั้งในแต่ละความเร็วที่ใช้จากผลการทดสอบพบว่า ที่ความเร็ว 35 km/h ได้ระยะทางทดสอบเฉลี่ยสูงสุดคือ 67.48 km และที่ความเร็ว 55 km/h ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดคือ 55 นาทีเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่คือ 5 ชั่วโมง 30 นาทีพลังงานในการชาร์จเฉลี่ยต่อครั้ง 1.485 kWh โดยมีค่าใช้จ่ายในการชาร์จ 6.43 บาทต่อครั้งจากการประเมินค่าใช้จ่ายพบว่าที่ความเร็ว 35 km/h มีความคุ้มค่าด้านค่าใช้จ่ายมากที่สุดคิดเป็น 0.065บาทต่อกิโลเมตร

คำสำคัญ: การใช้พลังงาน, รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า, แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน

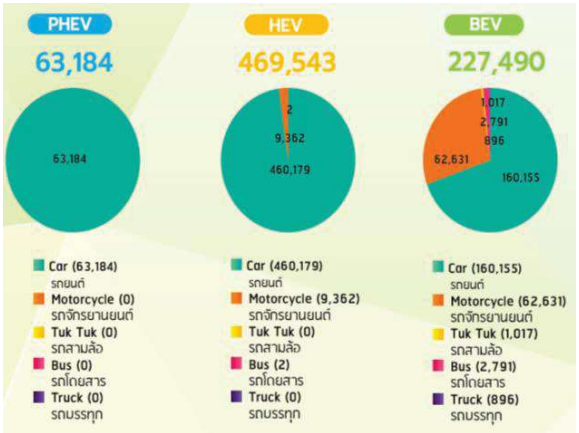
Abstract

This article studies the energy consumption of an electric motorcycle by measuring energy values through practical testing methods. The tested electric motorcycle has a motor with a power rating of 1,000 W and uses a lithium-ion battery with a voltage rating of 62.9 V 20 Ah. When the total weight of the vehicle and the driver is 141.30 kg, the maximum speed will be 60 km/h. The test was conducted at three speeds: 35, 45 and 55 km/h, perform 5 tests at each speed used. The test results showed that at a speed of 35 km/h, the average test distance was 67.48 km, and at a speed of 55 km/h, the travel time was the least, 55 minutes. The battery charging time was 5 hours and 30 minutes, with an average energy consumption per charge of 1.485 kWh. The charging cost per session was 6.43 THB. Cost analysis revealed that traveling at 35 km/h was the most cost-effective, with an expense of 0.065 THB per kilometer.

Keywords: Energy Consumption, Electric Motorcycle, Lithium-Ion Battery

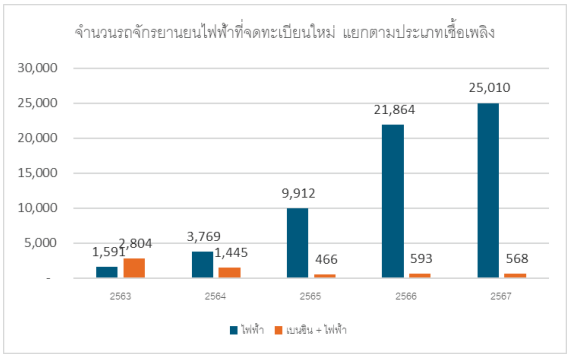
1. บทนำ

จักรยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Motorcycle) หรือ EV Bike คือ รถมอเตอร์ไซค์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine) เพื่อขับเคลื่อนรถให้สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการได้ โดยมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เป็นแหล่งพลังงานหลักปัจจุบันสามารถจดทะเบียนได้ตามราชกิจจานุเบกษา ที่ประกาศโดยกรมการขนส่งทางบก เรื่อง กำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถจักรยานยนต์สาธารณะ พ.ศ. 2562 ลงวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ.2562 โดยการกำหนดคุณสมบัติของรถจักรยานยนต์ส่วนบุคคลที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า ต้องมีกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าไม่น้อยกว่า 250 วัตต์ และสามารถขับเคลื่อนรถให้มีความเร็วสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยสามารถขับเคลื่อนรถในขณะที่มีน้ำหนักรถรวมน้ำหนักบรรทุก (Gross Vehicle Weight) ตามที่ผู้ผลิตกำหนดด้วยความเร็วสูงสุดได้ต่อเนื่องเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 30 นาที [1] ซึ่งประเทศไทยมีสถิติจำนวนรถที่จดทะเบียนใหม่ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์ กฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบก จำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง ทั่วประเทศ ซึ่งมียานยนต์ไฟฟ้าที่ส่วนบุคคลมีการจดทะเบียนดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 จำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการจดทะเบียนสะสม [2]

ในส่วนของยานยนต์ไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามการเก็บข้อมูลของกรมการขนส่งทางบก ได้แก่ (1) รถยนต์ไฮบริดแบบเสียบปลั๊ก (Plug-in Hybrid Electric Vehicle: PHEV) (2) รถยนต์ไฮบริด (Hybrid Electric Vehicle: HEV) และ (3) รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Electric Vehicle: BEV)จากรูปที่ 1 มีจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนประเภท PHEV 63,184 คัน HEV 469,543 คัน และ BEV อยู่ที่ 277,490 คัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าจักรยานยนต์ไฟฟ้ามีส่วนแบ่งของจำนวนอยู่ที่ประมาณ 1 ใน 3 ของจำนวนรถที่ใช้แบตเตอรี่เป็นพลังงานเชื้อเพลิงเพียงอย่างเดียว ในเบื้องต้นได้มีความสนใจในส่วนของจักรยานยนต์ไฟฟ้า ในประเทศได้มีการจดทะเบียนรถจักรยานยนต์ส่วนบุคคลจำแนกตามชนิดเชื้อเพลิงทั่วประเทศ โดยมีการจดทะเบียนใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 จำนวนรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่จดทะเบียนใหม่

จากรูปที่ 2 แสดงสถิติจำนวนรถจักรยานยนต์ส่วนบุคคลที่จดทะเบียน ตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์และตามกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบก จำแนกตามชนิดเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่าจำนวนรถจักรยานยนต์ที่ใช้ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีการจดทะเบียนใหม่ในแต่ละปี ตั้งแต่ปี พ.ศ.2563 ถึงปีพ.ศ.2567 มีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น โดยข้อมูลในวันที่ 31 ธันวาคม 2567 จำนวนรถไฟฟ้าสะสมมีทั้งหมด 55,871 คันทั่วประเทศ และจำนวนจักรยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงเบนซิล+ไฟฟ้า จำนวนรถสะสมมีทั้งหมด 9,278 คัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในปีถัดไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือวิทยาเขตปราจีนบุรีมีพื้นที่ 1,809 ไร่ 59 ตารางวา ปัจจุบันมีจำนวนนักศึกษาทั้งหมด 1,747 คนจำนวนบุคลากรภายในวิทยาเขต 215 คนซึ่งการเดินทางมีการเดินทางโดยใช้วิธี เดิน รถจักรยาน รถจักรยานยนต์ รถยนต์ และมีรถรับส่งประกอบด้วยรถสองแถว 2 คัน และรถหกล้อ จำนวน 2 คัน ซึ่งยานพาหนะส่วนใหญ่เป็นรถที่ใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งเกิดผลเสียในด้านการเกิดมลพิษทางอากาศ และไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเดินทาง ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดมา ในปัจจุบันได้มีการนำรถที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาใช้งานเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีข้อดีหลายประการด้วยกัน เช่น ประหยัดค่าใช้จ่าย ดูแลรักษาได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม บทความนี้จึงทำการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพื่อประเมินการใช้งานของจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยการทดสอบใช้งานจริง

2. วิธีการทดลอง

สำหรับการวิจัยนี้ได้ทำการประเมินค่าพลังงานที่ใช้ในการขับขี่ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ทดสอบ โดยการเก็บข้อมูลความเร็วระยะทางที่ใช้ในการขับขี่ พลังงานที่ใช้ในแต่ละรอบการทดสอบ เวลาที่ใช้ทดสอบหรือเวลาในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่[3] แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณดังสมการที่ 1

$$t = \frac{C \times V}{P} \quad (1)$$

เมื่อ

t	คือ	เวลาในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ (แอมป์-ชั่วโมง, h)
C	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ (แอมป์-ชั่วโมง, Ah)
V	คือ	แรงดันของแบตเตอรี่ (โวลต์, V)
P	คือ	กำลังไฟฟ้าที่โหลดใช้งาน (วัตต์, W)

รวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ [4] ในแต่ละครั้งใช้สมการในการคำนวณดังสมการที่ 2

$$t = \frac{C}{I} \times 1.2 \quad (2)$$

เมื่อ

P	คือ	เวลาในการชาร์จ (ชั่วโมง, h)
	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ (แอมป์-ชั่วโมง, Ah)
+	คือ	กระแสไฟฟ้าของเครื่องชาร์จ (แอมป์, A)
1.2	คือ	เป็นตัวคูณเพื่อชดเชยการสูญเสียพลังงานในระหว่างการชาร์จ (ประมาณ 20% ของพลังงานสูญเสียเป็นความร้อน)

เมื่อได้ค่าที่ได้จากคำนวณแล้วทำการทดสอบและบันทึกผลพร้อมทั้งประเมินค่าการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในลำดับถัดไป

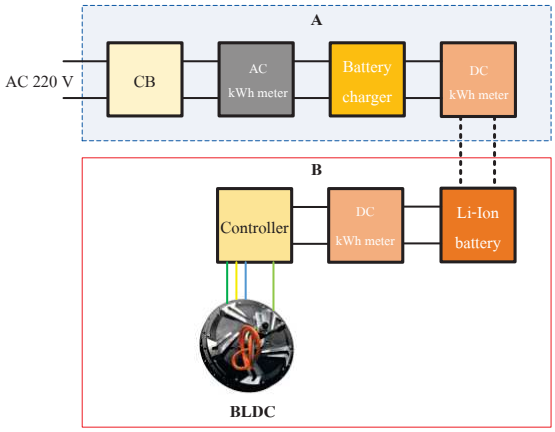
3.การทดสอบการใช้งานจริงของจักรยานยนต์ไฟฟ้า

ส่วนประกอบของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำการทดสอบมีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงรายละเอียดของรถจักรยายนต์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการทดสอบโดยจะเป็นจักรยานยนต์ที่ผ่านข้อกำหนดตามมาตรฐานและมีความถูกต้องตามกฎหมายและสามารถขับขี่ได้ตามท้องถนนได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยในส่วนของการติดตั้งระบบตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าในส่วนของพลังงานไฟฟ้าก่อนเข้าชาร์จเจอร์ที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อใช้ในการประเมินค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงและสามารถประเมินค่าใช้จ่ายต่อรอบการใช้พลังงานได้

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ทำการทดลอง

ข้อมูล	รายละเอียด	ข้อมูล	รายละเอียด
กำลังมอเตอร์	1,000 Watt	**ชนิดแบตเตอรี่**	Lithium - Ion
ความจุแบตเตอรี่	62.9 V (17S) 20 Ah	**เวลาชาร์จ**	4 ชั่วโมง
ความเร็วสูงสุด	60 km/h	**ล้อหน้า/ล้อหลัง**	3.0 / 10" 42J
เบรกหน้า/ เบรกหลัง	Disc Brake	**ขนาดโดยรวม**	700 x 1,780 x 1,070 (mm.)
น้ำหนักโดยรวม	71.30 kg	**น้ำหนักบรรทุก**	150 kg

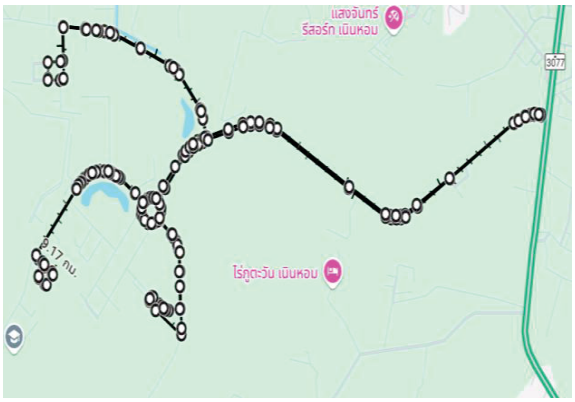
ตำแหน่งถัดไปทำการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำการชาร์จไปยังแบตเตอรี่สำหรับวัดค่าพลังงานที่ใช้สำหรับแบตเตอรี่จริง และตำแหน่งสุดท้ายคือก่อนเข้ากล่องควบคุมตำแหน่งนี้ใช้ในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบทั้งหมด เพื่อให้ทราบว่าค่าพลังงานที่ใช้จริง การติดตั้งระบบการวัดพลังงานแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบการตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 แสดงระบบการตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็นการตรวจวัดค่าพลังงาน 2 ส่วนด้วยกัน คือส่วน A ประกอบด้วยระบบไฟฟ้าขาเข้า 220 V 50 Hz สำหรับจ่ายให้กับระบบชาร์จเจอร์ หลังจากนั้นจะผ่านระบบป้องกัน ซึ่งเป็นเซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาด 16 A 230 VAC ใช้สำหรับตัดต่อการทำงานของระบบการประจุพลังงานแบตเตอรี่ ถัดไปจะเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า(AC Kilowatt-hour Meters) สำหรับวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับชาร์จเจอร์ซึ่งมีหน้าที่ในการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อใช้ในการประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ โดยส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC Kilowatt-hour Meters) ก่อนเข้าสู่แบตเตอรี่สำหรับการเก็บพลังงาน ถัดไปในส่วนของ B จะเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในจักรยานยนต์ไฟฟ้า จะเริ่มต้นจาก แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน (Lithium-Ion Battery) ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1,258 Wh ส่งพลังงานไปยังอุปกรณ์วัดพลังงานไฟฟ้าเพื่อตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ส่งไปยังกล่องควบคุมการทำงานของจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งมีหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ระบบไฟฟ้าในการเลี้ยงวงจร ระบบแตรและไฟสัญญาณต่าง ๆ ระบบป้องกันขโมย รวมถึงสัญญาณที่รับจากคันเร่งไฟฟ้า เพื่อประมวลผลสัญญาณ แล้วส่งต่อกำลังไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC) เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเชิงกลสำหรับขับเคลื่อนให้เกิดการเคลื่อนที่ของจักรยานยนต์ไฟฟ้าต่อไป

ในการทดสอบทำการประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ให้จนเต็มโดยใช้ชาร์จเจอร์ที่พิกัดแรงดัน 71.4 V กระแสไฟฟ้าที่ 4A แล้วทำการบันทึกเวลา และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการชาร์จ จากนั้นทำการพักแบตเตอรี่ไว้ นานกว่า 1 ชั่วโมง เพื่อรอให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลง แล้วทำการทดสอบการใช้งานจริงโดยทดสอบใช้งานที่ความเร็ว 35 45 และ 55 km/h ทำการทดสอบในแต่ละความเร็วจำนวน 5 ครั้ง โดยผู้ขับขี่มีน้ำหนัก 70 กิโลกรัม ใช้เส้นทางทดสอบภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี แสดงในรูปที่ 4 ซึ่งพื้นถนนมีทั้งพื้นคอนกรีต และลาดยาง ระยะทางต่อรอบของการทดสอบอยู่ที่ 9.17 กิโลเมตร สำหรับการทดสอบทำการวัดการใช้พลังงานของแบตเตอรี่ พร้อมทั้งระยะทางและเวลาที่ใช้ในการทดสอบโดยขับขี่จนกระทั่งกล่องควบคุมตัดการทำงานและบันทึกค่าระยะทาง พร้อมทั้งเวลาที่ใช้งานค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในแต่ละรอบการทดลอง จากนั้นจึงนำรถมาพักไว้ในห้องเพื่อให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่ลดลงนานกว่า 8 ชั่วโมง [5] แล้วทำการประจุแบตเตอรี่ซ้ำใหม่ โดยทำการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ พร้อมทั้งเวลาที่ใช้ และทดสอบตามลำดับที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4 เส้นทางสำหรับการทดสอบจักรยานยนต์ไฟฟ้า

4. ผลการทดสอบ

บทความนี้ได้ทำสอบจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีการทดสอบที่ความเร็ว 35 45 และ 55 km/h จากนั้นทำการวัดค่าแรงดันที่ใช้ไปของแบตเตอรี่ พร้อมทั้งเวลาที่ใช้ในการชาร์จ และการใช้งานจริงดังแสดงในตารางที่ 2ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทำการวัดก่อนใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 70.5V ทดสอบการใช้งานจนกว่ากล่องควบคุมจะตัดการทำงาน โดยพิกัดของแรงดันของแบตเตอรี่เฉลี่ยไม่น้อยกว่า 55 V

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการวัดแรงดัน ระยะทาง เวลาที่ใช้ในการชาร์จและทดสอบแบตเตอรี่

ความเร็ว (km/h)	แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ไป (V)	ระยะทาง (km)	เวลาที่ใช้ทดสอบ(h:s)	เวลาที่ใช้ชาร์จ (h:s)
35	15.16	67.48	2:03	5:31
45	15.26	51.5	1:28	5:30
55	15.04	42.64	0.55	5:31

และทำการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการประจุแบตเตอรี่ และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าพลังงานไฟฟ้า

ความเร็ว (km/h)	AC (kWh)	DC (kWh) to battery	DC (kWh) to controller
35	1.453	1.36	1.02
45	1.4646	1.36	0.958
55	1.457	1.36	0.92

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบจักรยานยนต์ไฟฟ้าโดยทดสอบทั้ง 3ความเร็ว คือ 35 45 และ 55 km/h โดยทำการทดสอบแต่ละความเร็วจำนวน 5 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่า ที่ความเร็ว 35 km/h ได้ระยะทางเฉลี่ยสูงสุดคือ 67.48 km ใช้เวลาในการทดสอบเฉลี่ยที่ 2 ชั่วโมง 3 นาที รองลงมาคือที่ความเร็ว 45 km/h ได้ระยะทางเฉลี่ยคือ 51.5 km ใช้เวลาในการทดสอบเฉลี่ยที่ 1 ชั่วโมง 28 นาที และที่ความเร็ว 55 km/h ได้ระยะทางเฉลี่ยคือ 42.64 km ใช้เวลาในการทดสอบเฉลี่ยที่ 55 นาที โดยเวลาที่ใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่ทั้ง 3 ความเร็วเฉลี่ยที่ 5 ชั่วโมง 30 นาที ใช้พลังงานในการชาร์จเฉลี่ยที่ 1.485 kWh ต่อการชาร์จ 1 ครั้งคิดเป็นเงิน 6.43บาท (อ้างอิงอัตราค่าไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี)

ประเมินอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานและค่าใช้จ่ายในการชาร์จแบตเตอรี่พบว่าที่ความเร็ว 35 km/h คิดเป็น 0.065 บาทต่อกิโลเมตร ที่ความเร็ว 45 km/h คิดเป็น 0.125 บาทต่อกิโลเมตร และ 55 km/h คิดเป็น 0.151 บาทต่อกิโลเมตรในส่วนของการตรวจวัดพลังงานที่ใช้ไปจะมีการสูญเสียไปในส่วนของระบบอื่น ๆ เช่นระบบไฟสัญญาณต่าง ๆ รวมถึงเกิดการสูญเสียในส่วนของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการใช้งานของแบตเตอรี่ และในระบบมีสายเคเบิล รีเลย์ ฟิวส์ ฯลฯ รวมทั้งในการใช้งานจริงจำเป็นต้องรักษากระแสชาร์จให้ได้ตามที่แบตเตอรี่ต้องการ จึงทำให้แรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

[1] ประกาศกรมการขนส่งทางบกเรื่องกำหนดกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์พ.ศ.2563.ราชกิจจานุเบกษา (เล่มที่ 138). ตอนพิเศษ ที่25ง (3กุมภาพันธ์2564)

[2] EVAT, "Current status of HEV, PHEV, and BEV in 2024," *Electric Vehicle Association of Thailand*, 2024. [Online]. Available:https://evat.or.th/images/evinfo/current-status/2024-09/Poster_HEV_PHEV_BEV_2024END.pdf. [Accessed: Mar. 12, 2025].

[3] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2010.

[4] พรชนิตว์ ชัยเพชร,วันนาเดีย นาแว, ปนัดดา โสพส, สิทธิพร บุญญานุวัตร์และวสุ สุขสุวรรณ.(2568). การออกแบบและพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงสำหรับใช้งานในเมือง. *การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการครั้งที่ 24* (น.113 – 116).มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

[5] E. Schaltz, D.-I. Stroe, K. Nørregaard, L. S. Ingvardsen, and A. Christensen, "Incremental capacity analysis applied on electric vehicles for battery state-of-health estimation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 2, pp. 1810-1817, doi: 10.1109/TIA.2021.3052454/ Mar./Apr. 2021.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้การประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์

Real-time Image-based Temperature Analysis for Fault Detection in Induction Motors

ธีรพงษ์ ฉิมเพชร* สมคิด สุทธิศักดิ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย teerapong.c@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

มอเตอร์เหนี่ยวนำมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติที่ทนทานและรองรับการทำงานได้หลากหลาย จึงมักเจอปัญหาความเสียหาย เช่น ความผิดปกติของแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ที่อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิแบบเรียลไทม์โดยใช้การประมวลผลภาพ ระบบดังกล่าวใช้กระบวนการแปลงภาพเป็นขาวดำ การกรองภาพด้วย Gaussian Filter และการกำหนดพื้นที่เฝ้าระวัง (ROI) ในการวิเคราะห์และระบุความผิดปกติจุดสำคัญ ได้แก่ บริเวณแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แบริ่งที่มีความผิดปกติจะสร้างอุณหภูมิที่สูงกว่าแบริ่งปกติถึง 20-30°C ขดลวดสเตเตอร์ที่มีการลัดวงจรรอบจะทำให้อุณหภูมิบนมอเตอร์ไม่สม่ำเสมอ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแจ้งเตือนเมื่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในบริเวณเฝ้าระวังเกินเกณฑ์ที่กำหนดได้ทันทีมีค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 96% ระบบนี้จึงสามารถช่วยลดความเสี่ยงของความเสียหายที่ไม่อาจคาดคิดและเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การวิเคราะห์อุณหภูมิ การประมวลผลภาพ มอเตอร์เหนี่ยวนำ

Abstract

Induction motors play a vital role in industrial processes due to their durability and versatility. However, issues such as bearing failures and stator winding faults can significantly disrupt production. This research focuses on developing a real-time temperature analysis system using image processing techniques to detect and identify critical motor abnormalities. The system employs grayscale image conversion, Gaussian filtering, and Region of Interest (ROI) definition to analyze and monitor key areas, including motor bearings and stator windings. Experimental results demonstrate that faulty bearings exhibit temperatures 20-30°C higher than normal bearings, while stator windings with short-circuit faults show uneven temperature distribution across the motor. The developed system can immediately warn when the temperature difference in the monitoring area exceeds the specified criteria with a maximum accuracy of 96%. This system can therefore help reduce the risk of unexpected damage and greatly increase the efficiency of preventive maintenance.

Keywords: Temperature analysis, Image processing, Induction motor

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ด้วยคุณสมบัติที่สามารถทำงานได้ต่อเนื่องมีความทนทานสูง และรองรับการใช้งานกับโหลดหลากหลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างการใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำยังคงมีโอกาสเกิดปัญหาความผิดปกติได้ โดยปัญหาที่พบได้บ่อย เช่น ความเสียหายที่แบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ ความผิดปกติเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของมอเตอร์และอาจทำให้ระบบทั้งหมดหยุดชะงัก ซึ่งไม่เพียงแต่ลดประสิทธิภาพของการผลิต แต่ยังสร้างภาระต้นทุนในการซ่อมบำรุงที่เกินความคาดหมายได้อีกด้วย ดังนั้นการตรวจจับความผิดปกติเหล่านี้ตั้งแต่ระยะแรกจึงเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจลุกลามในระยะยาว ซึ่งตัวแปรที่สำคัญที่นิยมใช้ในการตรวจสอบปัญหาในมอเตอร์คือ "อุณหภูมิ" เนื่องจากอุณหภูมิสามารถสะท้อนถึงสภาพการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างชัดเจน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น แบริ่งและขดลวดสเตเตอร์อาจเป็นสัญญาณเตือนถึงปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นในมอเตอร์ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่สูงผิดปกติในบริเวณแบริ่ง อาจแสดงถึงการสึกหรอหรือการหล่อลื่นที่ไม่เพียงพอ ขณะที่อุณหภูมิที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในขดลวดสเตเตอร์ อาจบ่งบอกถึงการลัดวงจรหรือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับขดลวด

ดังนั้น การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแบบเรียลไทม์จึงมีบทบาทสำคัญในการป้องกันปัญหาและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้ เราได้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิแบบเรียลไทม์ผ่านการประมวลผลภาพ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะช่วยตรวจสอบอุณหภูมิในส่วนประกอบสำคัญของมอเตอร์และสามารถแจ้งเตือนเมื่อพบปัญหาที่อาจเกิดขึ้น เช่น การสึกหรอของแบริ่งหรือการเสื่อมสภาพของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งระบบนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษา ลดความเสี่ยงจากความเสียหายที่ไม่ได้คาดคิด และช่วยยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ในระบบอุตสาหกรรมให้ยาวนานยิ่งขึ้น

2.1 ความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ [1]

การใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นเวลานาน ๆ หรืออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมอาจเกิดปัญหาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานได้ ซึ่งปัญหาที่พบได้บ่อยในมอเตอร์เหนี่ยวนำ เช่น ปัญหาแบริ่ง (Bearing Faults) ที่เกิดจากการเสื่อมสภาพหรือสึกหรอของแบริ่ง ซึ่งส่งผลให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นและทำให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้น หากปล่อยไว้โดยไม่แก้ไขอาจนำไปสู่ความเสียหายรุนแรงในที่สุด อีกปัญหาที่พบได้คือความเสียหายของขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding Faults) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการเสื่อมสภาพของฉนวนขดลวด จนทำให้เกิดการลัดวงจรในขดลวดและการไหลของกระแสไฟฟ้าที่สูงผิดปกติ ความผิดปกตินี้มักมาพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในบริเวณที่ลัดวงจร ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานโดยรวมของมอเตอร์ นอกจากนี้ ปัญหาความร้อนสูงเกิน (Overheating Faults) เป็นอีกหนึ่งความผิดปกติที่ไม่ควรมองข้าม ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของมอเตอร์จะต้องถูกระบายออกอย่างเหมาะสม หากระบบระบายความร้อนไม่ทำงานอย่างเต็มประสิทธิภาพ อาจเกิดความร้อนสะสมในตัวมอเตอร์จนทำให้เกิดความเสียหายในระยะยาว ดังนั้นการตรวจจับและวิเคราะห์อุณหภูมิในจุดสำคัญ เช่น บริเวณแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังและบ่งชี้ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในมอเตอร์และยังช่วยให้การบำรุงรักษามอเตอร์เป็นไปอย่างเหมาะสมยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ในระยะยาวอีกด้วย

2.2 การประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการวิเคราะห์และดึงข้อมูลจากภาพดิจิทัล เทคนิคนี้ช่วยให้ระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ซึ่งกระบวนการหลักที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยฉบับนี้มีดังนี้

2.2.1 การแปลงภาพเป็นขาวดำ (Grayscale Conversion) [2]

การแปลงภาพเป็นขาวดำถือเป็นขั้นตอนพื้นฐานในกระบวนการประมวลผลภาพ เพราะช่วยลดความซับซ้อนในการจัดการข้อมูล ทำให้การประมวลผลมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ภาพสีในรูปแบบ RGB ประกอบด้วย 3 ช่องสัญญาณสี ได้แก่ สีแดง (Red), สีเขียว (Green), และสีน้ำเงิน (Blue) แต่ข้อมูลในบางช่องสัญญาณอาจไม่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์อุณหภูมิ ดังนั้น การแปลงภาพเป็นขาวดำจะช่วยลดข้อมูลที่ไม่จำเป็น โดยเหลือเพียงค่าความเข้มของสี (intensity) ซึ่งง่ายต่อการประมวลผล ช่วยลดภาระในการคำนวณ และเพิ่มความเร็วในการวิเคราะห์อุณหภูมิในบริเวณที่ต้องการตรวจจับ

2.2.2 ฟิลเตอร์ภาพ (Image Filtering) [3]

การกรองภาพหรือการใช้ฟิลเตอร์ เป็นขั้นตอนที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของภาพและลดสัญญาณรบกวนที่อาจทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้โดยเฉพาะเมื่อระบบต้องตรวจจับจุดความร้อนในบริเวณที่สำคัญ เช่น แบริ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ฟิลเตอร์จะช่วยให้ภาพมีความคมชัดในบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์และลดผลกระทบจากข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้เลือกใช้ Gaussian ฟิลเตอร์ ดังสมการที่ 1 เนื่องจากฟิลเตอร์ชนิดนี้สามารถกระจายค่าความเข้มของภาพได้อย่างนุ่มนวล (smooth) ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์อุณหภูมิที่แม่นยำและเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

เมื่อ $G(x,y)$ คือ ค่าของ Gaussian function ที่จุดพิกเซล
x, y คือ ตำแหน่งของพิกเซลในภาพ
σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Gaussian distribution

Gaussian ฟิลเตอร์จะคำนวณค่าความเข้มใหม่ของแต่ละพิกเซล โดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักจากพิกเซลรอบข้าง ซึ่งจะทำให้ภาพมีความเรียบเนียน Gaussian ฟิลเตอร์จึงเหมาะสมกับงานวิจัยนี้เพราะจะช่วยให้การเปรียบเทียบอุณหภูมิในพื้นที่เฝ้าระวัง (ROI) มีความแม่นยำ ลดการตรวจจับผิดพลาดที่เกิดจาก noise ได้เป็นอย่างดี

2.2.3 การกำหนดพื้นที่ (Region of Interest - ROI) [4]

การกำหนดพื้นที่การวิเคราะห์เป็นขั้นตอนสำคัญในการประมวลผลภาพ เนื่องจากจะช่วยให้สามารถมุ่งเน้นไปยังบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ ทำให้การประมวลผลมีประสิทธิภาพมากขึ้นลดการทำงานที่ไม่จำเป็นในส่วนของภาพที่ไม่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับความผิดปกติ หลังจากที่ได้กำหนด ROI ระบบจะทำการตรวจจับค่าความเข้มสูงสุดภายในพื้นที่ที่กำหนดเพื่อประเมินหาค่าความเข้มสูงสุด I_{max} ในบริเวณ ROI ตามสมการที่ 2

$$I_{max}=\max(I(x,y)) \ \ where\ (x,y)\in ROI \quad (2)$$

เมื่อทราบค่าความเข้มสูงสุดแล้วจะทำการแปลงให้เป็นค่าอุณหภูมิ T โดยอ้างอิงจากอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดของระบบตามสมการที่ 3

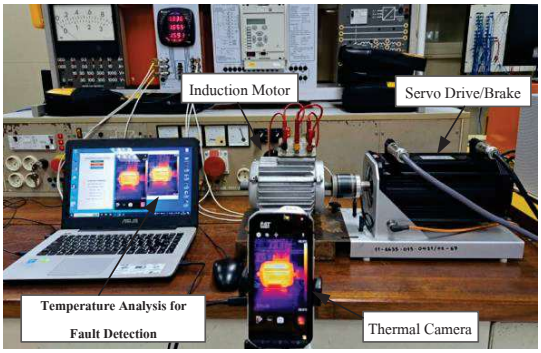
$$T=T_{min}+(\frac{I_{max}}{I_{ref}})\times(T_{max}-T_{min}) \quad (3)$$

เมื่อ $(x,y)\in ROI$ คือ ค่าที่นำมาคำนวณต้องอยู่ภายในพื้นที่ ROI
$T(x,y)$ คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง x, y
$I(x,y)$ คือ ค่าความเข้มของพิกเซลที่ตำแหน่ง x, y
I_{ref} , $Imin, Imax$ คือ ค่าความเข้มอ้างอิง,ต่ำสุด,สูงสุดในภาพ
$Tmin, Tmax$ คือ อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดที่ตรวจจับได้

ในขั้นตอนสุดท้าย จะเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้กับเกณฑ์ที่ตั้งไว้ $T_{threshold}$ ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าปกติ จะทำการแจ้งเตือนเพื่อให้ทราบว่าพบความผิดปกติขึ้นเช่น ในแบริ่ง หรือ ขดลวดสเตเตอร์

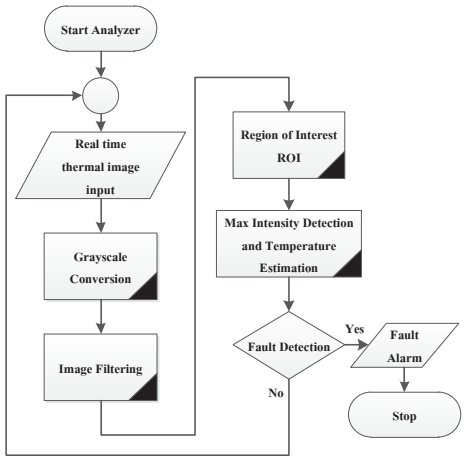
3. วิธีการทดลอง

ผู้วิจัยพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา Python เพื่อสร้างระบบวิเคราะห์อุณหภูมิในการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ประกอบด้วยความผิดปกติของแบริ่งและความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ องค์ประกอบในการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 มีหลักการทำงานเริ่มต้นจากการรับภาพวิดีโอจากกล้องตรวจจับความร้อนเข้าสู่คอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยเลือกใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน CAT FLIR (Forward-Looking Infrared) มีความสามารถในการวัดค่าอุณหภูมิในช่วง -20 ถึง 120 องศาเซลเซียส ภาพที่ได้มีลักษณะความแตกต่างของอุณหภูมิในรูปแบบของสีหรือระดับความเข้ม

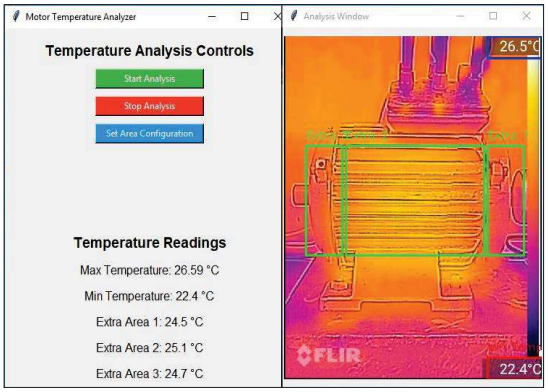


รูปที่ 1 วิธีการทดลองหาความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เช่น สีแดง-เหลืองจะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง สีน้ำเงิน-เขียวจะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ นำภาพที่ได้ส่งต่อเข้าสู่การประมวลผลบนโปรแกรมวิเคราะห์ภาพดังรูปภาพที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการประมวลผลภาพวิเคราะห์อุณหภูมิของมอเตอร์



รูปที่ 3 โปรแกรมวิเคราะห์อุณหภูมิการตรวจจับความผิดปกติมอเตอร์

การวิเคราะห์หาความผิดปกติของมอเตอร์จะเริ่มต้นจากการลดข้อมูลที่ไม่จำเป็นโดยให้เหลือเพียงค่าความเข้มของสีด้วยหลักการเปลี่ยนสีของภาพเป็นแบบขาวดำ จากนั้นจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของภาพและลดสัญญาณรบกวนด้วยการฟิลเตอร์ภาพ ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของมอเตอร์จะกำหนดพื้นที่เฝ้าระวังเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนตำแหน่งแบริ่งหน้าหลังของมอเตอร์และส่วนของขดลวดสเตเตอร์ การตรวจสอบความผิดปกติของแบริ่งจะอาศัยหลักการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของตำแหน่งแบริ่งกับพื้นที่โดยรอบบริเวณเฝ้าระวัง และในส่วนของการตรวจสอบความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์จะอาศัยหลักการดูค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในพื้นที่เฝ้าระวัง เมื่อค่าอุณหภูมิในพื้นที่เฝ้าระวังเป็นไปดังเงื่อนไขที่กำหนดไว้ระบบก็จะแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ องค์ประกอบของโปรแกรมระบบวิเคราะห์อุณหภูมิในการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยหน้าต่างหลัก ๆ 2 ส่วน คือส่วนการตั้งค่าการทำงานแสดงผลค่าอุณหภูมิและการควบคุมการวิเคราะห์ ส่วนการแสดงผลภาพอุณหภูมิในพื้นที่เฝ้าระวังที่ผู้ใช้ได้กำหนดไว้

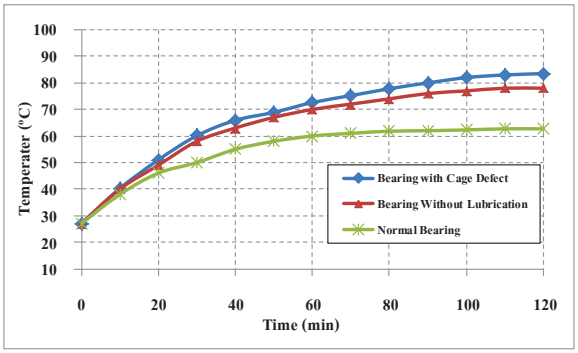
ผู้วิจัยทำการกำหนดความผิดปกติของแบริ่งโดยแบ่งลักษณะของแบริ่งในการทดสอบออกเป็น 3 ตัวอย่างได้แก่ แบริ่งใหม่ปกติ แบริ่งฝืดไม่มีสารหล่อลื่น และแบริ่งที่มีปัญหาโครงยึดลูกปืน แสดงดังรูปที่ 4 ในส่วนของความผิดปกติที่ขดลวดสเตเตอร์ผู้วิจัยกำหนดให้กระแสในขดลวดเฟสใดเฟสหนึ่งมีค่าสูงกว่าเฟสอื่น ๆ โดยการลัดวงจรรอบของขดลวด จากนั้นทำการทดสอบความผิดปกติของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดขึ้น



รูปที่ 4 ตัวอย่างแบริ่งที่ใช้ในการทดสอบ

4. ผลการทดลอง

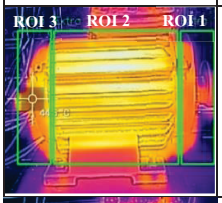
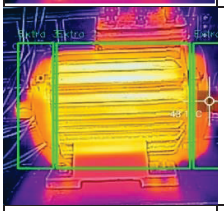
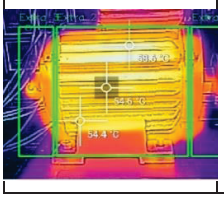
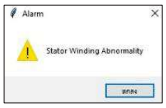
ทำการเก็บข้อมูลค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งการติดตั้งแบริ่งของมอเตอร์จากตัวอย่างแบริ่งทั้ง 3 เป็นเวลา 120 นาที โดยให้มอเตอร์ทำงานแบบไร้โหลดผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อุณหภูมิบนมอเตอร์ที่เกิดจากสภาพของแบริ่ง

จากรูปที่ 5 พบได้ว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของแบริ่งไม่มีน้ำมันหล่อลื่นจะสูงกว่าแบริ่งปกติและมีอัตราเพิ่มขึ้นที่เร็วกว่า ในส่วนของแบริ่งที่มีปัญหาโครงยึดลูกปืนจะมีอุณหภูมิเพิ่มอย่างต่อเนื่องในอัตราที่สูงกว่าสถานะอื่น ๆ จากกราฟข้างต้นจึงเป็นข้อมูลยืนยันได้ว่าข้อบกพร่องของแบริ่งส่งผลต่อค่าอุณหภูมิบนมอเตอร์ ซึ่งสามารถนำไปกำหนดเป็นเงื่อนไขในการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ได้ จากนั้นผู้วิจัยทดสอบการทำงานของระบบวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทำงานของระบบวิเคราะห์อุณหภูมิ

การเกิดความผิดปกติ	อุณหภูมิที่ตรวจจับได้	การแจ้งเตือน,ความแม่นยำ
	Avg. Temp of ROI = 39.5 °C Center Temp of ROI = 44.5 °C	 "Rear Bearing Fault" Accuracy = 96%
	Avg. Temp of ROI = 38 °C Center Temp of ROI = 43.1 °C	 "Front Bearing Fault" Accuracy = 94%
	ΔT of ROI > 3°C	 "Stator Winding Abnormality" Accuracy = 86%

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดอุณหภูมิสูงขึ้นในตำแหน่งของแบริ่งมอเตอร์ซึ่งได้แก่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่เฝ้าระวัง (Center of ROI 1,3) จนอุณหภูมิเกินค่า $T_{threshold}$ ที่ได้กำหนดไว้ 5 องศาเซลเซียส ระบบก็จะแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทราบถึงความผิดปกติของแบริ่งมอเตอร์โดยมีค่าความแม่นยำสูงสุด 96% ในส่วนของความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ระบบจะวิเคราะห์หาค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิบนพื้นที่เฝ้าระวัง (ROI 2) เมื่ออุณหภูมิในพื้นที่มีความแตกต่างเกินค่า $T_{threshold}$ ที่ได้กำหนดไว้ 3 องศาเซลเซียส ระบบก็จะแจ้งเตือนให้ทราบถึงความผิดปกติของขดลวดสเตเตอร์ทันทีโดยมีค่าความแม่นยำ 86%

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพแบบเรียลไทม์ ระบบสามารถตรวจจับความผิดปกติในบริเวณแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ได้อย่างแม่นยำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความผิดปกติในแบริ่งและขดลวดสเตเตอร์ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในพื้นที่ที่เฝ้าระวัง และเมื่อค่าที่วัดได้เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ระบบสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้ทันทีซึ่งช่วยลดความเสี่ยงของความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับมอเตอร์และเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน นอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีศักยภาพในการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงเป็นก้าวสำคัญในการพัฒนาระบบวิเคราะห์อุณหภูมิแบบเรียลไทม์สำหรับการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ และยังมีโอกาสในการต่อยอดไปสู่การใช้งานจริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Tiwari, D. Basak and S. P. Das, "Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Electrical Machines – A Review", IEEE International Conference ICIT (2006), pp. 3061-3066.

[2] A.G. Garcia-Ramirez, L.A. Morales-Hernandez, R.A. Osornio-Rios,A.Garcia-Perez and R.J. Romero-Troncoso, "Thermographic technique as a complement for MCSA in induction motor fault detection",presented at the *IEEE International Conference on Electrical Machines (IEEEICEM'14)*, Sep, 2014.

[3] N. R. Pal and S.K. Pal. "A review on image segmentation techiniques",*Pattern Recognit*, vol. 26, no. 9, pp. 1277-1294, 1993.

[4] M. Sabouri, M. Ojaghi, J. Faiz, A. J. Marques, "New Technique for Identifying Bearing Faults in Three-Phase Induction Motors", presented at the *42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society (IEEE-IECON'16)*, Oct, 2016.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ผลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

Effect of Voltage Signal on Wireless Power Transmission Efficiency

วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง ต้นตระการ เผยกลิ่น ธีรภัทร บุตร์เพชร์และพิชญา สุกใส
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิศูนย์สุพรรณบุรี
E-mail: wisut.t@rmusb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายโดยการเปลี่ยนแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าทางภาคส่งกำลังไฟฟ้าที่มีลักษณะแตกต่างกันจำนวน 3 รูปแบบได้แก่ 1.รูปคลื่นสัญญาณไซน์ 2.รูปคลื่นสัญญาณแบบสี่เหลี่ยม และ 3.รูปคลื่นสัญญาณแบบสามเหลี่ยม ทั้ง 3 รูปคลื่นทำการเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณโดยการใช้วงจรไฟฟ้าที่ควบคุมจากไอซีที่แตกต่างกันและใช้สวิตช์เป็นอุปกรณ์ในการเลือกรูปคลื่นสัญญาณที่นำมาใช้งาน จากนั้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะถูกส่งมายังขดลวดภาคส่งเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กผ่านแกนอากาศทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดภาครับ โดยระยะห่างการส่งกำลังไฟฟ้าระหว่างภาคส่งกับภาครับที่ทำการทดลองมีระยะห่าง 6 เซนติเมตรและอุปกรณ์ภาครับกำลังไฟฟ้าต่อกับหลอดแอลอีดี ขนาด 5 วัตต์ จากผลการทดลองการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสัญญาณแบบรูปคลื่นไซน์ได้กำลังดีสุดที่ 0.164%

คำสำคัญ: การส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย, รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า, ความถี่สูง

Abstract

This paper studies the efficiency of wireless power transmission by change the voltage signal of the power transmission section with 3 different characteristics: 1. Sine wave signal, 2. Square wave signal, and 3. Triangle wave signal. All three waveforms are transformed by passing through different IC controlled electrical circuits and using switches as the device to select the waveform used. The voltage waveform signal is sent to the transmitting coil to create magnetic flux through the air core to create an induced electromotive force in the receiving coil. The distance between the transmitter and receiver in the experiment is 6 cm. and the receiver is connected to a 5 W LED. The experimental results of transmitting sine wave signal power obtained the best power at 0.164%.

Keywords: wireless power transmission, voltage waveform, high frequency

1. บทนำ

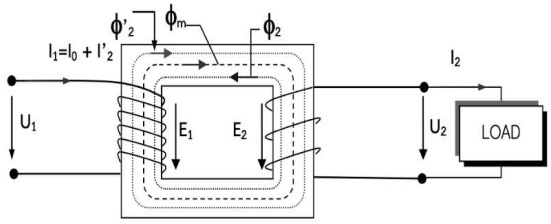
ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลังงานเพื่อสร้างความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตของมนุษย์กันเพิ่มมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมหรือที่พักอาศัยโดยการใช้อุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานรูปหนึ่งมาเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความน่าสนใจซึ่งพลังงานไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานอื่นได้ง่ายอาทิเช่น พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานแสงอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรูปคือหลอดไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลคือมอเตอร์ไฟฟ้า แต่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าไม่สามารถกักเก็บได้เหมือนพลังงานรูปแบบอื่น ดังนั้นในการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงมีความจำเป็นที่ต้องผลิตให้เพียงพอกับการใช้โดยการผลิตกำลังงานไฟฟ้าส่วนมากผลิตมาจากโรงต้นกำลังซึ่งโรงต้นเหล่านี้จะต้องอยู่ใกล้กับแหล่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตจึงจำเป็นต้องมีการส่งกำลังไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลโดยอาศัยสายตัวนำเป็นตัวส่งผ่านพลังงานไฟฟ้า

เนื่องจากการส่งกำลังไฟฟ้านิยมใช้ระบบแรงดันไฟฟ้าคงที่แต่มีการส่งในหลายระดับแรงดันขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ส่งกับระยะทางที่ใช้ส่งเพื่อลดการสูญเสียในระบบส่งกำลัง ดังนั้นหากมีการใช้กำลังไฟฟ้าในปริมาณมากทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบสูงขึ้นตามขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ส่ง ซึ่งการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสามารถส่งผ่านได้สะดวกแต่เนื่องจากลักษณะพื้นที่ในแต่ละพื้นอาจมีลักษณะคดเคี้ยวหรือขุ่งยากในการลากสายตัวนำ เพราะฉะนั้นจึงเป็นปัญหาในการติดตั้งรวมไปถึงการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวความคิดที่จะศึกษาวิธีการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายโดยปัจจุบันได้มีการศึกษาการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายอาทิเช่น การศึกษาผลของความถี่ต่อระยะการส่งกำลังไฟฟ้า ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เพื่อต้องการให้ค่าสูญเสียของการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายน้อยที่สุด ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เมื่อจ่ายแรงดันเป็นสัญญาณไซน์ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็กรอบขดขวดตัวนำนั้น และถ้าเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กในบริเวณแกนที่เป็นวงจรแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่1. ซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับขนาดของความถี่และรูปร่างของไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนเข้า เมื่อพันจำนวนตัวนำให้มีจำนวนรอบเพิ่มขึ้นและมีเส้นแรงแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงในวงจรแม่เหล็กจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นตามความสัมพันธ์ดังที่ (1) และ (2)



รูปที่ 1. หม้อแปลงไฟฟ้า

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \emptyset_1 \quad (1)$$

$$E_2 = 4.44 f_2 N_2 \emptyset_2 \quad (2)$$

เมื่อ

E_1 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านเข้า
E_2 คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้านออก
f_1 คือ ค่าความถี่ไฟฟ้าด้านเข้า
f_2 คือ ค่าความถี่ไฟฟ้าด้านออก
N_1 คือ จำนวนรอบด้านเข้า
N_2 คือ จำนวนรอบด้านออก
$\emptyset_1$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กด้านเข้า
$\emptyset_2$ คือ เส้นแรงแม่เหล็กด้านออก

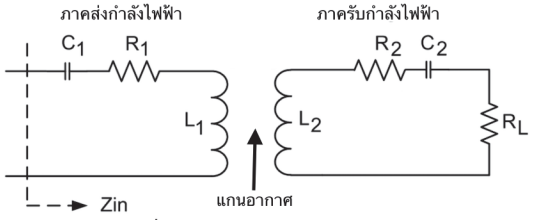
2.2 เรโซแนนซ์

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อใส่พลังงานให้กับวัตถุ จะทำให้วัตถุสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติถ้าความถี่ของพลังงานที่ให้กับวัตถุมีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่นตามธรรมชาติของวัตถุนั้นเป็นผลทำให้วัตถุนั้นรับพลังงานเข้าไปได้ดีที่สุด การสร้างเรโซแนนซ์ทางสภาพวงจรทางไฟฟ้าที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ ความต้านทาน(R) ตัวเหนี่ยวนำ(L) ตัวเก็บประจุ(C) ที่นำมาต่อ อนุกรม ขนาน หรือผสม ที่ทำให้กระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลในวงจรร่วมเฟสกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้และถ้าให้ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงทำให้มีผลต่อค่ารีแอกแตนซ์เชิงเหนี่ยวนำ(X_L)และค่ารีแอกแตนซ์เชิงตัวเก็บประจุ(X_C)โดยค่ารีอกแตนซ์ของทั้งสองค่ามีทิศทางที่หักล้างกันตลอดทุกค่าความถี่ดังนั้นจึงทำให้มีค่าความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าทั้งสองเท่ากัน ($X_L = X_C$) เรียกความถี่ที่เกิดขึ้นใหม่นี้มาความถี่เรโซแนนซ์(f_r) โดยหาค่าได้จากสมการ(3) ซึ่งค่าความถี่ที่จุดนี้ทำให้อิมพิแดนซ์(Z) รวมของระบบต่ำสุด

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (3)$$

2.3 การถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

การถ่ายโอนกำลังงานแบบไร้สายอาศัยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างชุดส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและชุดรับกำลังไฟฟ้าเหมือนกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า แต่แตกต่างกันตรงที่หม้อแปลงไฟฟ้าใช้แกนเหล็กเป็นตัวกลางในการนำเส้นแรงแม่เหล็กมาสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ชุดรับกำลังไฟฟ้าแต่หลักการถ่ายโอนกำลังงานแบบไร้สายใช้แกนกลางเป็นอากาศดังแสดงในรูปที่ 2. ในการเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กมายังชุดรับกำลังไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติค่าความต้านทานความเป็นแม่เหล็กของอากาศจะสูงกว่าแกนเหล็กทำให้การเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กไปยังชุดรับกำลังไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงแคลื่อนเหนี่ยวนำได้น้อยกว่า โดยถ้าหากต้องการให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไปยังภาครับได้จึงต้องอาศัยการเพิ่มค่าความถี่ให้มากขึ้น

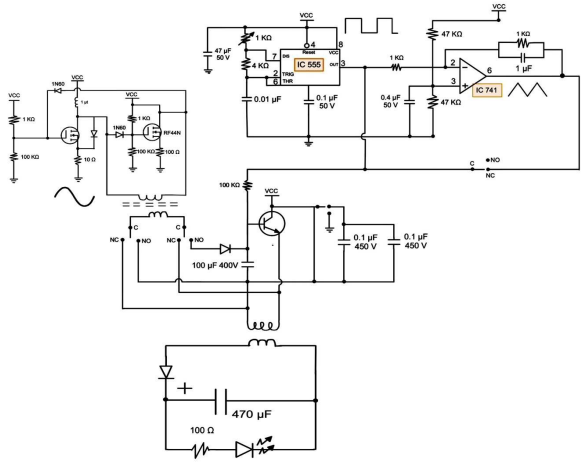


รูปที่ 2. หลักการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย

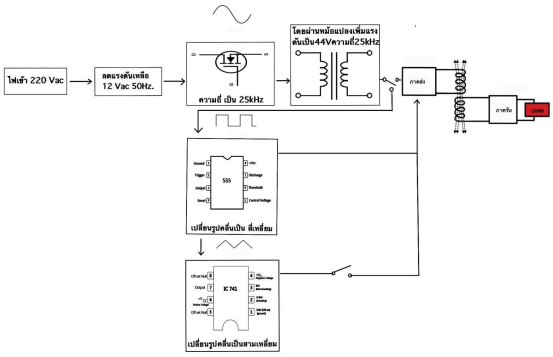
3. โครงสร้างและการออกแบบการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายประกอบไปด้วยการสร้างวงจรสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบประกอบไปด้วยวงจรการสร้าง 1.สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ 2.สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม 3.สัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 3. เพื่อทำการเลือกสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้มาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดตัวนำเพื่อทำให้เกิดค่ากระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดโดยค่ากระแสนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไปสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดและเส้นแรงแม่เหล็กจะไหลไปตามวงจรแม่เหล็กซึ่งการส่งผ่านแกนอากาศนั้นมีค่าความต้านทานแม่เหล็กสูงเส้นแรง

แม่เหล็กนี้จึงไหลไปสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไม่สะดวก จึงทำการออกแบบรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งไปให้มีค่าความถี่สูงขึ้นเพื่อทำให้สามารถสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าฝั่งภาครับได้โดยได้มีการออกแบบระยะห่างระหว่างภาครับกับภาคส่งที่ 6 เซนติเมตร และจำนวนรอบของขดลวดของภาคส่งกับภาครับมีจำนวนรอบที่เท่ากันซึ่งจะแสดงไดอะแกรมการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.



รูปที่3. วงจรการสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสำหรับส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

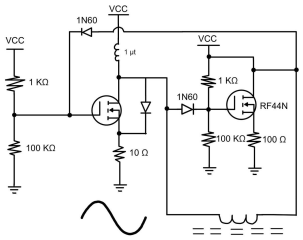


รูปที่ 4. ไดอะแกรมการทดลอง

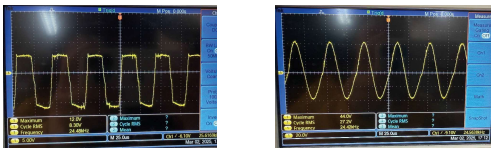
4. ผลการทดลอง

4.1 การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์

การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ได้มาจากวงจรการสร้างดังแสดงในรูปที่ 5. โดยจากวงจรทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าจาก 220 V ความถี่ 50 Hz ให้เหลือ 24 V, 50 Hz จากนั้นทำการต่อผ่านวงจรสวิตช์ชิ่งเพื่อเพิ่มความถี่ให้สูงขึ้นแต่ระดับแรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 12 V, 24.5 kHz ดังแสดงในรูปที่ 6(ก). และส่งสัญญาณผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นและทำให้ได้คลื่นสัญญาณไฟฟ้าเป็นลักษณะไซน์ระดับแรงดันไฟฟ้า 27.5V, 24.5 kHz ดังแสดงในรูปที่ 6(ข). และสัญญาณรูปคลื่นส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำทางภาครับของวงจรเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังภาครับต่อไป



รูปที่ 5. วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์

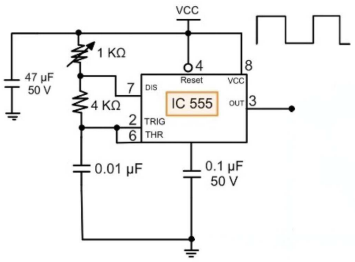


(ก) (ข)

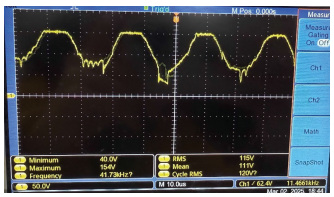
รูปที่6 (ก). สัญญาณรูปคลื่นที่ออกจากวงจรสวิตช์
(ข). สัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์

4.2 การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม

การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์มาต่อผ่านวงจรที่ใช้ IC555 โดยวงจรที่ใช้แสดงในรูปที่ 7. เพื่อทำการเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรให้เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีระดับแรงดันไฟฟ้า 115V ความถี่ 40 kHz ดังแสดงในรูปที่ 8. และสัญญาณรูปคลื่นส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำทางภาครับของวงจรเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังภาครับต่อไป



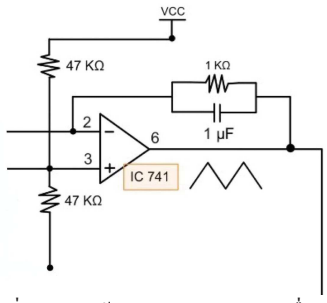
รูปที่ 7. วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 8. สัญญาณแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

4.3 การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยม

การสร้างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นสามเหลี่ยมจะนำสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์มาต่อผ่านวงจรที่ออกจากรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมาผ่านวงจรการทำงานร่วมกับไอซี 741 โดยวงจรที่ใช้แสดงในรูปที่ 9. เพื่อทำการเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรให้เป็นรูปคลื่นสามเหลี่ยมมีระดับแรงดันไฟฟ้า 133V ความถี่ 47.9 kHz ดังแสดงในรูปที่ 10. และสัญญาณรูปคลื่นส่งไปยังขดลวดเหนี่ยวนำทางภาครับของวงจรเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังภาครับต่อไป



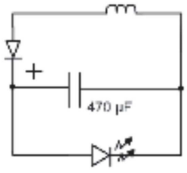
รูปที่ 9. วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม



รูปที่ 10. วงจรสร้างสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม

4.4 ผลการหาค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า

จากการสร้างรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งผ่านมายังขดลวดภาคส่งเพื่อสร้างเส้นแรงแม่เหล็กและทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังขดลวดของภาครับโดยในการทดลองนี้ทำการเก็บผลของค่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า AMPROBE รุ่น ACD-41PQ และทางภาครับกำลังไฟฟ้าต่อกับโหลดทางไฟฟ้าขนาด 5 W ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่รับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงและต่อกับหลอด LCD โดยวงจรทางภาครับจะมีวงจรดังแสดงในรูปที่ 11. และผลการทดลองประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายของวงจรภาคส่งทั้ง 3 คลื่นสัญญาณจะแสดงผลในตารางที่ 1 โดยประสิทธิภาพดีการส่งดีที่สุดอยู่ที่รูปคลื่นไซน์ที่ 0.167%



รูปที่ 11. วงจรภาครับสัญญาณต่อร่วมกับโหลด LCD

ตารางที่ 1. ประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

สัญญาณรูปคลื่น	ภาคส่ง p_{in} (W)	ภาครับ			ประสิทธิภาพ (%)
		กระแส (mA)	แรงดัน (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	
รูปคลื่นไซน์	30	23.8	2.07	0.0492	0.164
รูปคลื่นสี่เหลี่ยม	30	0.12	1.79	0.00021	0.00017
รูปคลื่นสามเหลี่ยม	30	0	0.60	0	0

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกันโดยอาศัยการสร้างเส้นแรงแม่เหล็กให้ไหลผ่านแกนอากาศเพื่อไปสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำยังขดลวดภาครับพบว่าที่สัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์นั้นได้ประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าดีที่สุดที่ 0.164% ซึ่งรูปคลื่นสีเหลี่ยมนั้นได้ประสิทธิภาพต่ำกว่าเนื่องจากลักษณะของรูปคลื่นที่สร้างจากวงจรจะเป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความถี่เหมือนกับสัญญาณรูปคลื่นไฟฟ้าสามเหลี่ยมทำให้การเส้นแรงแม่เหล็กไม่ตัดกลับไปกลับมาส่งผลให้การสร้างแรงเคลื่นไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ภาครับมีค่าน้อย ในส่วนรูปคลื่นสามเหลี่ยมนั้นที่มีประสิทธิภาพการส่งผ่านเป็นศูนย์เนื่องจากแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ภาครับมีค่าน้อยกว่าจุดทำงานของโหลดที่นำมาใช้ทดลองดังนั้นจึงไม่สามารถทำงานได้

เอกสารอ้างอิง

[1] อิทธิพล เหลาพรมและสมโภชน์ วงเขียด. (2560). ชุดสาธิตการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายด้วยหลักการความถี่สภาวะเรโซแนนซ์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี(สทวท)*(น.79-86).ปีที่ 4. ฉบับที่2. (กรกฎาคม – ธันวาคม)

[2] เอกชัย ชัยดี ภานุพงศ์ โวหารและวัฒมล แก้วถึง(2560). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายแบบใช้ขดส่งกำลังสองขด. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา* (น37-45).ปีที่ 2. ฉบับที่1. (มกราคม - มิถุนายน)

[3] ภริดา จีบกลำ่(2564). การศึกษาเชิงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบพลวัตด้วยความถี่เรโซแนนซ์. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*(651-660).ปีที่ 31. ฉบับที่4. (ตุลาคม - ธันวาคม)

การออกแบบและวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียว โดยใช้เทคนิคการปรับความกว้างพัลส์แบบยูนิโพลาร์และไบโพลาร์

Unipolar and bipolar pulse width modulation techniques are used in the design and analysis of a single-phase voltage source inverter.

ธเนศ ภู่กัน[1] กำไร จันทร์พรม[2] เอกชัย ชูเที่ยง[3*]
[1-3]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า วิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3
E-mail: ek2529@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์เฟสเดียวและอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์เฟสเดียวเสร็จสิ้นในส่วนแรก พบว่ากระแสไฟขาออกและแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์เป็นสองเท่าและมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์ ในส่วนที่สองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Unipolar และ Bipolar PWM จะถูกนำเสนอสำหรับอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์เฟสเดียวที่มีและไม่มีตัวกรองใน MATLAB SIMULINK ทางเลือกที่เหมาะสมของอัตราส่วนการปรับความถี่ (mf) โดยละเอียดสำหรับ PWM แบบไบโพลาร์และแบบยูนิโพลาร์ ค่าที่ไม่ใช่จำนวนเต็มของ mf ส่งผลให้เกิดฮาร์มอนิกย่อยซึ่งแทบจะกรองไม่ออกและทำให้เกิดการสูญเสียอย่างมีนัยสำคัญในการใช้งานระบบไฟฟ้าใดๆ สังเกตว่า Unipolar PWM มีข้อได้เปรียบในแง่ของประสิทธิภาพ มันมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าและสร้าง EMI น้อยลง นอกจากนี้ ความถี่ในการ Switching จะกลายเป็นสองเท่าและแอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งในกรณีของ Unipolar PWM ดังนั้น ปริมาณความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD) ของกระแสเอาท์พุตและแรงดันเอาท์พุตจึงลดลง จึงช่วยปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและทำให้ตัวกรอง กรองง่ายขึ้น

คำสำคัญ การปรับความกว้างพัลส์, การบิดเบือนฮาร์มอนิกรวมของกำลัง, ไบโพลาร์ PWM, Unipolar PWM

Abstract

Abstract— This research work is organized in two sections. Performance comparison of single- phase half bridge inverter and single - phase full bridge inverter is done in the first section. It is observed the output current and output voltage of full bridge inverter is twice and generates less total harmonic distortion as compared to half bridge inverter. In the second section, performance compari: Angsana New # 14 Bipolar PWM is presented for single phase full bridge inverter with and without filter in MATLAB SIMULINK. The proper choice of Frequency Modulation Ratio (mf) is discussed in detail for bipolar and unipolar PWM scheme. Non integer value of mf results in sub harmonics which are nearly unfilterable and cause significant losses in any power system application. It is observed that Unipolar PWM has an advantage in terms of efficiency; it offers less switching losses and generates less EMI. Also, the switching frequency becomes twice and voltage amplitude is reduced to half in case of unipolar PWM. Therefore, total harmonic distortion (THD) content of output current and output voltage is decreased, thus improving the power quality and making filter easier.

Keywords: Pulse Width Modulation, Power Total Harmonic Distortion, Bipolar PWM, Unipolar PWM.

1. บทนำ

อินเวอร์เตอร์นั้นเป็นตัวแปลงไฟฟ้ากำลังที่แปลงแหล่งจ่ายไฟ dc เป็นรูปคลื่นไฟฟ้ากระแสสลับ อินพุต dc สามารถนำมาจากแบตเตอรี่หรือวงจรเรียงกระแส อินเวอร์เตอร์อาจจำแนกได้เป็นคลื่นสี่เหลี่ยม คลื่นกึ่งสี่เหลี่ยม หรือคลื่นไซน์ที่บิดเบี้ยวต่ำตามรูปคลื่นเอาท์พุต คลื่นสี่เหลี่ยมและกึ่งสี่เหลี่ยมมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูง ดังนั้นจึงถูกจำกัดสำหรับการใช้งานที่ใช้พลังงานต่ำและปานกลาง แต่สำหรับการใช้งานที่มีกำลังสูงต้องการรูปคลื่นที่มีคุณภาพดีกว่า [1] คุณภาพกำลังไฟฟ้าของไซน์ คลื่นบางครั้งมีความสำคัญมากกว่าปริมาณ แผนการควบคุม PWM ที่เหมาะสมสามารถลดการบิดเบือนฮาร์มอนิกได้ พวกมันถูกนำไปใช้ในการใช้งาน เช่น ตัวขับความเร็วที่ปรับได้ (ASD), เครื่องจ่ายไฟสำรอง (UPS), เครื่องทำความร้อนแบบเหนี่ยวนำ และระบบส่งไฟฟ้า

กระแสตรงแรงดันสูง เทคนิค PWM ควบคุมแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์ดังกล่าวมีชื่อว่า PWM Inverters

เทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ (PWM) เป็นวิธีการเปลี่ยนความกว้างพัลส์ตามเวลาในการควบคุมไฟฟ้า สัญญาณดิจิตอลมีเพียงสองสถานะ คือ เปิดและปิด ดังนั้นจึงสามารถควบคุมสถานะการเปิดและปิดของ LED ได้อย่างง่ายดาย ในทำนองเดียวกัน การเปิด/ปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถควบคุมได้อย่างง่ายดายโดยใช้ไดรเวอร์ที่เหมาะสม เช่น ทรานซิสเตอร์, IGBT, รีเลย์, ไตรแอค ฯลฯ แต่เทคนิค PWM จะจัดการกับสถานการณ์ที่คุณต้องการมากกว่าการควบคุมการเปิดและปิดอย่างชาญฉลาด เช่นเดียวกับการควบคุมความสว่างของ LED หรือความเร็วของมอเตอร์ เทคนิค PWM ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและเป็นหัวข้อของการวิจัยอย่างเข้มข้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา [2] เทคนิค PWM มีบทบาทสำคัญในการควบคุมตัวควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น ชอปเปอร์ ตัวแปลง dc เป็น ac วงจรเรียงกระแส ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ไดรฟ์ เทคนิค PWM มีข้อดีหลายประการ การสูญเสียพลังงานในอุปกรณ์สวิตชิ่งต่ำมากและมีเสียงรบกวนน้อยกว่า สามารถควบคุมฮาร์มอนิกและแรงดันเอาต์พุตให้น้อยที่สุดได้ [3] เทคนิค PWM แบ่งออกเป็นสองประเภทพื้นฐาน ได้แก่ เทคนิคอนาล็อกและดิจิตอล เทคนิคแอนะล็อกและตัวควบคุมแอนะล็อกมีข้อเสียเช่น มีความไวต่อเสียงรบกวนและได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือเนื่องจากการแปรผันของส่วนประกอบ [4] ได้รับการแก้ไขและยืดหยุ่นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคดิจิทัล ตัวควบคุมแบบอะนาล็อกต้องการส่วนประกอบแยกที่เชื่อมต่อถึงกันจำนวนมาก ซึ่งจะเพิ่มต้นทุนและความซับซ้อนของกระบวนการผลิต นอกจากนี้ ยังต้องการแหล่งจ่ายไฟจำนวนมากสำหรับส่วนประกอบแยกจำนวนมาก [5]

ดังนั้นเทคนิค PWM แบบดิจิทัลจึงดีกว่า มีความยืดหยุ่นมากกว่าและเสี่ยงต่อเสียงรบกวนจากสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า เทคนิค Digital PWM สามารถนำไปใช้ได้โดยใช้ DSP, ไมโครคอนโทรลเลอร์, ไมโครโพรเซสเซอร์ หรือ ASIC แต่การมาถึงของ FPGA นำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในแอปพลิเคชันควบคุม PWM แบบดิจิทัล [6] FPGA นำเสนอโซลูชันทางเลือกที่ดีกว่าสำหรับเทคนิค PWM แบบดิจิทัล เนื่องจากมีความเร็วในการคำนวณสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ และ DSP [7]

วัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า โดยเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ (PWM) ในการออกแบบและวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวแบบยูนิโพลาร์และไบโพลาร์

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริด

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ใช้สำหรับการจำลอง ตัวแปลงได้รับการทดสอบโดยใช้สวิตช์ IGBT พร้อมพัลส์เกตที่สร้างโดยบล็อกตัวกำเนิด PWM อินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ คอนเวอร์เตอร์สองตัวใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (VDC=400V), ความถี่ (1,000 Hz), ความถี่ของแรงดันเอาท์พุต (50 Hz) และดัชนีมอดูเลชั่น (m=0.8) Modulation Index (m) คืออัตราส่วนของสัญญาณควบคุม (Sinusoidal ในไบโพลาร์ PWM) ต่อสัญญาณพาหะ (สัญญาณสามเหลี่ยมใน Bipolar PWM)

$$m = Ec/Er \quad (1)$$

ค่าของดัชนีมอดูเลชั่นจะกำหนดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ [8] ควรสังเกตว่าการลดดัชนีการมอดูเลชั่นจะลดแรงดันเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์และในทางกลับกัน กระแสเอาท์พุตและแรงดันเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์และฟูลบริดจ์ตามลำดับพร้อมโหลด RL, R = 1 โอห์ม และ L = 5e-03 H

2.2 เทคนิคการปรับความกว้างพัลส์ไซน์แบบไบโพลาร์และแบบยูนิโพลาร์

Unipolar และ Bipolar เป็นเทคนิคการปรับความกว้างพัลส์แบบไซน์ เนื่องจากในสัญญาณควบคุมนี้เป็นสัญญาณแบบไซน์ สัญญาณไซน์ (สัญญาณอ้างอิง) ถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม (สัญญาณพาหะ) โดยใช้ตัวเปรียบเทียบที่สร้างสัญญาณเกตผลลัพธ์สำหรับสวิตช์อินเวอร์เตอร์ ความถี่เอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ถูกกำหนดโดยความถี่ของสัญญาณควบคุม ในขณะที่ดัชนีการมอดูเลต (m) ถูกควบคุมโดยแอมพลิจูดของสัญญาณควบคุม ความถี่สวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์สามารถกำหนดได้จากความถี่สวิตชิ่งสัญญาณพาหะ ความถี่สวิตชิ่งส่งผลต่อเอาท์พุตของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นฮาร์มอนิกจึงอยู่ที่ความถี่สวิตชิ่ง [9]

2.2.1. Bipolar Switching Scheme

รูปแบบการสลับขั้วแบบไบโพลาร์ที่ใช้กับอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์เรียกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตสลับระหว่างสองสถานะทั้งค่าบวกหรือลบของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ดังแสดงในรูป 1 (a) ในรูปแบบการสลับขั้วสองขั้ว จะมีการเปรียบเทียบสัญญาณพาหะและมอดูเลต สวิตช์อินเวอร์เตอร์จะเปิดทุกครั้งที่สัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะและในทางกลับกัน ผลลัพธ์ของเกตพัลส์ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) ใช้กับสวิตช์ S1 และ S4 ของอินเวอร์เตอร์ในขณะที่พัลส์เกตกลับด้านถูกจ่ายให้กับสวิตช์ S2 และ S3 ดังแสดงในรูป 1 (c)

2.2.2. Unipolar Switching Scheme

รูปแบบการสลับขั้วเดียวที่นำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์เรียกว่าอินเวอร์เตอร์สองระดับ เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตสลับระหว่างสองสถานะทั้งค่าบวกหรือลบของแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ดังแสดงในรูป 2 (c) ใน Unipolar PWM สัญญาณไซน์สองสัญญาณจะมีขนาด 180

องศา การเปลี่ยนเฟสจะดำเนินการโดยมีขนาดและความถี่เท่ากัน สัญญาณไซน์ซอยด์ทั้งสองถูกนำมาเปรียบเทียบกับพัลส์สามเหลี่ยมเดียวกัน สัญญาณเกตสำหรับสวิตช์ S1 ถูกสร้างขึ้นโดยการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงเชิงบวกและสัญญาณสามเหลี่ยมดังแสดงในรูป 2 (b) ในขณะที่เปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงแบบเลื่อนเฟส 180 องศาและสัญญาณสามเหลี่ยมส่งผลให้เกิดสัญญาณเกตสำหรับสวิตช์ S3 ดังแสดงในรูป 2 (c) สวิตช์ S2 มีการสลับเสริมเมื่อเปรียบเทียบกับ S1 และสวิตช์ S4 มีการสลับเสริมเมื่อเปรียบเทียบกับ S3

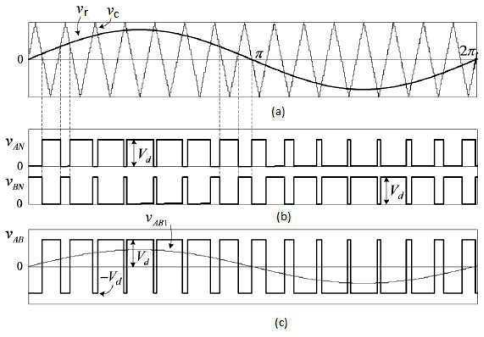


Fig. 1 Bipolar Switching Scheme

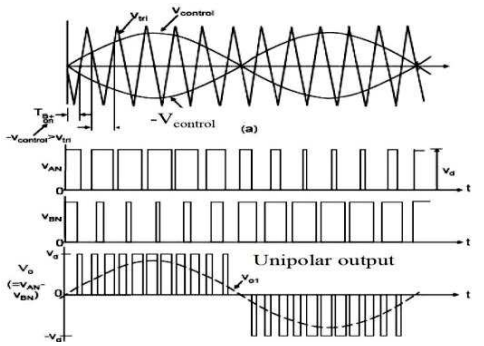


Fig. 2 Unipolar Switching Scheme

บีไอโพลาร์ SPWM อินเวอร์เตอร์ การจำลองผลลัพธ์ที่ไม่มี ฟิลเตอร์ รูปที่ 8 แสดงอินเวอร์เตอร์ Bipolar SPWM ที่มีแรงดัน dc = 100V และโหลด RL, R=1 โอห์ม และ L=5e-03 H พารามิเตอร์ที่สำคัญใน SPWM คือ Frequency Modulation Ratio (mf) ที่กำหนดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสเอาท์พุต

$$mf=fc/fm \quad (2)$$

การกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่สูงได้ง่ายกว่า ดังนั้นค่าอัตราส่วนการมอดูเลตความถี่ที่สูงกว่าจึงดีกว่าในบางครั้ง แต่การสูญเสียการสวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้นตามความถี่การสวิตชิ่งที่เพิ่มขึ้น [10] การเลือกอัตราส่วนนี้มีความสำคัญและขึ้นอยู่กับการใช้งาน สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะจะซิงโครไนซ์กัน เรียกว่า Synchronous PWM

ในกรณีที่ mf ควรสังเกตว่าเพื่อให้ได้สมมาตรครึ่งคลื่น (ไม่มีแม้แต่ฮาร์มอนิก) ค่าจำนวนเต็มคี่ของ mf ควรเลือกตามที่แสดงใน ที่ 4 เมื่อ mf = 9

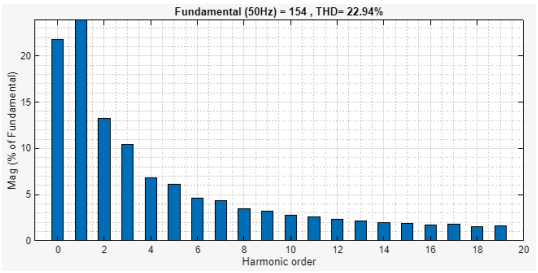


Fig. 3 Output current FFT analysis with m=1 and Fswitching = 9*50 (450Hz) without filter

3. การวิเคราะห์เปรียบเทียบของไบโพลาร์และยูนิโพลาร์อินเวอร์เตอร์พร้อมฟิลเตอร์

รูปแบบไบโพลาร์และยูนิโพลาร์ถูกนำเสนอในอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์รุ่นเดียวกันแต่มีการเพิ่มตัวกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่สองที่เชื่อมต่อกับแรงดันเอาต์พุตโดยมีความถี่ตัดเท่ากับ 340 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ถูกกรองและ %THD ของแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกรองสำหรับวงจรไบโพลาร์

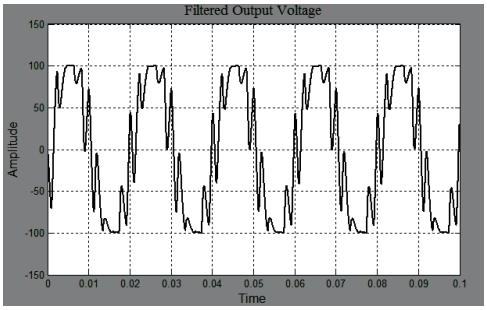


Fig. 4 Output Filtered Voltage of Bipolar Inverter with mf = 10 and m = 1

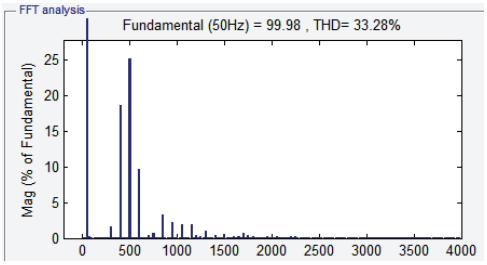


Fig. 5 Output Filtered Voltage FFT Analysis of Bipolar Inverter with mf = 10 and m = 1

รูปที่ 6 และ 7 แสดงแรงดันเอาต์พุตที่ถูกกรองและ %THD ของแรงดันไฟฟ้าที่ถูกกรองสำหรับวงจรแบบขั้วเดียว ค่าเดียวกัน mf และ m ถูกนำมาใช้เพื่อจุดประสงค์ในการเปรียบเทียบกับไบโพลาร์

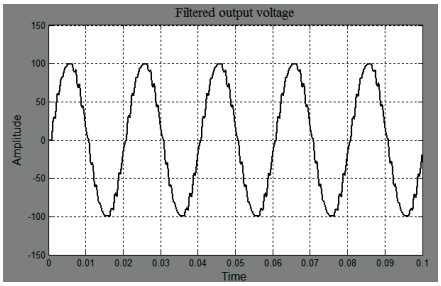


Fig. 6 Output Filtered Voltage of Unipolar Inverter with mf = 10 and m = 1

ผลการจำลองยืนยันว่าอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์นั้นกรองได้ง่าย THD ของแรงดันไฟฟ้าที่กรองสำหรับวงจรยูนิโพลาร์ต่ำกว่า 5% ตามที่แนะนำโดย IEEE Standard 519-2022

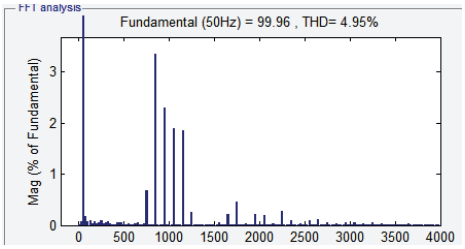


Fig. 7 Output Filtered Voltage FFT Analysis of Unipolar Inverter with mf = 10 and m = 1

ตารางที่ 1: การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างอินเวอร์เตอร์ Bipolar และ Unipolar PWM (มีและไม่มีตัวกรอง)

PWM Scheme	Fundamental	mf	m	%THD without filter		%THD With filter
				Voltage	Current	Voltage
Bipolar SPWM	50	10	1	99.93%	9.51%	33.28%
Unipolar SPWM	50	10	1	51.43%	2.51%	4.95%

4. ข้อสรุป

จากผลลัพธ์ที่ได้สรุปได้ว่าอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์ดีกว่าในแง่ของประสิทธิภาพและมี %THD ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ฮาล์ฟบริดจ์ ทางเลือกที่เหมาะสมของอัตราส่วนการปรับความถี่ (mf) แนะนำให้ใช้สำหรับโครงการแบบ Unipolar และ Bipolar ในส่วนต่อๆ ไป นอกจากนี้ ยังสรุปได้ว่า แบบ Unipolar ให้คุณภาพไฟฟ้าที่ดีกว่า ต้นทุนการกรองต่ำ และประสิทธิภาพที่สูงกว่า แบบ Bipolar

5.ข้อเสนอแนะ

1. การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Matlab/Simulink) ต้องใช้พารามิเตอร์จำนวนมาก

2. คอมพิวเตอร์ที่ใช้การจำลองทางคณิตศาสตร์ (Matlab/Simulink) ควรมีความเร็วในการประมวลผลที่ค่อนข้างสูง

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า แผนกไฟฟ้ากำลัง ฝ่ายวิชาการ วิทยาลัยเทคนิคสุโขทัย สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3

7.เอกสารอ้างอิง

[1] ASK. Choudhry, MS. Shehab, MA. Awal and MA. Razzak "Design and implementation of highly efficient pure sine-wave inverter for photovoltaic applications" Proc. IEEE Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), Dhaka, Bangladesh, May 2013.

[2] I.A Alexa and A. Onea "Fast calculating PWM technique of voltage source inverter" Proc. IEEE System Theory, Control and Computing (ICSTCC) , Romania, October 2014.

[3] PN. Enjeti, PD. Ziogas and JF. Lindsay "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: A critical evaluation" IEEE transactions on Industry Applications, vol. 26, pp.302-316, April 1990.

[4] Q. Chen, A. Feygenson, AW. Lotfi and KJ. Timm "Programmable digital controller for switched mode power conversion and power supply employing the same" Patent Number US6005377, December 1999.

[5] AM. Nazare "FPGA based single phase multilevel inverter" Proc. Of the second Intl. Conf. on Advances in Computer, Electronics and Electrical Engineering, India, 2013.

[6] V. Parkhi, S. Shilaskar, M. Tirmare and M. Jog "FPGA Implementation of PWM control technique for three phase induction motor drive" Proc. IEEE Emerging Trends in Enginering and Technology, Maharashtra, July 2008.

[7] RK. Rao, P. Srinivas and MVS. Kumar "Design and analysis of various inverters using different PWM techniques" The international journal of engineering and science (IJES), 2014.

[8] LM. Tolbert and TG. Habetler "Multilevel PWM methods at low modulation indices" IEEE transcations on power electronics, vol. 15, pp, 719-725, July 2010.

[9] RS. Dhekekar and MS. Sonune "Study of performance analysis of H-bridge VSI with sinusoidal pulse width modulation" International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), vol, 3, issue 12, December 2014

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับเพื่อผลิตไฮโดรเจน

Study and Comparison of Water Efficiency in the Electrolysis Process Using a Reversible Fuel Cell for Hydrogen Production

อดิศร เมรุแก้ว[1] ศุภชัย แก้วพวง[2] และอานนท์ อิศรมงคลรักษ์[3]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
E-mail: adisorn.m@tsu.ac.th[1], E-mail: suppachai.k@tsu.ac.th[2], E-mail: anone@webmail.npru.ac.th[3]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพของน้ำประเภทต่าง ๆ ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสโดยใช้ เซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับ (Reversible Fuel Cell ; RFC) เพื่อผลิตไฮโดรเจน ผลการทดลองพบว่าชนิดของน้ำมีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อย โดยน้ำดื่มให้อัตราการเกิดก๊าซสูงสุด รองลงมาคือน้ำกลั่นและน้ำแร่ อย่างไรก็ตามกระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซและระยะเวลาการอิเล็กโทรลิซิส เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า เวลาที่ใช้ในกระบวนการลดลงและอัตราการเกิดก๊าซเพิ่มขึ้น ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีพลังงานสะอาดต่อไป

คำสำคัญ : อิเล็กโทรลิซิส, เซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับ, การผลิตไฮโดรเจน, พลังงานสะอาด

Abstract

This study investigates the efficiency of different types of water in the electrolysis process using a reversible fuel cell (RFC) for hydrogen production. The experimental results indicate that the type of water has a minimal effect on hydrogen gas generation, with drinking water showing the highest generation rate, followed by distilled water and mineral water. However, electrical current plays a crucial role in determining both the gas generation rate and electrolysis duration. As the current increases, electrolysis time decreases, while the hydrogen gas generation rate increases. These findings provide insights into selecting optimal conditions for efficient hydrogen production using RFCs, contributing to advancements in clean energy technology.

Keywords: Electrolysis, Reversible Fuel Cell, Hydrogen Production, Clean Energy

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อนที่ทวีความรุนแรงขึ้นในปัจจุบัน หลายประเทศทั่วโลกจึงให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานทางเลือกที่สะอาดและยั่งยืนมากขึ้น เพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินและน้ำมัน โดยพลังงานไฮโดรเจนถือเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากสามารถนำมาพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม ระบบผลิตไฟฟ้า และการขับเคลื่อนยานพาหนะได้ เช่น รถยนต์ไฟฟ้าและยานอวกาศ เป็นต้น นอกจากนี้ ไฮโดรเจนยังมีศักยภาพในการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อรองรับการขนส่งทั้งทางบกและทางอากาศ โดยไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการทดสอบชุดผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับ ซึ่งเป็นกระบวนการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สะอาดและมีประสิทธิภาพสูงซึ่งอาจเป็นทางเลือกสำคัญสำหรับระบบพลังงานในอนาคต

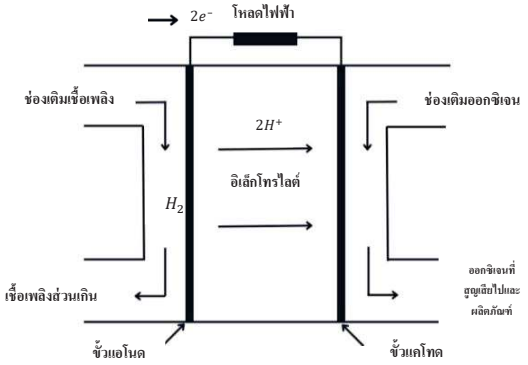
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

กระบวนแยกสลายด้วยไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอลิซิสชนิดสารละลาย (alkaline electrolysis) การให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อให้ไอออนในสารละลายอิเล็กทรอไลต์เคลื่อนที่ไปเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าที่ให้จะต้องให้

มากกว่าค่าโวลต์มาตรฐานที่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น ทั้งนี้ ข้อดีของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้คือ จะได้ไฮโดรเจนที่ มีความบริสุทธิ์สูง [1]

RFC เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว แอโนดและแคโทด สามารถสร้างไฟฟ้าด้วยหลักการเคมีไฟฟ้า โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดแต่ละด้าน เชื้อเพลิงหลักที่ใช้คือก๊าซไฮโดรเจน จะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนด ส่วนก๊าซออกซิเจนจะเข้าทางขั้วแคโทดทำหน้าที่เป็นสารออกซิแดนท์และใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าเชื้อเพลิงหลักไฮโดรเจน ผลของปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (e^-) ที่หลุดออกมาจากอะตอมของไฮโดรเจน ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของ เซลล์เชื้อเพลิง คือ ไฟฟ้ากระแสตรง, ความร้อน และน้ำบริสุทธิ์ ดังรูปที่ 1 [2]



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน RFC

โดยปฏิกิริยาทางเคมีของ RFC สามารถอธิบายดังสมการต่อไปนี้ [6]

ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด $\boldsymbol{H_2(g) \rightarrow 2H^+ + 2e^-}$ (1)

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด $\boldsymbol{1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O}$ (2)

ปฏิกิริยารวมของเซลล์ $\boldsymbol{H_2(g) + 1/2O(g)_2 \rightarrow H_2O + Energy}$ (3)

ปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิง RFC เริ่มจากปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด ซึ่งไฮโดรเจน แตกตัวเป็นโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ตามสมการที่ 1 โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกสร้างกระแสไฟฟ้า ขณะที่โปรตอนเคลื่อนผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนไปยังขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดออกซิเจนทำปฏิกิริยากับโปรตอนและอิเล็กตรอนที่มาจากแอโนด เกิดเป็นน้ำ ดังสมการที่ 2 สุดท้ายเมื่อรวมปฏิกิริยาทั้งสอง จะได้ ปฏิกิริยารวม ดังสมการที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีเพียงน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยออกมาเป็นพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [3]

ในการคำนวณ อัตราการเกิดของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส สามารถใช้สมการทางเคมีและปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ได้ โดยสมการต่อไปนี้

สมการเคมีของการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำ โดยอัตราส่วนการเกิด: $\boldsymbol{H_2 : O_2}$ = 2 : 1 ดังสมการที่ 4

$$\boldsymbol{2H_2O(l) \rightarrow 2H_2(g) + O_2(g)} \quad (4)$$

การคำนวณปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยใช้กฎของแก๊สอุดมคติ ดังสมการที่ 5

$$HGR = \frac{V}{t} \quad (5)$$

โดยที่ HGR = อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (mL/min)
V = ปริมาตรของแก๊ส (mL)
t = เวลา (min)

2.2 วิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ จะค้นคว้าจากงานวิจัยและวารสารที่ได้ทาการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ หรือวารสารของมหาลัยต่างๆ ดังนี้

ปี พ.ศ. 2563 ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์ และคณะได้ศึกษาการแยกก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแยกเซลล์ พบว่า การเพิ่มความต่างศักย์ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 12 แอมแปร์ นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้น 0.75 โมแลล พบว่าให้ปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดที่ 721 ซีซีต่อนาที อีกทั้งยังพบว่า การเพิ่มจำนวนแผ่นเซลล์ไฟฟ้าส่งผลให้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [4]

ปี พ.ศ. 2567 ศักดิ์ระวี ระวีกุล และคณะฯ ได้ออกแบบระบบผลิตไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โดยพบว่าการใช้ เซลล์อิเล็กโทรด 4 คู่ เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ได้ก๊าซไฮโดรเจนเฉลี่ย 2.24 ลิตร/นาที โดยใช้พลังงาน 276 วัตต์ ระบบสามารถทำงานได้ 20 นาที และผลิตไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ย 11 โวลต์ เมื่อนำไปใช้กับ หลอดไฟ LED 9 วัตต์ ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ทั้งระบบมีประสิทธิภาพ 21.74% [5]

3. วัสดุและวิธีการ

สำหรับขั้นตอนการวิจัยในบทความนี้ได้นำเสนอการผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาอิเล็กโทรลิซิส

และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนต่อกำลังไฟฟ้า โดยมีวิธีการและขั้นตอนดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

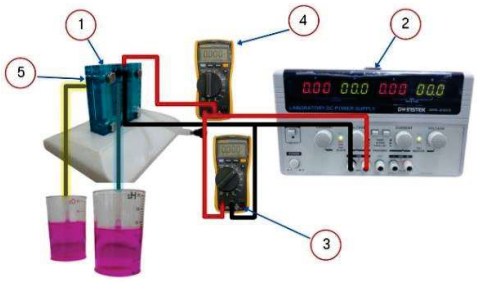
การดำเนินการทดลองจะต้องเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. เซลล์เชื้อเพลิงย้อนกลับ 2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 3. เครื่องวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า 4. กระบอกตวง 5. นาฬิกาจับเวลา 6. น้ำตัวอย่าง 3 ชนิด (น้ำดื่ม น้ำกลั่น และน้ำแร่)

3.2 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1: การเตรียมชุดทดลอง โดยการ เชื่อมต่อ RFC (หมายเลข 1) เข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (หมายเลข 2) และติดตั้งเครื่องวัดแรงดัน (หมายเลข 3) ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (หมายเลข 4) ดังรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 2: เติมน้ำเข้าใน RFC (หมายเลข 5) ให้เต็ม (ทดลองที่ละชนิด ตามลำดับ) ดังรูปที่ 2

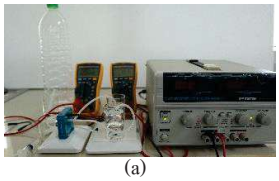


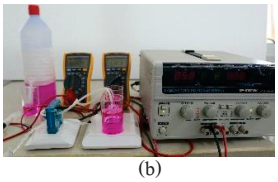
รูปที่ 2 ชุดการทดลอง

ขั้นตอนที่ 3: ตั้งค่ากระแสแหล่งจ่าย (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 A)

ขั้นตอนที่ 4: เปิดแหล่งจ่ายและจับเวลาการจ่ายไฟฟ้า และบันทึกค่าตามตาราที่ 1 – 3 ตามชนิดของน้ำ

ขั้นตอนที่ 5: นำค่าที่ได้จากตารางที่ 1 - 3 ไปพลอตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์และสรุปผล โดยรูปที่ทดลองจริงดังรูปที่ 3


(a)


(b)


(c)

รูปที่ 3 (a) การทดลองน้ำดื่ม (b) การทดลองน้ำกลั่น (c) การทดลองน้ำแร่

4. ผลการดำเนินงาน

จากการทดลองอิเล็กโทรลิซิสของน้ำดื่ม น้ำกลั่น และน้ำแร่ พบว่าอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน มีความแตกต่างกันตามชนิดของน้ำ โดยปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นถูกวัดเป็นมิลลิลิตรต่อวินาที หากคำนวณตามสมการที่ 5 ก็จะได้อัตราการเกิดก๊าซ ดังตารางที่ 1 – 3 ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของน้ำดื่ม

Current (A)	Electrolysis Time (min)	volume H_2 (ml) (Constant)	Hydrogen Generation Rate (mL/min)
0.50	4.70	14.00	2.98
1.00	3.13	14.00	6.57
1.50	1.45	14.00	9.66
2.00	1.33	14.00	12.39
2.50	0.90	14.00	15.56
3.00	0.57	14.00	24.56

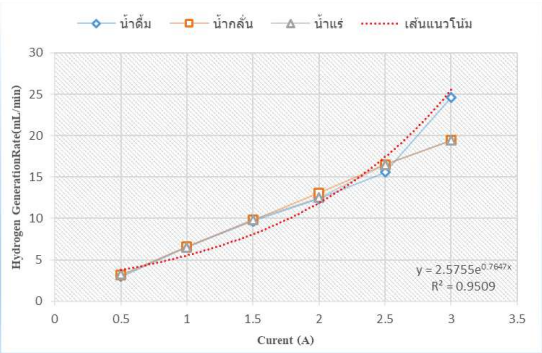
ตารางที่ 2 ผลการทดลองของน้ำกลั่น

Current (A)	Electrolysis Time (min)	volume H_2 (ml) (Constant)	Danger of gas generation (mL/min)
0.50	4.42	14.00	3.17
1.00	2.12	14.00	6.60
1.50	1.43	14.00	9.79
2.00	1.07	14.00	13.08
2.50	0.85	14.00	16.47
3.00	0.72	14.00	19.44

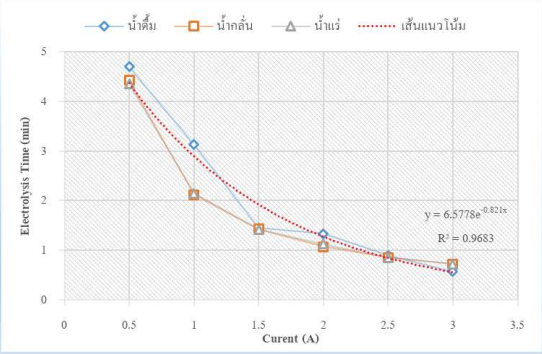
ตารางที่ 3 ผลการทดลองของน้ำแร่

Current (A)	Electrolysis Time (min)	volume H_2 (ml) (Constant)	Danger of gas generation (mL/min)
0.50	4.35	14.00	3.22
1.00	2.15	14.00	6.51
1.50	1.42	14.00	9.86
2.00	1.12	14.00	12.50
2.50	0.85	14.00	16.47
3.00	0.72	14.00	19.44

จากข้อมูลในตารางที่ 1-3 สามารถนำมาพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสได้ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

5. สรุป

การวิจัยนี้ศึกษาการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำดื่ม น้ำกลั่น และน้ำแร่โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบย้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ผลการทดลองพบว่า ชนิดของน้ำมีผลต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเพียงเล็กน้อย โดยน้ำดื่มให้อัตราการเกิดก๊าซสูงสุด รองลงมาคือน้ำกลั่นและน้ำแร่ อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรง เมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสลดลง และอัตราการเกิดก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ที่ 0.50 A อัตราการเกิดก๊าซอยู่ที่ 3.17 mL/min ขณะที่ 3.00 A อัตราการเกิดก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 41.18 mL/min จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มกระแสไฟฟ้าช่วยเร่งกระบวนการผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าการเลือกใช้น้ำประเภทต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการผลิตไฮโดรเจนอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, "โครงการศึกษาแนวทางการพัฒนาการผลิตและการใช้ไฮโดรเจนเพื่อส่งเสริมพลังงานหมุนเวียน," กันยายน 2564.

[2] SciMath, "กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis of Water)," SciMath, 13 พ.ค. 2562. [ออนไลน์]. Available : https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/10321-2019-05-13-05-59-15. [สืบค้นเมื่อ : 7 ม.ค. 2568].

[3] ฉัตริยะ ศิริสัมพันธ์วงษ์, "เซลล์เชื้อเพลิงเทคโนโลยีแห่งอนาคต หรือ เซลล์เชื้อเพลิงเทคโนโลยีแห่งทศวรรษที่ 10," วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, หน้า 36-42, 2568.

[4] ปราโมทย์ สุขศิริศักดิc. ภาณุพงศ์ ธรรมโชติ. 2563. การศึกษาระบบชุดแยกก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระแสไฟฟ้าแบบแยกเซลล์. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[5] ธีรภัทร์ ลิวงษ์ และคณะ, "ระบบผลิตไฮโดรเจนจากการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า," เอกสารงานวิจัย EENET 2024, 2567.

[6] W. Koranuntachai, C. Panpean, N. Phannil, and J. Homjan, "Evaluation of Hydrogen Refueling Stations for Intercity Rail Transport on Major Railway Routes in Thailand," in Proceedings of the International Electrical Engineering Congress (IEECON 2025), Ranong, Thailand, Mar. 5-7, 2025.

7. ประวัติผู้เขียน



นายอดิศร เมรุแก้ว นักวิทยาศาสตร์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง งานวิจัยที่สนใจ : Electrical Power Systems.



นายศุภชัย แก้วพวง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง งานวิจัยที่สนใจ : ยานยนต์ไฟฟ้า (EV)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนโดยการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำเทียบกับไฟฟ้าแรงดันสูง

Comparison of Wastewater Treatment Results using Electrocoagulation by Low Voltage and High Voltage

วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง กฤษราช เดชมา เชษฐวพันธุ์ รัตนบุรีและพงศ์พันธ์ เลขะวัฒนะ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิศูนย์สุพรรณบุรี
E-mail: wisut.t@rmusb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาบำบัดน้ำเสียซึ่งทำการเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำเสียระหว่างการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าแรงดันต่ำกับการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง การทดลองนี้ใช้อิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลทที่เป็นโลหะแตกต่างกัน 2 ชนิดได้แก่ อะลูมิเนียมกับทองแดง ทำการต่อทดลองเพื่อเปรียบเทียบกัน 2 รูปแบบได้แก่การบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าแรงดันต่ำกับการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง แผ่นเพลทที่ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดสำหรับจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงมีขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร ทำการทดลองโดยการจุ่มขั้วอิเล็กโทรดลงไปในน้ำเสียที่ออกมาจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพปริมาณ 1 ลิตร เป็นเวลา 30 นาที ผลที่ได้คือการบำบัดน้ำเสียแบบการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ผลการบำบัดที่ดีกว่าโดยค่าความนำทางไฟฟ้าลดลง ค่าของแข็งที่ละลายในน้ำทั้งหมดลดลง สีของน้ำเสียมีความใสมากขึ้น

คำสำคัญ: อิเล็กโทรดอกกูเลชั่น, ไฟฟ้าแรงดันต่ำ, ไฟฟ้าแรงดันสูง

Abstract

This paper is a study of wastewater treatment which compares the treatment results between wastewater treatment using low voltage and high voltage. This experiment uses two different metal plate electrodes, aluminum and copper, to compare two different models: wastewater treatment using low voltage electrolysis and wastewater treatment using high voltage. The plate used as the electrode terminal for DC power supply is 13 cm wide and 14 cm long. The experiment was conducted by immersing the electrode into 1 liter of wastewater from the biogas digester for 30 minutes. The result is that the wastewater treatment using low voltage electric current has better treatment results with lower conductivity, lower total dissolved solids, and clearer color of wastewater.

Keywords: electrocoagulation, low voltage, high voltage

1. บทนำ

น้ำเป็นสิ่งสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากทั้งในเรื่องการอุปโภคบริโภครวมไปถึงการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมซึ่งในการใช้ประโยชน์จากน้ำนั้นมีมากมายอาทิเช่น การนำมาดื่ม การนำไปประกอบอาหาร การนำไปชะล้างสิ่งสกปรก การใช้น้ำในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้ประโยชน์จากน้ำแต่ละครั้งอาจจะทำให้มีสิ่งสกปรกเจือปนเข้ามากับน้ำอาจจะเป็นอินทรีย์สารหรืออนินทรีย์สารจนทำให้คุณสมบัติของน้ำนั้นเปลี่ยนไปโดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปริมาณสารที่เข้ามาผสม โดยถ้ามีปริมาณมากจนเป็นเหตุให้ส่งผลกระทบกับการนำไปใช้งานของแต่ละการนำไปใช้ประโยชน์จะนิยามน้ำนั้นว่าน้ำเสีย

กระบวนการที่ดึงเอาอินทรีย์สารหรืออนินทรีย์สารออกจากโมเลกุลของน้ำเรียกกว่าการบำบัดน้ำเสียโดยวิธีการบำบัดน้ำเสียนั้นมีหลากหลายอาจจะใช้ กระบวนการทางกายภาพเช่น การดักด้วยตะแกรง การกวนเพื่อให้ตกตะกอน กระบวนการทางชีววิทยาโดยการอาศัยจุลินทรีย์มาทำการย่อยสลาย กระบวนการทางเคมีคือการใช้สารเคมีมาทำให้ค่าของน้ำดีขึ้น กระบวนการทางเคมี-กายภาพ เช่นการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โดยการใช้แต่ละวิธีจะมีต้นทุนในใช้งานที่ไม่เท่ากันและประสิทธิภาพในการบำบัดไม่เท่ากันรวมถึงขีดจำกัดของการเลือกวิธีที่นำมาบำบัดกับแหล่งน้ำเสียก็มีความสำคัญต่อการเลือกวิธีบำบัด ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอลนั้นถ้าใช้วิธีการทางเคมีหรือทางกายภาพนั้นอาจไม่ได้ผลแต่ถ้าใช้กระบวนการทางชีววิทยาโดยการใช้จุลทรีย์มาย่อยสลายนอกจากจะทำให้ค่าความเสียของน้ำลดลงยังทำให้เกิดแก๊สชีวภาพซึ่งแก๊สนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นได้ แต่ค่าน้ำเสียที่ออกมาจากการบำบัดด้วยวิธีนี้ก็ยังมีค่าสูงเกินกว่ามาตรฐานกำหนด จากเหตุผลดังกล่าวบทความนี้จึงมีแนวความคิดในการศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ออกมาจากบ่อหมักแก๊สชีวภาพโดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าทำการเปรียบเทียบผลของค่าความนำไฟฟ้า ค่าตะกอนและสีของน้ำระหว่างการใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างไฟฟ้าแรงดันสูงกับไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียหมายถึงน้ำที่มีสิ่งเจือปนต่างๆ จนกลายเป็นน้ำที่มีผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์อีกต่อไป ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้นโดยใช้กระบวนการต่างๆ โดยระบบบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทได้แก่

1.การบำบัดทางกายภาพเป็นวิธีแยกขยะหรือสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำด้วยอุปกรณ์ด้วยอุปกรณ์ในกระบวนการบำบัดทางกายภาพเช่น ตะแกรงดักขยะ ถังดักกรวดทราย ถังดักไขมันและน้ำมันเป็นต้น

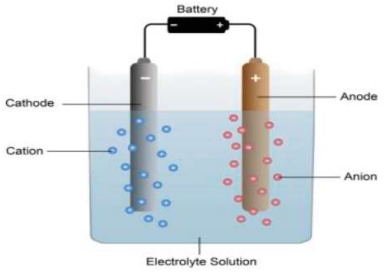
2.การบำบัดทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่อาศัยจุลินทรีย์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำโดยความสกปรกหรือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกใช้เป็นอาหารและเป็นแหล่งพลังงานของจุลินทรีย์เพื่อการเจริญเติบโต ทำให้น้ำเสียมีความสกปรกลดลง โดยจุลินทรีย์เหล่านี้อาจเป็นแบบใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน

3.การบำบัดทางเคมีเป็นกระบวนการทางเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย เช่น ค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไป มีสารพิษ มีของแข็งแขวนลอยที่ตะกอนยาก

4.การบำบัดทางเคมี-กายภาพเป็นกระบวนการที่อาศัยทั้งทางเคมีและทางกายภาพมารวมกันจะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ

2.2 การบำบัดน้ำเสียเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าคือ กระบวนที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายและผิวหน้าขั้วอิเล็กโทรด การเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้เกิดขึ้นโดยอาศัยพลังงานจากแหล่งกำเนิดภายนอก โดยการให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์(สารที่ผสมอยู่ในน้ำ)ไอออนโลหะทำหน้าที่เป็นสารออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันเป็นโลหะเกาะที่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้สามารถแยกโลหะออกมาจากสารละลายได้ดังแสดงในรูปที่ 1.



รูปที่ 1. กระบวนการเคมีไฟฟ้า

เมื่อใช้เหล็ก (F_e) เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะทำให้ขั้วแอโนดมีไอออนของเหล็กละลายในน้ำออกมา โดยมีปฏิกิริยาออกซิเดชันดังนี้

$$Fe \longrightarrow Fe^{2+} + 2e^{-} \quad (1)$$

และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นไฮดรอกไซด์ (OH^-) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังนี้

$$H_2O + 2e^{-} \longrightarrow 2OH^{-} + H_{2(g)} \quad (2)$$

เมื่อใช้อะลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะทำให้ขั้วแอโนดมีไอออนของอะลูมิเนียมละลายในน้ำออกมา โดยมีปฏิกิริยาออกซิเดชันดังนี้

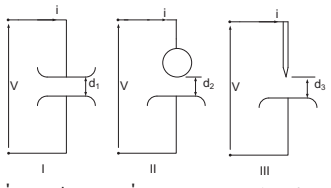
$$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e^{-} \quad (3)$$

และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้เป็นไฮดรอกไซด์ (OH^-) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังนี้

$$3H_2O + 3e^{-} \longrightarrow 3OH^{-} + 3/2\ H_{2(g)} \quad (4)$$

2.3 ความคงทนค่าแรงดันไฟฟ้า

ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟไฟฟ้าสูงสุดที่ฉนวนนั้นสามารถทนอยู่ได้ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายซึ่งมีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อระยะห่างของอิเล็กโทรด ซึ่งค่าสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน มีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งและรูปทรงของอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 2. โดยทั่วไปสามารถหาได้จากสมการ



รูปที่ 2. อิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบต่างๆ

I) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

II) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

III) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง

$$E_{max} = \frac{V}{d \times \eta^{*}} \quad (5)$$

E_{max} คือสนามไฟฟ้าสูงสุดระหว่างอิเล็กโทรด ; kV/cm

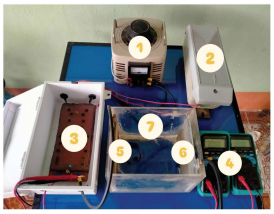
V คือแรงดันที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด ; kV

d คือระยะห่างของอิเล็กโทรด ; cm

η^{*} คือแฟกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ($0 < \eta^{*} \leq 1$)

3. โครงสร้างและการออกแบบการทดลอง

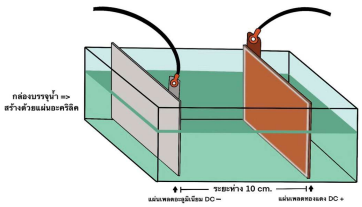
การศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนโดยไฟฟ้าแรงดันสูงเทียบกับการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำจะมีชุดที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง ชุดวงจรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง อิเล็กโทรดแบบแผ่นเพลทขนาดกว้าง 13 เซนติเมตร ยาว 14 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เว้นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3. เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขั้วอิเล็กโทรดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวก (แอโนด) โดยถ้าใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 1 และถ้าหากใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากอะลูมิเนียมจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 3 ทำให้เกิดการสึกกร่อนแล้วละลายอยู่ในน้ำ ขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (แคโทด) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำจะแตกตัวให้แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซน์ อิออน (OH^-) โดยถ้าใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2 และถ้าใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากอะลูมิเนียมจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 4 เมื่อเวลาผ่านไปเหล็กหรืออะลูมิเนียมในรูปแบบไอออนจะหลุดออกมารวมตัวกับสารแขวนลอยในน้ำเสียทำให้เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ขึ้นมาซึ่งหากโมเลกุลนี้มีน้ำหนักมากกว่าโมเลกุลของน้ำก็จะตกลงสู่พื้นล่างทำให้เกิดการแยกตัวออกจากน้ำ



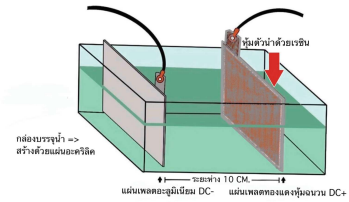
หมายเลข	อุปกรณ์
1	หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้
2	หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง
3	วงจรบริดจ์
4	เครื่องมือวัดทางไฟฟ้า
5	แผ่นอิเล็กโทรด
6	แผ่นอิเล็กโทรด
7	ภาชนะใส่น้ำเสีย

รูปที่3. ชุดทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

ในการทดลองทำการแบ่งการทดลองเป็น 2 รูปแบบได้แก่ 1. การใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำมาทำการบำบัดน้ำเสียมีชุดบำบัดดังแสดงในรูปที่ 4. การใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงมาทำการบำบัดน้ำเสียโดยในชุดอิเล็กโทรดที่นำมาใช้ในการบำบัดจะไม่เหมือนชุดของไฟฟ้าแรงดันต่ำเนื่องจากต้องใช้ฉนวนเคลือบแผ่นอิเล็กโทรดไว้เพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.



รูปที่4. ชุดอิเล็กโทรดสำหรับบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าแรงดันต่ำ

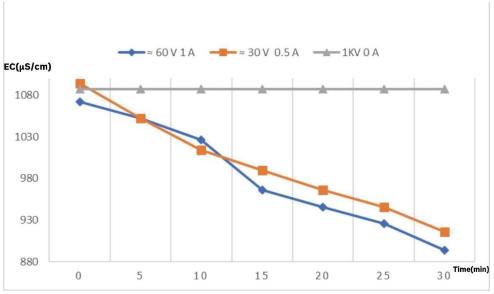


รูปที่5. ชุดอิเล็กโทรดสำหรับบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าแรงดันสูง

4. ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ทำการทดลองโดยการจุ่มขั้วอิเล็กโทรดลงไปยังน้ำเสียที่ได้นำมาทดลอง น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองปริมาณ 1 ลิตร ซึ่งมีค่าเริ่มต้นดังนี้ ค่าความนำไฟฟ้า(EC)ที่ 1,080 $\mu S/cm$ และค่าของแข็งที่ละลายทั้งหมดในน้ำ (TDS)ที่ 560 ppm. โดยในการทดลองได้ทำการทำการเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 ถึง 60 V และใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1 kV ให้กับแผ่นเพลทที่ออกแบบมา โดยทำการทดลองเป็นเวลา 30 นาที

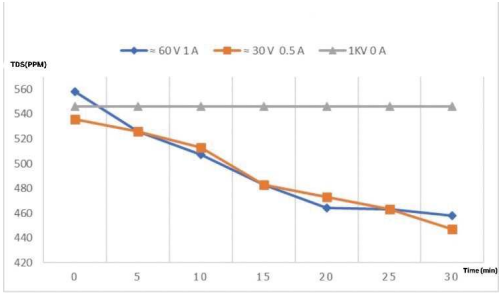
4.1 การเปรียบเทียบผลของค่าความนำไฟฟ้า



รูปที่6. ผลของค่าความนำไฟฟ้าในน้ำเสียที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำหรือที่เรียกว่า EC เป็นตัววัดความสามารถของน้ำในการส่งค่ากระแสไฟฟ้า ความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณโมเลกุลที่อยู่ในรูปแบบไอออนที่อยู่ในน้ำโดยตรงโดยน้ำเสียที่นำมาทำการทดลองนั้นมีค่าเริ่มต้นของค่าความนำไฟฟ้าอยู่ที่ 1,080 $\mu S/cm$ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ 30 V ทำให้เกิดกระแสไหลที่ 0.5 A แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดทำให้ไอออนหลุดออกมาจากแผ่นอิเล็กโทรดและทำปฏิกิริยากับไอออนในน้ำเสียส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดแยกออกมานั้นไปทำปฏิกิริยาโมเลกุลของน้ำดังสมการที่ 1 และ 2 ทำให้ไอออนในน้ำเสียมีค่าลดลง เมื่อทำการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ามากขึ้นจะสังเกตุได้จากผลการทดลองในรูปที่ 6. ในเวลาที่ทำการบำบัดเท่ากันถ้าแรงดันมากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าไหลมากขึ้นทำให้ไอออนในน้ำเสียลดลงมากกว่า ในกรณีที่จ่ายแรงดันสูงที่ระดับ 1 kV ได้ทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดเพื่อป้องกันการลัดวงจร ซึ่งได้ใช้ฉนวนเรซิ่นหุ้มไว้ในกรณีค่าความคงทนต่อค่าแรงดันไฟฟ้าของฉนวนมากกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายทำให้อิเล็กตอนไม่สามารถข้ามผ่านชั้นฉนวนออกมาได้ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสีย

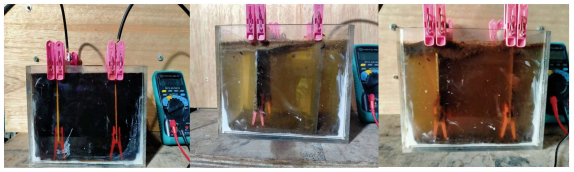
4.2 การเปรียบเทียบผลของแข็งที่ละลายทั้งหมด



รูปที่ 7. ผลของแข็งที่ละลายทั้งหมดในน้ำเสียที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7. พบว่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระดับ 30 V ลงไปในน้ำเสียที่มีค่าของแข็งละลายอยู่ในน้ำที่ระดับเริ่มต้น 560 ppm. ค่าแรงดันนี้ทำให้เกิดค่าพลังงานที่ทำให้อะตอมของขั้วแอโนดหลุดออกดังสมการที่ 1 ทำให้เกิดอะตอมของเหล็กในรูปแบบไอออนและอิเล็กตรอนอิสระซึ่งอะตอมของเหล็กนี้จะไม่มีสเถียรภาพจึงไปจับตัวกับโมเลกุลของสารละลายในน้ำถ้าหากโมเลกุลนี้มีน้ำหนักมากกว่าโมเลกุลของน้ำก็จะตกลงสู่งพื้นทำให้เกิดการแยกชั้นออกจากโมเลกุลของน้ำ ในส่วนของขั้วแคโทดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะไปรวามตัวกับโมเลกุลของน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชั่นขึ้นโดยปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดไฮดร็อกไซและแก๊สไฮโดรเจนขึ้นซึ่งแก๊สไฮโดรเจนมีน้ำหนักเบากว่าโมเลกุลของน้ำก็จะทำให้เกิดฟองลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้สารแขวนลอยที่ปนอยู่ในน้ำส่วนหนึ่งลอยขึ้นมาด้วย ซึ่งถ้าหากปรากฏการณ์นี้มีพลังงานมากก็จะทำให้เกิดกระแสไหลข้ามขั้วอิเล็กโทรดได้ โดยจะสังเกตว่าถ้าจ่ายแรงดัน 60 V จะมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลมากขึ้นแต่การดึงของแข็งละลายออกจากน้ำนั้นอาศัยไอออนของขั้วอิเล็กโทรดถ้าหากจ่ายแรงดันมากไปก็ไม่เกิดผลที่ดีขึ้น ซึ่งถ้าจ่ายแรงดันในระดับ 1 kV โดยขั้วอิเล็กโทรดฝั่งแอโนดทำการเคลือบด้วยฉนวนเรซิ่น ในการจ่ายแรงดันมากขึ้นทำให้สนามไฟฟ้าตกคร่อมขั้วอิเล็กโทรดมากแต่ถ้าหากระดับพลังงานไม่สามารถทำให้อะตอมของขั้วอิเล็กโทรดหลุดออกมาได้ก็จะไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ซึ่งไม่สามารถทำการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าได้

4.3 ผลการเปรียบเทียบสีของน้ำเสีย



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 8. สีของน้ำเสียที่ระดับแรงดันไฟฟ้า(ก). น้ำเสียตั้งต้น/ระดับแรงดันไฟฟ้า 1 kV (ข). แรงดันไฟฟ้า 30 V (ค). แรงดันไฟฟ้า 60 V

จากการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 30 V 60 V และ 1 kV ให้กับขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้บำบัดน้ำเสียผลพบว่าที่ระดับแรงดัน 30 V ดังรูปที่8(ข).สีของน้ำเสียจะเปลี่ยนจากสีดำมาเป็นสีใสขึ้นมากกว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 60 Vดังรูปที่ 8(ค). ซึ่งผลของสีในการเปลี่ยนแปลงจะสอดคล้องกับค่าของแข็งละลายที่ระดับแรงดัน 30 V นั้นทำการบำบัดได้ดีกว่า ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1 kV ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากไม่เปิดปฏิกิริยาใดๆระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำกับการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง พบว่าค่าความนำไฟฟ้าในน้ำลดลงเมื่อใช้ไฟฟ้าแรงต่ำแต่เมื่อใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงไม่เกิดปฏิกิริยา การทดลองเทียบผลของแข็งที่ละลายทั้งหมดในน้ำพบว่าการใช้ไฟฟ้าแรงดันต่ำสามารถทำให้ของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำตกตะกอนแยกชั้นออกจากน้ำได้ดีกว่าการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงและสีของน้ำเสียจะมีสีที่ใสขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] ไพฑูรย์ หมื่นจำเริญและแคทลียา ปัทมพรหม (2557). ผลของแรงดันไฟฟ้าและช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อการบำบัดความขุ่นของน้ำเสียโดยการจับตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง. *การประชุมวิชาการระดับชาติ*(น.218-224).

[2] บังอร นารีรบ(2564). ผลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี. *ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม* มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

The development and efficiency validation of Computer Assisted Instruction of Set of transmission and distribution system electrical power Industrial Technology

ธราธิป ภู่ระหงษ์[1*] ภูมินทร์ ฮงมา[2] และ ประจวบ แสงวงค์[3]
[1*]สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม
[2]คณะวิทยาการจัดการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยนครพนม
[3]สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา
E-mail: tharathip_ph@npu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนผู้เรียนจากบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ที่สร้างขึ้น โดยกลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ปีที่ 2 สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม ที่ลงทะเบียนรายวิชาวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 จำนวน 30 คน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มทดลองจำนวน 15 คน และกลุ่มควบคุมจำนวน 15 คน โดยให้กลุ่มทดลองบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ประยุกต์ที่สร้างขึ้น หลังจากทำบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าเสร็จนักศึกษาได้ทำแบบทดสอบท้ายบทเรียนและแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ พบว่าผลการวิจัยปรากฏว่า บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ 92.33 / 91.12 ซึ่งสูงเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนระหว่างกลุ่มทดลองสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 แสดงว่าเพื่อการพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรดิจิตอลประยุกต์ที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้สอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า

Abstract

This study aimed to development and efficiency validation of Computer Assisted Instruction of Set of transmission and distribution system . A case study electrical power Industrial Technology. course offered at 2024 first semester : at Industrial Technology. The sample were first year students in Electricity department at diploma level at Industrial Technology, Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, to select samples, a purposeful sampling technique were used to divide 15 students into two groups. Pretest and Post – test were assessed to the selected samples.

The result of the students' test scores appeared to have high efficiency (at 92.33 / 91.12, higher than the previously set criteria). The students' learning achievement of the experimental group higher than control group at .05 . Show that , the developed motor controller was found to be a very useful teaching tools in teaching in class and suitable for the students to practice.

Keywords: Computer Assisted Instruction transmission and distribution system

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางการศึกษามีความเจริญก้าวหน้าและได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วการเรียนการสอนที่ใช้เทคโนโลยีทางการศึกษาได้ มีบทบาทสำคัญอย่างสูงในสังคมการศึกษาทั้งในระบบการศึกษาและนอกระบบการศึกษา การพัฒนาสื่อการศึกษาของตนเองให้มีความหลากหลายและทันสมัยอยู่เสมอความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิชาการสร้างผลให้ครูผู้สอนต้องผลิตสื่อการเรียนการสอนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดกับสภาพการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนได้รับรู้และเข้าใจในเนื้อหาวิชาของครูผู้สอนได้เป็นอย่างดี ดังนั้นผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญด้านเทคโนโลยีใช้ในการเรียนการสอนบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน (Computer Assissted Instruction : CAI) มาแก้ไขปัญหาการ

เรียนการสอน นักศึกษาเรียนรู้ได้ช้าต้องใช้จินตนาการสูงและยังขาดสื่อและอุปกรณ์การเรียนการสอนเกี่ยวกับวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า จะสามารถแก้ปัญหาและมีแนวโน้มที่จะเป็นไปได้สูง

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 เพื่อพัฒนาชุดการสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ที่ให้มีประสิทธิภาพตามเกณฑ์ 80/80

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนระหว่างก่อนเรียนกับหลังเรียนโดยใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

2.3 เพื่อศึกษาความพึงพอใจของนักศึกษาและครูผู้สอนที่มีต่อการเรียนบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า สำหรับนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เพื่อพัฒนาชุดการสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน และแบบประเมินความเหมาะสมของสำหรับครูผู้สอน และแบบสอบถามความพึงพอใจสำหรับกลุ่มตัวอย่าง ดังนี้ [2]

3.1 แบบแผนการวิจัย

3.1.1 ศึกษาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดต่างๆ เช่น งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือเอกสารที่เกี่ยวกับการวิจัยแล้วรวบรวมความรู้ต้องมีความละเอียด ชัดเจน เข้าใจ

3.1.2 ประเมินบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน โดยครูผู้สอนโดยใช้แบบประเมินความเหมาะสม การหาประสิทธิภาพพัฒนาชุดการสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าที่จัดทำขึ้น จำนวน 15 ท่าน

3.1.3 นำไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน

3.1.4 หาประสิทธิภาพและประเมินความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน

3.1.5 การหาประสิทธิภาพและผลจากแบบประเมินความพึงพอใจมาแปลผลและสรุปผล

3.2 ขอบเขตของประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร คือนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ปีที่ 2 สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง ที่ลงทะเบียนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2567 สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

กลุ่มตัวอย่าง โดยคัดเลือกมาจำนวน 30 คน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มกลุ่มละ 15 คน กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มทดลองสอนโดยใช้ชุดประลองที่สร้าง และกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มควบคุมสอนโดยวิธีปกติ ด้วยการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling)

3.3 การพัฒนาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า

3.4 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

หาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน [2]โดยดูคะแนนที่รวบรวมได้จากแบบทดสอบก่อนเรียน แบบฝึกหัดแบบทดสอบหลังบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน ประกอบไปด้วย 10 บทเรียน

3.5 การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้แสดงผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน โดยใช้สถิติ (t – test) โดยกำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 และมีสมมติฐานคือ

H0 : μ ทดลอง = μ ควบคุม

H1 : μ ทดลอง > μ ควบคุม

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน วิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าและวิเคราะห์ข้อมูลและนำเสนอผลการวิเคราะห์ ดังนี้

3.1 วิเคราะห์หาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า เกณฑ์ที่กำหนดไว้ คือ E1/ E2 [1],[2]

E1 ตัวแรก หมายถึง คะแนนที่นักศึกษาได้จากแบบทดสอบท้ายการทดลองวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้คะแนนเฉลี่ยร้อยละ 80

E2 ตัวหลัง หมายถึง คะแนนวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนที่นักศึกษาได้จากแบบ ทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้คะแนนเฉลี่ยร้อยละ 80

ตารางที่ 1 ผลการหาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 1 ระบบการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	319	165	12.07	7.63	0.79
เฉลี่ย	10.65	5.466	0.40	0.25	

ผลจากตารางที่ 1 ค่าความยากง่ายมีค่า 0.40 ค่าอำนาจจำแนก จำแนก 0.25 และค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่า 0.79

ตารางที่ 2 ผลการหาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 2 โครงสร้างของระบบกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	323	164	12.22	7.73	0.79
เฉลี่ย	10.7	5.4	0.41	0.26	

ผลจากตารางที่ 2 ค่าความยากง่าย มีค่าเท่ากับ 0.41 ค่าอำนาจจำแนก 0.26 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.79

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 3 อุปกรณ์ของระบบการส่งและจ่ายกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	316	191	13.85	7.51	0.78
เฉลี่ย	10.5	6.5	0.47	0.26	

ผลจากตารางที่ 3 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.47 ค่าอำนาจจำแนก 0.26 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.78

ตารางที่ 4 ผลการหาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 4 พารามิเตอร์ของสายส่งกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	285	117	10.55	8.5	0.77
เฉลี่ย	9.82	4.21	0.36	0.29	

ผลจากตารางที่ 4 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.36 ค่าอำนาจจำแนก 0.29 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.77

ตารางที่ 5 ผลการหาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนบ บทเรียนที่ 5 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในสายส่งกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	314	155	12.22	7.73	0.79
เฉลี่ย	0.32	5.4	0.41	0.27	

ผลจากตารางที่ 5 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.41 ค่าอำนาจจำแนก 0.27 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.79

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 6 การหาแรงดึงและระยะหย่อนของสายส่งกำลังไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	312	187	13.75	7.36	0.77
เฉลี่ย	10.63	6.46	0.46	0.25	

ผลจากตารางที่ 6 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.46 ค่าอำนาจจำแนก 0.25 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.77

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 7 การจัดสัมพันธ์ของฉนวน

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	287	131	10.92	7.58	0.77
เฉลี่ย	9.8	4.6	0.354	0.26	

ผลจากตารางที่ 7 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.354 ค่าอำนาจจำแนก 0.26 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.77

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 8 คุณลักษณะของโหลด

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	287	151	10.92	7.58	0.77
เฉลี่ย	9.9	4.7	0.354	0.27	

ผลจากตารางที่ 8 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.354 ค่าอำนาจจำแนก 0.27 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.77

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 9 การคำนวณระบบต่อหน่วย

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	153	92	4.875	2.28	0.80
เฉลี่ย	11.3	7.2	0.47	0.25	

ผลจากตารางที่ 9 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.47 ค่าอำนาจจำแนก 0.25 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.80

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน บทเรียนที่ 10 การพยากรณ์โหลดและความต้องการไฟฟ้า

	R_H (15 คน)	R_L (15 คน)	P	D	r_{tt}
รวม	99	45	3.5	2.7	0.80
เฉลี่ย	9.9	4.5	0.37	0.27	

ผลจากตารางที่ 10 ค่าความยากง่ายมีค่าเท่ากับ 0.37 ค่าอำนาจจำแนก 0.27 ค่าความชื่อมั่นของแบบทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.80

ตารางที่ 11 ความพึงพอใจบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าของครูผู้สอน จำนวน 15 คน

รายละเอียด	ความคิดเห็น (n = 15)		ระดับ
	$\overline{X}$	S.D.	
1.เนื้อหาครบถ้วนตามคำอธิบายรายวิชา	4.400	0.483	มาก
2.การแบ่งหัวเรื่องมีความเหมาะสม	4.300	0.474	มาก
3.เนื้อหาอธิบายชัดเจน เข้าใจ	4.500	0.427	มาก
4.แบบทดลองมีความสัมพันธ์เนื้อหา	4.300	0.432	มาก
5.รูปแบบเอกสารมีความถูกต้องตามหลักวิชาการ	4.200	0.566	มาก
6.ความเหมาะสมของกิจกรรมการเรียนการสอน	4.200	0.316	มาก
7.ความเหมาะสมในการนำไป การเรียนการสอน	4.500	0.516	มาก
8.เนื้อหามีความสัมพันธ์กับสื่อการสอนประเภทบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน	4.500	0.527	มาก
รวม	4.350	0.349	มาก

ผลจากตารางที่ 11 ครูผู้สอนวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า มีความพึงพอใจบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า โดยรวม ($\overline{X}$ = 4.350, S.D. = 0.349) มีความเหมาะสม อยู่ในระดับ มาก

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้า ตามเกณฑ์ 80/80

ที่มาของระดับคะแนน	ค่าประสิทธิภาพ (%)
แบบทดสอบท้ายบทเรียน	92.33
แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์	91.12

ผลจากตารางที่ 12 เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพที่ได้จากคะแนนแบบทดสอบท้ายบทเรียนซึ่งมีค่าเท่ากับ 92.33 % และค่าประสิทธิภาพที่ได้จากคะแนนผลสัมฤทธิ์ ที่มีค่าเท่ากับ 91.12 % สูงกว่าเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนดไว้และเป็นไปตามสมมติฐานที่ผู้วิจัยตั้งไว้

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและหาประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดร้อยละ 80/80 เป็นไปตามสมมุติฐานของการวิจัยโดยประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าที่ได้จาก กลุ่มทดลอง คะแนนแบบทดสอบท้ายใบงานซึ่งมีค่าเท่ากับ 92.33 และคะแนนที่ได้จากแบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ที่มีค่าเท่ากับ 91.12 จึงสามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ว่า ประสิทธิภาพของบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน รายวิชาการส่งและจ่ายไฟฟ้าที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น มีประสิทธิภาพที่ระดับ 92.33 / 91.12 สูงกว่าเกณฑ์ที่ผู้วิจัยกำหนดไว้และเป็นไปตามสมมติฐานที่ผู้วิจัยตั้งไว้ เนื่องมาจากบทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน และผลการเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน ระหว่างกลุ่มทดลองและกลุ่มควบคุม พบว่ากลุ่มทดลองมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยทางสถิติที่ระดับ .05

เอกสารอ้างอิง

[1] ทวี เดชะคำภู. การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดการสอนปฏิบัติเรื่องเทคนิคการอินเตอร์ เฟสกับไมโครโพรเซสเซอร์ Z-80 ปัญหาพิเศษครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้าบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2548

[2] บุญชม ศรีสะอาด. การวิจัยเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : สุวีริยาสาสน์, 2543.



ธราธิป ภู่ระหงษ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ. 2549 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์



ภูมินทร์ สงมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระธนบุรี ปี พ.ศ.2555 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์



ประจวบ แสงวงค์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระธนบุรี ปี พ.ศ.2554 ปัจจุบัน ตำแหน่ง ครูเชี่ยวชาญ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ความเป็นไปได้ของการตรวจจับการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีนในเนื้อหมูด้วยอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

Feasibility of Detecting Formalin Contamination in Pork Using Interdigital Electrodes

ณัฐฐะวีวรรณ ปานจันทร์[1*] ไพโรจน์ วุ่นชุม[1] และ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์[1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
E-mail: Natthaweewan1@gmail.com[*]

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้งานอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจวัดปริมาณสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างเช่นเนื้อหมู ซึ่งจากผลลัพธ์การทดลองแสดงให้เห็นถึงอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนที่เป็นเชิงเส้นโดยที่มีค่า R-Squared มากกว่า 0.95 นอกจากนี้ในด้านอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนอิเล็กโทรดที่นำเสนอในครั้งนี้มีค่าโดยประมาณ 56.162 pF, 80 pF และ 47.68 pF ต่อหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีน ในกรณีของชิ้นเนื้อตัวอย่าง ส่วนสามชั้น ส่วนเนื้อแดง และส่วนติดมัน

คำสำคัญ: อิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล, การตรวจวัดการปนเปื้อนฟอร์มาลีน, การวัดค่าความจุไฟฟ้า

Abstract

This study investigates the feasibility of applying an interdigital electrode for the detection of formalin contamination in food products, specifically pork. Experimental results indicate that the interdigital electrode exhibits a linear relationship between capacitance change and formalin concentration, with an R-squared value exceeding 0.95. Additionally, the rate of capacitance change per unit of formalin concentration contamination was observed to be approximately 56.162 pF, 80 pF, and 47.68 pF for pork belly, red meat, and fatty meat samples, respectively. These findings demonstrate the potential of the interdigital electrode as a reliable and effective sensor for formalin detection in food safety applications.

Keywords: Interdigital Electrode, Formalin Contamination Detection, Capacitance Measurement

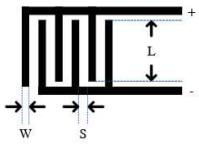
1. บทนำ

ปัญหาทางด้านความปลอดภัยทางอาหารอันเกิดจากการปนเปื้อนจากสิ่งแปลกปลอม ตัวอย่างเช่น โลหะหนัก หรือ สารเคมีกลุ่มยาปฏิชีวนะ ถือได้ว่าเป็นปัญหาหลักที่หลายหลายภาคส่วนให้ความสนใจ ซึ่งเป็นเพราะปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบทั้งต่อร่างกายของผู้บริโภคร่วมถึงยังส่งผลกระทบต่อทางด้านเศรษฐกิจ [1] นอกจากนี้ในอุตสาหกรรมอาหารกระบวนการถนอมอาหารเพื่อยืดอายุและรักษาความสดใหม่ของอาหารมีการใช้สารเคมีซึ่งส่งผลกระทบต่อร่างกายผู้บริโภค เช่น ฟอร์มาลีน (Formalin) [2] ซึ่งปริมาณสารฟอร์มาลีนโดยประมาณ 0.25 ถึง 3.0 PPM อาจส่งผลทำให้เกิดการระคายเคืองคอหลังบริโภคสารดังกล่าวเข้าไปหรือในบางกรณีการได้รับสารฟอร์มาลีนในระดับที่มากเกินไปอาจส่งผลทำให้เนื้อเยื่อที่บุทางเดินหายใจถูกทำลาย [3] ในด้านวิธีการตรวจวัดปริมาณสารฟอร์มาลีนในผลิตภัณฑ์อาหารที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น Spectrophotometric โดยอาศัยปฏิกิริยา Hantzsch reaction สำหรับการตรวจวัดปริมาณสารที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายแต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดในด้านการประยุกต์ใช้งานเนื่องด้วยเป็นวิธีการที่จำเป็นต้องทดสอบภายในห้องปฏิบัติการหรือวิธีการที่ให้ผลการตอบสนองต่อปริมาณสารฟอร์มาลีนที่รวดเร็วและมีความแม่นยำในการตรวจวัดที่สูง เช่น HPLC (High-Performance Liquid Chromatography) แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดในด้านการตรวจวัดเช่นเดียวกับวิธีการ Spectrophotometric และรวมถึงมีต้นทุนสำหรับการตรวจวัดที่สูง [4] ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงต้องการที่จะนำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้งานอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลสำหรับการตรวจวัดปริมาณสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในผลิตภัณฑ์อาหารอย่างเช่นเนื้อหมู

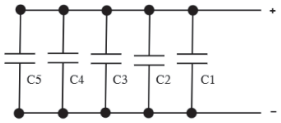
2. ทฤษฎีและหลักการ

อิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล (Interdigital Electrode : IDE) คืออิเล็กโทรดที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าอันเกิดจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง Material Under Test (MUT) ที่สนามไฟฟ้าจะทะลุผ่านบนพื้นที่ตรวจจับ (Sensing Area) โดยโครงสร้างของอิเล็กโทรดดังกล่าวมีลักษณะเป็นซี่หวีตัวนำที่เรียงสลับกันบนพื้นผิว

เดียวกันดังรูปที่ 1 และมีวงจรสมมูลความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 2 [5] ในด้านการอธิบายพฤติกรรมของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลอาศัยหลักการของ Schwarz-Christoffel Transformation ร่วมกับการทำแผนที่เชิงสอดคล้อง (Conformal Mapping) [6] ดังสมการ (1)



รูปที่ 1 โครงสร้างอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล



รูปที่ 2 วงจรสมมูลความจุไฟฟ้าอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

$$C_{pu,T} = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_1+\varepsilon_3)}{2}\frac{K(\sqrt{1-k^2})}{K(k)} + \varepsilon_0\varepsilon_2\left(\frac{h}{s}\right) \qquad (1)$$

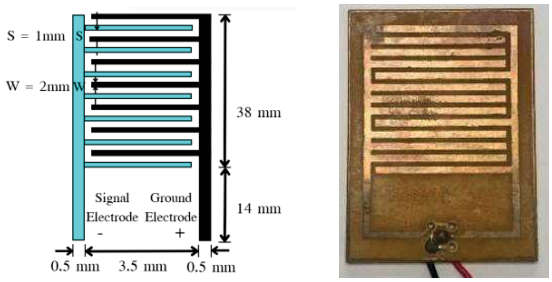
จากสมการที่ (1) กำหนดให้ ε_0 มีค่าเท่ากับค่าคงที่ทางไฟฟ้าที่บ่งบอกถึงการตอบสนองของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า (เปอร์มิตติวิตี) ของอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.854\times10^{-12}\ F/m$ โดยที่ค่าการเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุระหว่างซี่อิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ ε_2 ร่วมกับกำหนดให้ ε_1 , ε_3 มีค่าเท่ากับเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุซับสเตรตและเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของวัสดุ MUT ตามลำดับ ในส่วนของความหนาของตัวนำอิเล็กโทรดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ h และกำหนดให้ k มีค่าเท่ากับพารามิเตอร์โมดูลัสของฟังก์ชันวงรีโดยที่ฟังก์ชันอินทิกรัลวงรีเชิงสมบูรณ์ชนิดที่หนึ่ง $K(k)$ ในด้านการคำนวนหาจำนวณซี่หวีของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลเพื่อนำไปสู่การออกแบบอิเล็กโทรดสามารถอาศัยสมการที่ (2) สำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนซี่หวีของอิเล็กโทรด [6]

$$C_T = (N-1)LC_{pu,T} \qquad (2)$$

จากสมการที่ (2) C_T มีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้ารวมของระบบโดยที่จำนวนซี่ของอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ N และความยาวของอิเล็กโทรดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ L โดยที่ $C_{pu,T}$ ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าความจุไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว

3. การออกแบบอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

โครงสร้างของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลดังรูปที่ 3 โดยโครงสร้างประกอบด้วยซี่อิเล็กโทรดทั้งหมดจำนวน 13 ซี่ ที่มีความยาว 3.5 มม. ซึ่งเรียงสลับกันระหว่างอิเล็กโทรดสัญญาณและอิเล็กโทรดกราวด์บนวัสดุซับสเตรตชนิด FR-4 ที่มีขนาด 47 มม. x 65 มม. x 3 มม. (กว้าง x ยาว x สูง) ดังรูปที่ 3 (ก) และเมื่อนำโครงสร้างและอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลที่ผลิตมาสร้างเป็นวงจรสำหรับบนแผ่น PCB จึงส่งผลทำให้ได้อุปกรณ์ตรวจวัดที่มีลักษณะโครงสร้างตามรูปที่ 3 (ข)



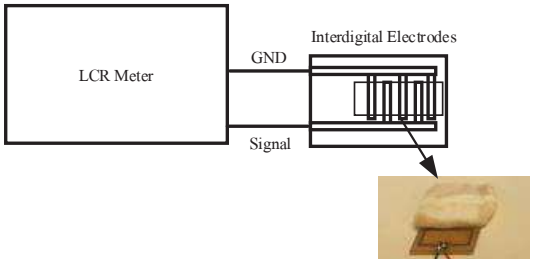
(ก)

(ข)

รูปที่ 3 โครงสร้างและอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลที่ผลิต (ก) โครงสร้างของอิเล็กโทรด (ข) อิเล็กโทรดที่ผลิต

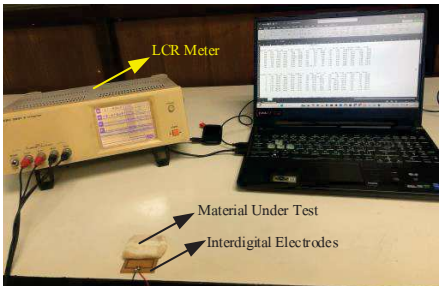
4. วิธีการดำเนินการทดลอง

ในส่วนวิธีการดำเนินการทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมตัวอย่างเนื้อหมูซึ่งประกอบด้วยส่วนสามชั้น ส่วนเนื้อแดง และส่วนติดมัน หลังจากนั้นจึงนำชิ้นเนื้อตัวอย่างไปผ่านกระบวนการตัดแต่ให้มีขนาดโดยประมาณ 35 มม. x 38 มม. x 10 มม. แล้วจึงแบ่งชิ้นเนื้อตัวอย่างออกเป็น 7 กลุ่มตัวอย่างโดยตัวอย่างกลุ่มที่หนึ่งคือชิ้นเนื้อที่ไม่ผ่านการแช่สารฟอร์มาลีน (Uncon.) และกลุ่มชิ้นเนื้อตัวอย่างตั้งแต่กลุ่มที่ 2 ถึงกลุ่มที่ 7 คือชิ้นเนื้อตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแช่สารฟอร์มาลีนซึ่งเริ่มต้นจากความเข้มข้นของสารตั้งแต่ 10% และเพิ่มความเข้มข้นของสารขึ้นไปตัวอย่างละโดยประมาณ 10 % จนกระทั่งความเข้มข้นของสารมีค่าเท่ากับ 100%



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการทดลองการตรวจวัดสารฟอร์มาลีนในเนื้อหมูด้วยอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

จากไดอะแกรมการทดลองการตรวจวัดสารฟอร์มาลีนในเนื้อหมูด้วยอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 4 อาศัยอุปกรณ์ LCR Meter HIOKI 3531 Z สำหรับสร้างความถี่ในช่วง 100 Hz – 900 Hz สำหรับจ่ายให้กับอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลพร้อมทั้งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารฟอร์มาลีนในชิ้นเนื้อตัวอย่าง (MUT) ดังนั้นภาพรวมของการทดลองจึงเป็นไปตามรูปที่ 5

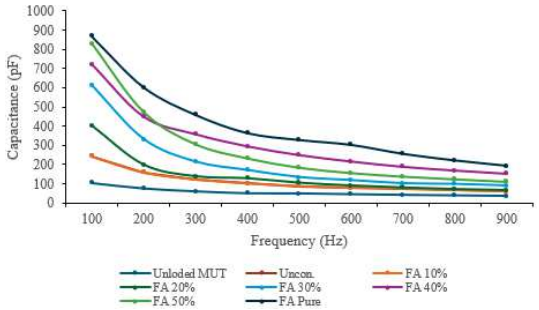


รูปที่ 5 ภาพรวมการทดลองตรวจวัดสารฟอร์มาลีนในเนื้อหมูด้วยอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

5. ผลการทดลอง

5.1 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

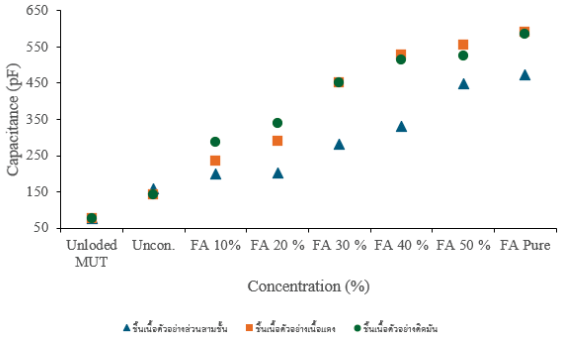
จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ในกรณีที่มีความแตกต่างของชิ้นเนื้อตัวอย่างซึ่งผ่านกระบวนการแช่สารฟอร์มาลีนที่มีความเข้มข้นของสารตั้งแต่ 0% ถึง 100% ซึ่งจากผลลัพธ์ของการทดลองแสดงให้เห็นถึงกรณีของการเปลี่ยนแปลงความถี่ช่วง 100 Hz ถึง 200 Hz ส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลง MUT โดยประมาณ 669.20 pF ซึ่งมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่การเปลี่ยนแปลงความถี่ 900 Hz ที่ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงโดยประมาณ 80 pF ในทุกกรณีของชิ้นเนื้อตัวอย่างสามแบบที่ผ่านกระบวนการแช่สารฟอร์มาลีนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังนั้นในกรณีของผลกระทบการเปลี่ยนแปลงความถี่จึงสามารถอธิบายได้ว่าช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 200 Hz มีแนวโน้มในการจำแนกความเข้มข้นของปริมาณสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในเนื้อหมูได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบที่การเปลี่ยนแปลงความถี่ 900 Hz



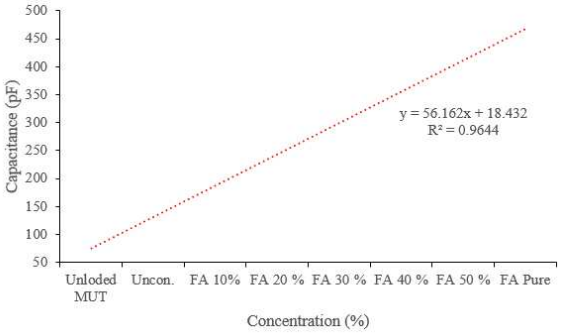
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่

5.2 ผลกระทบของความเข้มข้นสารฟอร์มาลีนต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอล

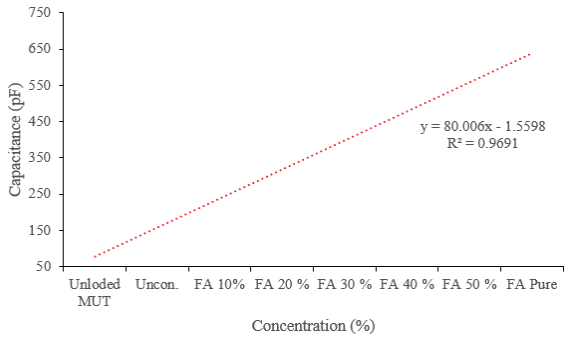
การวิเคราะห์ผลกระทบเลือกวิเคราะห์ที่ความถี่ 200 Hz เนื่องด้วยเหตุผลที่ว่า ณ ความถี่ดังกล่าวมีแนวโน้มในการจำแนกความเข้มข้นของปริมาณสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในเนื้อหมูได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงความถี่อื่น ซึ่งการวิเคราะห์ผลลัพธ์อาศัยการสร้างเส้นแนวโน้มจากข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงดังรูปที่ 7 โดยค่า R-Squared ของเส้นแนวโน้มในทุกกรณีของชิ้นเนื้อตัวอย่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 0.96 ในทุกกรณี ซึ่งจากกราฟดังรูปที่ 7 วงกลมแสดงถึงข้อมูลการวัดของชิ้นเนื้อตัวอย่างติดมัน สี่เหลี่ยมแสดงถึงข้อมูลที่ได้จากการวัดชิ้นเนื้อตัวอย่างส่วนเนื้อแดง และสามเหลี่ยมแสดงถึงข้อมูลการวัดชิ้นเนื้อตัวอย่างส่วนสามชั้น



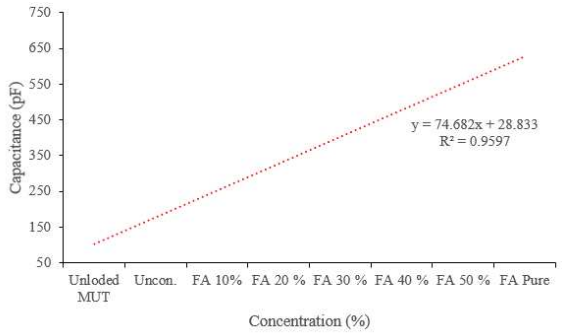
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในชิ้นเนื้อตัวอย่าง



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในชิ้นเนื้อตัวอย่างส่วนสามชั้น



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในชิ้นเนื้อตัวอย่างส่วนเนื้อแดง



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนอยู่ภายในชิ้นเนื้อตัวอย่างส่วนติดมัน

จากกราฟแสดงในรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อการปนเปื้อนของสารฟอร์มาลีนภายในชิ้นเนื้อตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้นในทุกกรณีของชิ้นเนื้อตัวอย่าง ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความจุไฟฟ้ามีอัตราการเพิ่มขึ้นโดยประมาณ 56.162 pF, 80 pF และ 47.68 pF ต่อหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีน ในกรณีของชิ้นเนื้อตัวอย่าง ส่วนสามชั้น ส่วนเนื้อแดง และส่วนติดมันตามลำดับ ในด้านความไม่แน่นอนของการวัดค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลมีค่าโดยประมาณ ± 2.07 pF ในทุกกรณีของการวัดการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีนในชิ้นเนื้อตัวอย่างอันประกอบด้วย ส่วนสามชั้น ส่วนเนื้อแดง และส่วนติดมัน

6. สรุป

จากผลลัพธ์การทดลองที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนที่ปนเปื้อนภายในเนื้อหมูสามารถสรุปได้ว่าในกรณีของความถี่ที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์ที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้อยู่ในช่วง 100 Hz ถึง 200 Hz ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวสามารถส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นสารสารฟอร์มาลีนจาก 0% ถึง 100% โดยประมาณ 669.20 pF นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าในช่วงความถี่ดังกล่าวมีแนวโน้มที่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นที่มีค่า R-Squared มากกว่า 0.95 และลักษณะการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบแปรผันตรง ในด้านของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าต่อความเข้มข้นของสารฟอร์มาลีนอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลที่นำเสนอในครั้งนี้มีค่าโดยประมาณ 56.162 pF, 80 pF และ 47.68 pF ต่อหนึ่งหน่วยความเข้มข้นของการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีนในชิ้นเนื้อตัวอย่างทั้งสามรูปแบบและมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยประมาณ ± 2.07 pF ในทุกกรณีของการวัดการปนเปื้อนสารฟอร์มาลีนในชิ้นเนื้อตัวอย่าง ดังนั้นจากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าอิเล็กโทรดอินเตอร์ดิจิตอลที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้มีแนวโน้มที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการปนเปื้อนของสารฟอร์มาลีนในผลิตภัณฑ์อาหารที่เป็นกลุ่มเนื้อหมู

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาภาควิศวกรรมไฟฟ้าและชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Z. Zhang et al., "Metal–organic frameworks (MOFs) based chemosensors/biosensors for analysis of food contaminants," Trends in Food Science & Technology, vol. 118, pp. 569-588, 2021.

[2] F. Nowshad, M. N. Islam, and M. S. Khan, "Concentration and formation behavior of naturally occurring formaldehyde in foods," Agriculture & Food Security, vol. 7, pp. 1-8, 2018.

[3] K.-H. Kim, S. A. Jahan, and J.-T. Lee, "Exposure to formaldehyde and its potential human health hazards," Journal of Environmental Science and Health, Part C, vol. 29, no. 4, pp. 277-299, 2011.

[4] N. K. Mehta et al., "Formaldehyde contamination in seafood industry: an update on detection methods and legislations," Environmental Science and Pollution Research, vol. 31, no. 42, pp. 54381-54401, 2024.

[5] A. V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, and M. Zahn, "Interdigital sensors and transducers," Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 5, pp. 808-845, 2004.

[6] P. K. Kythe, Handbook of conformal mappings and applications. Chapman and Hall/CRC, 2019.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุ

Fall Detector For The Elderly

เอกพล อนุสูเรนทร์ ชูศักยฐ์ กมลขันติธร กมลชนก ขุนทอง และปัทมพร แสงสุวรรณ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
E-mail: ekkapol.a@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

ปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของผู้สูงอายุคือ การล้ม โดยมีสาเหตุเกิดจากความสามารถทางด้านร่างกายที่ลดลง เช่น การมองเห็น การเดิน การทรงตัว หรือการเจ็บป่วยที่เกิดจากโรคประจำตัวของผู้สูงอายุ เป็นต้น อาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้สูงอายุ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการติดตามดูแลผู้สูงอายุอย่างใกล้ชิด ปริญญานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุ โดยใช้เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว BMI160 เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุ ส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F401CCU6 เพื่อประมวลผลว่าเป็นการล้มหน้า ล้มซ้าย ล้มขวา หรือล้มทรุด ใช้มอดูลการกำหนดตำแหน่ง ATGM336H เพื่อระบุตำแหน่งของผู้ล้ม จากนั้นจะทำการส่งลักษณะการล้มด้วยข้อความสั้นไปยังโทรศัพท์มือถือและแอปพลิเคชันไลน์ พร้อมทั้งส่งตำแหน่งของผู้ล้มไปยังแอปพลิเคชันไลน์โดยใช้มอดูล SIM800L เพื่อแจ้งให้ผู้ดูแลทราบ ทำให้ดำเนินการช่วยเหลือได้อย่างทันท่วงที

คำสำคัญ : ผู้สูงอายุ เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว ไมโครคอนโทรลเลอร์ มอดูลการกำหนดตำแหน่ง

Abstract

One of the major problems of the elderly is falling, which is caused by declining physical abilities, such as vision, walking, balance, or illnesses caused by the elderly's chronic diseases, etc., which can be dangerous for the elderly. Therefore, it is necessary to closely monitor and care for the elderly. This thesis presents a fall detector for the elderly using the BMI160 motion sensor to detect the elderly's movements. It sends the movement data to the STM32F401CCU6 microcontroller to process whether it is a frontal fall, a left fall, a right fall, or a collapse. It uses the ATGM336H positioning module to identify the location of the faller. Then, it will send the fall characteristics via a short message to the mobile phone and the LINE application. It also sends the location of the faller to the LINE application using the SIM800L module to notify the caregiver, so that assistance can be provided in a timely manner.

Keywords : elderly, inertial measurement sensor, microcontroller, whole constellation positioning module

1. บทนำ

จากผลสำรวจพบว่าจำนวนประชากร 1 ใน 3 ของประชากรทั่วโลกล้วนเป็นวัยผู้สูงอายุ ปัญหาที่ตามมาในวัยของผู้สูงอายุคือการที่ความสามารถของร่างกายนั้นลดลง เช่น การมองเห็น การเดิน หรือการทรงตัว เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้ผู้สูงอายุเสี่ยงประสบอุบัติเหตุที่เกิดจากการเสียการทรงตัว หรือการหกล้ม โดยอ้างอิงจากการศึกษาของซีราคิวซ์และคณะ ในประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าทั่วโลกมีผู้เสียชีวิตจากการพลัดตกหกล้มในปี พ.ศ. 2545 ประมาณ 391,000 คน และเพิ่มขึ้นเป็น 424,000 คน ในปี พ.ศ. 2555 เฉลี่ยวันละ 1,160 คน โดยผู้ที่มีอายุ 65 ปีขึ้นไปเสี่ยงต่อการหกล้มร้อยละ 28-35 ส่วนในผู้ที่มีอายุ 70 ปีขึ้นไปเสี่ยงต่อการหกล้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 32-42 จะเห็นได้ว่าการดูแลผู้สูงอายุไม่ให้เกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมานั้น เป็นสิ่งสำคัญที่คนรอบข้าง และครอบครัวของผู้สูงอายุควรเอาใจใส่ และต้องหาวิธีรับมือเมื่อเกิดเหตุการณ์เหล่านั้นขึ้น เพื่อที่จะสามารถเข้าช่วยเหลือผู้สูงอายุได้รวดเร็วและทันท่วงที

2. ทฤษฎี

2.1 การศึกษาลักษณะรูปแบบการล้ม

การล้มในผู้สูงอายุ เป็นสาเหตุสำคัญชนิดหนึ่งต่อสุขภาพของผู้สูงอายุ และทำให้ผู้สูงอายุมีสภาวะการพึ่งพิงสูงขึ้น จากสถิติการล้มในผู้สูงอายุ พบว่าผู้สูงอายุที่มีอายุ 65 ปีขึ้นไป มากกว่าหนึ่งล้านคนเคยมีประวัติการล้ม โดยพบว่า 1 ใน 4 ของผู้สูงอายุเคยล้ม และไม่สามารถคาดการณ์ว่าจะมีภาวะเสี่ยงต่อการล้มครั้งต่อไปเมื่อไหร่ โดยความหมายของการล้มจะสรุปได้ว่า การล้ม หมายถึง การที่ไม่สามารถทรงตัวในขณะที่เปลี่ยนแปลงท่าทาง หรือปะทะสิ่งของต่าง ๆ จนเสียหลัก ทำให้ส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายลงไปอยู่กับพื้นหรือในระดับที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจทำให้เกิดการบาดเจ็บหรือไม่ได้รับบาดเจ็บของร่างกาย ในการทดสอบการล้มในแต่ละรูปแบบ จะมีนิยามลักษณะท่าทางในการล้มทั้งหมด 4 รูปแบบ ดังนี้

1. ล้มหน้า ยืนตรงหันหน้าเข้าหาเบาะ ย่อเข่าลง โน้มตัวไปด้านหน้า วางเข่าทั้งสองข้างลงบนเบาะเพื่อรับน้ำหนักตัว ป้องกันไม่ให้ศีรษะ และลำคอกระแทกพื้นโดยยื่นแขนทั้งสองข้างออกและใช้แขนยันพื้น แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการล้มหน้า

2. ล้มซ้าย ยืนตรงหันด้านข้างเข้าหาเบาะ ย่อเข่าลง โน้มตัวไปด้านซ้าย ปล่อยตัวลงให้ส่วนหลังของสะโพกข้างหนึ่งปะทะพื้นใช้แขนยันพื้นเพื่อรับน้ำหนักตัว ป้องกันไม่ให้ศีรษะและลำคอกระแทกพื้นโดยใช้มือทั้งสองข้างยันเบาะ หรือนำแขนสองข้างมาไว้ด้านข้างของลำตัว แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการล้มซ้าย

3. ล้มขวา ยืนตรงหันด้านขวาเข้าหาเบาะ ย่อเข่าลง โน้มตัวไปด้านขวา ปล่อยตัวลงให้ส่วนหลังของสะโพกข้างขวาปะทะพื้นใช้แขนยันพื้นเพื่อรับน้ำหนักตัว ป้องกันไม่ให้ศีรษะ และลำคอกระแทกพื้นโดยใช้มือทั้งสองข้างยันเบาะ หรือนำแขนสองข้างมาไว้ด้านข้างของลำตัว แสดงดังรูปที่ 3



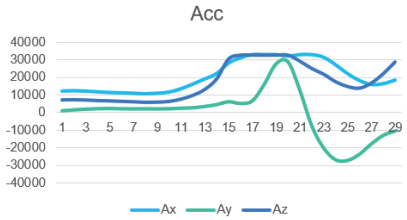
รูปที่ 3 ลักษณะการล้มขวา

4. ล้มทรุด ย่อเข่าลง โน้มตัวไปด้านหลัง ปล่อยตัวลง ให้ส่วนหลังของสะโพกปะทะพื้นใช้แขนยันพื้นไว้เพื่อรับน้ำหนักตัว ป้องกันไม่ให้ศีรษะ และลำคอกระแทกพื้นโดยใช้มือทั้งสองข้างยันเบาะ กรณีเสียหลักหงายหลัง แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะการล้มทรุด

จากการล้มทั้ง 4 รูปแบบ ทางผู้วิจัยได้นำเครื่องตรวจจับการล้มติดไว้บริเวณเอวด้านหลังของผู้ทดสอบ และทำการบันทึกข้อมูลของค่าความเร่งในแนวแกน X Y และ Z ของการล้มในลักษณะต่าง ๆ เพื่อหารูปแบบของค่าความเร่งในการนำมาพิจารณาว่าเกิดการล้มในลักษณะใด ซึ่งการล้มในแต่ละแบบก็จะมีรูปแบบของค่าความเร่งที่ต่างกันไป ตัวอย่างข้อมูลค่าความเร่งของทั้ง 3 แนวแกนแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลความเร่งของทั้ง 3 แนวแกน

2.2 เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว BMI160

สามารถตรวจจับค่าความเร่ง (Accelerometer)ในแนวแกน X Y และ Z ได้ตั้งแต่ 2g ถึง 16g รวมถึงค่าการหมุนวน (Gyroscope) ติดต่อสื่อสารข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทั้งแบบ I2C และ SPI ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าช่วง 3.0 – 5.0 โวลต์

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F401CCU6

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต มีหน่วยความจำแบบแฟลชขนาด 256 กิโลไบต์ หน่วยความจำแบบแรมขนาด 64 กิโลไบต์ ทำงานได้ที่ความถี่สูงสุด 84 เมกะเฮิรตซ์ มีตัวแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิตอยู่ภายในตัว มีมอดูลสื่อสารข้อมูลแบบ UART I2C SPI ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง 1.7 – 3.6 โวลต์

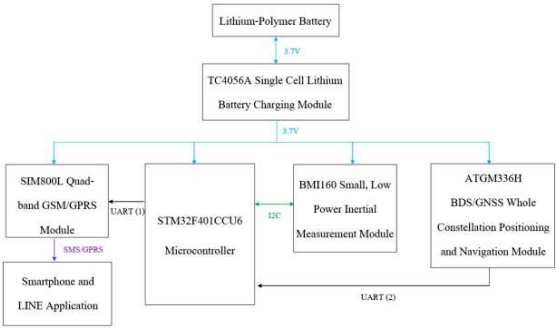
2.4 มอดูลการกำหนดตำแหน่ง ATGM336H

มอดูลนี้ใช้ระบุตำแหน่งโดยการรับและประมวลผลสัญญาณจากระบบนำทางผ่านดาวเทียม เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในระบบนำทาง ส่งข้อมูลผ่านการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส ใช้เวลา 32 วินาทีในการจับสัญญาณครั้งแรก มีความแม่นยำในการวัดความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าในช่วง 3.3 – 5.0 โวลต์

2.5 มอดูล SIM800L

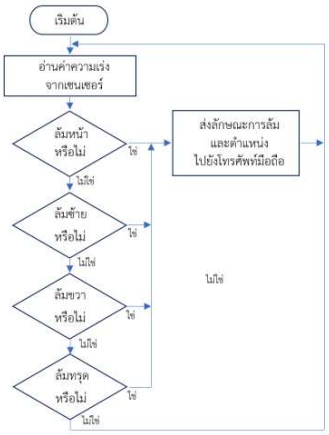
เป็นมอดูลระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบ GSM ขนาดเล็กของบริษัท SIMCOM สื่อสารข้อมูลกับไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยการสื่อสารอนุกรมแบบอะซิงโครนัส สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายมือถือเพื่อรับสายโทรศัพท์ หรือรับส่งข้อความสั้น สามารถรับส่งข้อมูลผ่านบริการ GPRS TCP/IP เข้ากันได้กับระบบ GSM รองรับความถี่ 850 900 1,800 1,900 เมกะเฮิรตซ์

3. โครงสร้างและการทำงานของเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุ



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุ

จากบล็อกไดอะแกรมของเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุในรูปที่ 6 แบตเตอรี่ลิเธียมโพลิเมอร์จะทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ทุกตัวในวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F401CCU6 จะรับข้อมูลความเร่งในแนวแกน X Y และ Z จากเซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว BMI160 ผ่านการสื่อสารข้อมูลอนุกรมแบบซิงโครนัสเพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นการล้มในรูปแบบต่าง ๆ มอดูลการกำหนดตำแหน่ง ATGM336H จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลเพื่อใช้ระบุตำแหน่งที่เกิดการล้ม จากนั้นมอดูล SIM800L จะนำรูปแบบการล้มและตำแหน่งที่เกิดการล้มส่งเป็นข้อความสั้นไปยังโทรศัพท์มือถือ พร้อมกับส่งข้อความกับตำแหน่งที่เกิดการล้มไปยังแอปพลิเคชันไลน์ผ่านการบริการ GPRS โดยซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของเครื่องเป็นดังโฟลว์ชาร์ตในรูปที่ 7



รูปที่ 7 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของเครื่อง

4. ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

การทดสอบหาความถูกต้องในการตรวจจับการล้ม

ได้ทำการทดสอบหาความถูกต้องในการตรวจจับการล้ม โดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 6 คน ทำการล้มคนละ 5 ครั้ง โดยได้ทดลองการล้มหน้า ล้มซ้าย ล้มขวา และล้มทรุดตามลำดับ พร้อมทั้งบันทึกความถูกต้องลงในตารางพร้อมทั้งคำนวณหาค่าความถูกต้องเฉลี่ยออกมา แสดงดังตารางที่ 1 ถึง ตารางที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 1 การทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับการล้มหน้า

ครั้งที่ / จำนวนผู้ทดสอบ	1	2	3	4	5	ค่าความเที่ยงตรง (เปอร์เซ็นต์)
1	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	100%
2	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	100%
3	ล้มหน้า	-	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	80%
4	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	100%
5	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	-	ล้มหน้า	80%
6	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	ล้มหน้า	100%

ความถูกต้องเฉลี่ยในการตรวจจับการล้มหน้าคิดเป็น 93.33%

ตารางที่ 2 การทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับการล้มซ้าย

ครั้งที่ / จำนวนผู้ทดสอบ	1	2	3	4	5	ค่าความเที่ยงตรง (เปอร์เซ็นต์)
1	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	100%
2	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	-	80%
3	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	100%
4	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	100%
5	-	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	80%
6	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	ล้มซ้าย	-	ล้มซ้าย	80%

ความถูกต้องเฉลี่ยในการตรวจจับการล้มซ้ายคิดเป็น 90.00%

ตารางที่ 3 การทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับการล้มขวา

ครั้งที่ / จำนวนผู้ทดสอบ	1	2	3	4	5	ค่าความเที่ยงตรง (เปอร์เซ็นต์)
1	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	100%
2	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มทรุด	80%
3	ล้มขวา	ล้มขวา	-	ล้มขวา	ล้มทรุด	60%
4	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	100%
5	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	100%
6	ล้มขวา	ล้มทรุด	ล้มขวา	ล้มขวา	ล้มขวา	80%

ความถูกต้องเฉลี่ยในการตรวจจับการล้มขวาคิดเป็น 86.67%

ตารางที่ 4 การทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับการล้มทรุด

ครั้งที่ / จำนวนผู้ทดสอบ	1	2	3	4	5	ค่าความเที่ยงตรง (เปอร์เซ็นต์)
1	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	100%
2	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	100%
3	-	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	80%
4	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	100%
5	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	100%
6	ล้มทรุด	ล้มทรุด	ล้มทรุด	-	ล้มทรุด	80%

ความถูกต้องเฉลี่ยในการตรวจจับการล้มทรุดคิดเป็น 93.33%

ทุกครั้งที่เกิดการล้ม เครื่องตรวจจับการล้มสามารถแจ้งเตือนลักษณะการล้มด้วยข้อความสั้นไปยังโทรศัพท์มือถือและแอปพลิเคชันไลน์ และส่งตำแหน่งไปยังแอปพลิเคชันไลน์ได้

5. สรุป

งานวิจัยเรื่องเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุนี้ ในการทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับการล้มหน้าคิดเป็น 93.33% ความถูกต้องในการตรวจจับการล้มซ้ายคิดเป็น 90.00% ความถูกต้องในการตรวจจับการล้มขวาคิดเป็น 86.67% ความถูกต้องในการตรวจจับการล้มทรุดคิดเป็น 93.33% ตามลำดับ และเครื่องตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุนี้สามารถแจ้งเตือนลักษณะการล้มด้วยข้อความสั้นไปยังโทรศัพท์มือถือและแอปพลิเคชันไลน์ และส่งตำแหน่งไปยังแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อแจ้งผู้ดูแลทราบถึงพฤติกรรมการล้มของผู้สูงอายุได้

เอกสารอ้างอิง

[1] ณัฐวุฒิ ถาวรวงษ์, อภิรักษ์ อัครเศรษฐัง และปัญญา มัฆะศร. 2554. “การออกแบบชุดตรวจจับการล้มของผู้สูงอายุด้วยเซ็นเซอร์การเอียง.” **วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร**. ปีที่ 13. ฉบับที่ 3 (สิงหาคม) : 43-46.

[2] กฤษณะ ชินสาร, ชิดชนก เหลือสินทรัพย์, เบญจภรณ์ จันทรกองกุล, ภูสิต กุลเกษม, สุวรรณา รัศมีขวัญ, และคนอื่น ๆ. 2557. “การตรวจจับการหกล้มของผู้สูงอายุในห้องพักในบ้านพักคนชรา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาการสารสนเทศ มหาวิทยาลัยบูรพา.

[3] พงษ์พันธ์ สมแพง, และธนัญ จารุวิทยโกวิท. 2561. “ระบบตรวจจับการล้มแบบ 2 มิติด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งแบบบลูทูธ.” ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกพล อนุสูเรนทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักยฐ์ กมลขันติธร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



กมลชนก ขุนทอง ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



ปัทมพร แสงสุวรรณ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003) หน่วยการเรียนรู้ มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า

Development and Efficiency Evaluation of an Instructional Package for Electrical Installation 1 (30104-2003): Learning Unit on Electrical Installation Standards

ชัยณรงค์ บุตรจำนง ชาญชัย แสนจันทร์ และ ประกาศิต ปราบพาล
วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1, อุดรธานี
E-mail:chai0876396057@gmail.com, petong.chanchai@gmail.com, prakasit.pra@udontech.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของชุดการสอนรายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003) หน่วยการเรียนรู้ มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2567 การวิจัยใช้เทคนิค MIAP (Motivation, Information, Application และ Progress) ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายทอดความรู้ที่เน้นสมรรถนะของผู้เรียน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและทักษะการทำงานกลุ่มของนักศึกษา รวมถึงประเมินความพึงพอใจต่อการเรียนรู้ด้วยเทคนิคดังกล่าว กลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี โดยแบ่งเป็นกลุ่มทดลองที่ใช้ชุดการสอนที่พัฒนาและกลุ่มควบคุมที่ใช้วิธีการเรียนการสอนแบบดั้งเดิม เครื่องมือวิจัยประกอบด้วยแบบทดสอบก่อนเรียน-หลังเรียน แบบสอบถามความพึงพอใจ และการสัมภาษณ์เชิงลึก

ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มทดลองที่ใช้ชุดการสอนที่พัฒนามีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 นอกจากนี้ นักศึกษายังมีความพึงพอใจต่อชุดการสอนอยู่ในระดับสูง (ค่าเฉลี่ย 4.72) แสดงให้เห็นว่าการใช้สื่อการสอนเชิงโต้ตอบและกิจกรรมเสริมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค MIAP ในการปรับปรุงกระบวนการเรียนการสอนด้านการติดตั้งระบบไฟฟ้าในระดับอาชีวศึกษา ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาอื่น ๆ ได้ต่อไป

Abstract

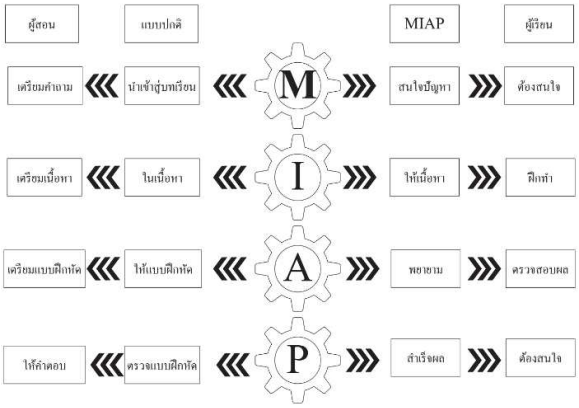
This research focuses on developing and evaluating the effectiveness of an instructional package for the "Electrical Installation 1" course (30104-2003), specifically the standard electrical system installation module, under the 2024 Higher Vocational Eeducation. The study employs the MIAP technique (Motivation, Information, Application, and Progress), a competency-based knowledge transfer approach aimed at enhancing students' academic achievement and teamwork skills while assessing their satisfaction with the learning experience. The sample consists of Higher Vocational Certificate (HVC) students majoring in Electrical Power at Udon Thani Technical College, divided into an experimental group using the developed instructional package and a control group following traditional teaching methods. Research instruments include pre- and post-tests, satisfaction questionnaires, and in-depth interviews.

The findings indicate that the experimental group demonstrated significantly higher learning achievement than the control group at a 0.01 statistical significance level. Additionally, students expressed high satisfaction with the instructional package (mean score = 4.72). These results highlight the effectiveness of interactive teaching materials and supplementary activities in enhancing learning outcomes. This study underscores the potential of the MIAP technique in improving vocational education for electrical installation and its applicability to other fields.

1. บทนำ

ประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในหลายมิติ ไม่ว่าจะเป็นด้านเศรษฐกิจ สังคม เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลให้เกิดทั้งโอกาสและข้อจำกัดในการพัฒนาการศึกษาในระดับอาชีวศึกษามีบทบาทสำคัญในการผลิตบุคลากรที่มีทักษะเฉพาะทางเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาดแรงงาน การพัฒนาหลักสูตรและกระบวนการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพจึงเป็น หนึ่งในแนวทางที่ช่วยพัฒนาการเรียนรู้ของนักศึกษาได้ดี คือ กระบวนการ MIAP model [1-3] ในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นกระบวนการจัดการถ่ายทอดความรู้ ที่เน้นด้านสมรรถนะของผู้เรียน มีองค์ประกอบ ทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ ขั้นสนใจ

(Motivation), ขั้นศึกษาข้อมูล (Information), ขั้นพยายาม (Application) และ ขั้นสำเร็จผล (Progress) การจัดการการถ่ายทอดความรู้โดยใช้กระบวนการ MIAP สามารถส่งเสริมการเรียนรู้ของผู้รับได้เป็นอย่างดี สร้างการเรียนรู้แก่ผู้ถ่ายทอดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 กระบวนการจัดการเรียนการสอน MIAP model

2. การจัดการเรียนรู้ระดับอาชีวศึกษา

การจัดการอาชีวศึกษาเป็นการจัดการศึกษาที่มุ่งเน้นการพัฒนาทักษะและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับอาชีพ เพื่อสร้างบุคลากรที่มีคุณภาพในระดับต่างๆ ได้แก่ ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) และปริญญาตรีสายเทคโนโลยีหรือสายปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังรวมถึงการฝึกอบรมวิชาชีพทั้งระยะสั้นและระยะยาว เพื่อเพิ่มพูนความสามารถในการประกอบอาชีพ การจัดการอาชีวศึกษาต้องสอดคล้องกับปรัชญา มาตรฐานคุณวุฒิ และมาตรฐานการอาชีวศึกษาในแต่ละระดับ เพื่อให้ผู้เรียนมีความพร้อมในการเข้าสู่ตลาดแรงงาน

การเรียนการสอนในสายอาชีพ [4-6] ให้ความสำคัญกับการเรียนรู้โดยการลงมือปฏิบัติจริง เพื่อส่งเสริมให้ผู้เรียนสามารถนำความรู้และทักษะไปใช้ในการวางแผน แก้ไขปัญหา และปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในยุคที่เทคโนโลยีสื่อสารออนไลน์ มีบทบาทสำคัญ ผู้เรียนจำนวนมากมีแนวโน้มที่จะใช้เวลาส่วนตัวไปกับสื่อสังคมออนไลน์ ทำให้ขาดความสนใจในการเรียนในห้องเรียน ซึ่งส่งผลให้ผู้เรียนไม่เข้าใจบทเรียน เรียนตามเพื่อนไม่ทัน และมีผลการเรียนที่ลดลง นอกจากนี้ ผู้เรียนในสายอาชีพมักมีลักษณะเฉพาะตัวที่มีความคิดเป็นของตนเองสูง ผู้สอนจึงต้องใช้กลยุทธ์ที่น่าสนใจเพื่อดึงดูดความสนใจของผู้เรียนให้กลับมามีส่วนร่วมในบทเรียน

3. การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003) หน่วยการเรียนรู้ มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินผลชุดการสอนสำหรับวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003) ซึ่งครอบคลุมหน่วยการเรียนรู้ เรื่อง มาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2567 ในสาขาวิชาไฟฟ้า กลุ่มอาชีพพลังงานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัย คือ การสร้างและวัดประสิทธิภาพของชุดการเรียนการสอนดังกล่าว โดยประเมินจากผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและความพึงพอใจของผู้เรียนการวิจัยใช้วิธีการทดลองโดยแบ่งนักศึกษาออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกเรียนด้วยชุดการเรียนการสอนที่พัฒนาขึ้น และกลุ่มที่สองเรียนด้วยวิธีการสอนแบบเดิม ข้อมูลถูกเก็บรวบรวมผ่านแบบทดสอบก่อนและหลังเรียน แบบสอบถามความพึงพอใจ และการสัมภาษณ์เชิงลึก

การออกแบบวิเคราะห์พฤติกรรมการเรียนรู้ รหัส 30104-2003 ชื่อวิชา การติดตั้งไฟฟ้า 1 การพัฒนาหลักสูตรและกระบวนการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม การนำกระบวนการ MIAP มาใช้สามารถช่วยส่งเสริมการเรียนรู้ของนักศึกษา

แรงจูงใจ (Motivation) การสร้างแรงจูงใจในการเรียนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเรียนรู้ ซึ่งสามารถอธิบายถึงความสำคัญของวิชาการติดตั้งไฟฟ้าและงานระบบไฟฟ้า การใช้ตัวอย่างจากสถานการณ์จริงเพื่อเชื่อมโยงเนื้อหากับการใช้งานในชีวิตประจำวัน การกระตุ้นให้นักศึกษาตั้งเป้าหมายทางอาชีพ เช่น การเป็นช่างไฟฟ้ามืออาชีพ หรือการสอบใบรับรองมาตรฐานวิชาชีพ

การให้ข้อมูลและองค์ความรู้ (Information) การนำเสนอเนื้อหาวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น การใช้สื่อการสอนแบบอินเทอร์แอคทีฟ หรือการสาธิตขั้นตอนการติดตั้งไฟฟ้า การใช้สื่อการสอนที่หลากหลาย เช่น หนังสือเรียน คู่มือการติดตั้งไฟฟ้า และซอฟต์แวร์จำลองการเดินระบบไฟฟ้า การจัดการเรียนการสอนแบบปฏิบัติการ (Hands-on Learning) โดยให้นักศึกษาได้ฝึกปฏิบัติจริงกับอุปกรณ์ไฟฟ้า การส่งเสริมการเรียนรู้แบบกลุ่มเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความรู้ระหว่างนักศึกษา

การนำไปประยุกต์ใช้ (Application) การให้นักศึกษาได้ฝึกปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งระบบไฟฟ้า การเชื่อมโยงทฤษฎีกับการใช้งานจริง โดยการให้นักศึกษาออกแบบและติดตั้งวงจรไฟฟ้าในสถานการณ์ที่จำลองขึ้นมา การฝึกปฏิบัติเพื่อให้นักศึกษาได้รับ

ประสบการณ์จริงในการทำงาน การใช้ปัญหาเชิงปฏิบัติให้แก่นักศึกษาเพื่อทดสอบความเข้าใจและทักษะการแก้ปัญหาหน้างาน

การติดตามและประเมินผล (Progress) การใช้แบบทดสอบก่อนและหลังเรียนเพื่อวัดพัฒนาการของนักศึกษา การประเมินผลจากการปฏิบัติงานจริง เช่น การตรวจสอบการติดตั้งระบบไฟฟ้า การให้คะแนนตามเกณฑ์สมรรถนะ (Competency-Based Assessment) โดยเน้นการวัดผลด้านทักษะการปฏิบัติงาน การนำกระบวนการ MIAP มาใช้ในการเรียนการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 จะช่วยส่งเสริมพฤติกรรมการเรียนรู้ของนักศึกษา

4. สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สถิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยคำนวณจากสูตร ดังนี้

- ค่าคะแนนเฉลี่ย

$$\overline{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (1)$$

เมื่อ $\overline{X}$ แทน ผลคะแนนเฉลี่ย
$\sum X$ แทน ผลรวมของคะแนนทั้งหมด
N แทน จำนวนนักศึกษาในกลุ่ม

- ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน[5]

$$S.D. = \sqrt{\frac{N\sum X_1^{\,2} - \sum X_2^{\,2}}{N(N-1)}} \quad (2)$$

เมื่อ $S.D.$ แทน ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนน
$\sum X_1^2$ แทน ผลรวมของคะแนนแต่ละตัวยกกำลังสอง
$\sum X_2^2$ แทน ผลรวมของคะแนนทั้งหมดยกกำลังสอง
N แทน จำนวนนักศึกษาในกลุ่ม

สถิติในการตรวจสอบคุณภาพ

$$t = \frac{\overline{D}}{S.D.} \quad (3)$$

เมื่อ t แทน ค่าดรรชนีความสอดคล้องระหว่างข้อสอบกับจุดประสงค์การเรียนรู้
$\overline{D}$ แทน ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของค่าของตัวแปรตามแต่ละคู่
$S.D.$ แทน ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของคะแนน

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การวิเคราะห์เปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์การเรียนรู้โดยเปรียบเทียบคะแนนความรู้ก่อนและหลังการจัดการเรียนการสอนด้วยกระบวนการเรียนรู้แบบ MIAP ด้วยสถิติ Pair t-test
2. การวิเคราะห์เปรียบเทียบทักษะการทำงานเป็นทีมก่อนและหลังการจัดการเรียนการสอนด้วยกระบวนการเรียนรู้แบบ MIAP ด้วยสถิติ Pair t-test
3. วิเคราะห์ข้อมูลทักษะการทำงานเป็นทีม และความพึงพอใจหลังจัดการเรียนการสอนด้วยกระบวนการเรียนรู้แบบ MIAP โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

5. ผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการศึกษาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และความสนใจของนักศึกษาสาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี ระดับชั้น ปวส.1 จำนวนนักศึกษา ชาย จำนวน 15 คน ที่ได้รับการสอนโดยใช้เทคนิคการจัดการเรียนรู้แบบ MIAP เป็นกระบวนการจัดการถ่ายทอดความรู้ ที่เน้นด้านสมรรถนะของผู้รับ มีองค์ประกอบ ทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ Motivation, Information, Application และ Progress ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงทดลอง รายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนก่อนและหลังการสอนด้วย MIAP

การทดสอบ	n	M	S.D.	t	P-Value
ก่อนเรียน	15	13.56	2.01	25.29	<0.001
หลังเรียน	15	24.52	2.72		

จากตารางที่ 1 พบว่า คะแนนเฉลี่ยผลสัมฤทธิ์การเรียนรู้ที่จัดการเรียนการสอนด้วย กระบวนการเรียนรู้แบบ MIAP ของนักศึกษาหลังเรียน (M = 24.52, SD = 2.72) สูงกว่าก่อนเรียน (M = 13.56, SD = 2.01) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (P<.001) ผลการทดสอบความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการใช้ การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003)

ตารางที่ 2 ความพึงพอใจของนักศึกษาที่มีต่อการใช้ การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดการสอนวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 (30104-2003)

ความพึงพอใจ	M	S.D.	ระดับ
ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนการสอน	4.65	0.57	มากที่สุด
ด้านเนื้อหา	4.45	0.63	มากที่สุด
ด้านการจัดการ	4.77	0.53	มากที่สุด
ด้านสื่อการเรียนการสอน	4.73	0.54	มากที่สุด
ด้านการจัดสภาพแวดล้อม	4.75	0.54	มากที่สุด
ค่าคะแนนเฉลี่ยภาพรวม	4.72	0.56	มากที่สุด

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนในรายวิชา 30104-2003 รายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า ๑ หน่วยการเรียนรู้ เรื่องมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า สอนโดยใช้เทคนิคการจัดการเรียนรู้ (MIAP) ก่อนการทดลองและหลังการทดลองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

5.1.2 ความพึงพอใจของนักศึกษาที่ได้รับการสอนโดยใช้เทคนิคการจัดการเรียนรู้แบบแบ่งกลุ่มผลสัมฤทธิ์ (MIAP) คะแนนโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.72

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ด้านผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน รายวิชา 30104-2003 รายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 หน่วยการเรียนรู้ เรื่องมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ของนักศึกษา โดยใช้กระบวนการ MIAP สามารถส่งเสริมการเรียนรู้ของผู้รับได้เป็นอย่างดี จากสมมุติฐานข้อที่ 1 ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน รายวิชา 30104-2003 รายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 หน่วยการเรียนรู้ เรื่องมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ของนักศึกษาที่ได้รับการสอนโดยใช้โดยใช้กระบวนการ MIAP ก่อนการทดลองและหลังการทดลองแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.01

ด้านความพึงพอใจในวิธีการสอนรายวิชา รายวิชา 30104-2003 รายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 หน่วยการเรียนรู้ เรื่องมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า ของนักศึกษาโดยใช้กระบวนการ MIAP มีคะแนนโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.72 เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ผู้เรียนมีความพึงพอใจอยู่ในระดับค่าเฉลี่ยสูงสุด ได้แก่ ด้านการจัดการ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.77 รองลงมาได้แก่ ด้านการจัดสภาพแวดล้อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.75 ด้านสื่อการเรียนการสอน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.73 ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนการสอน เท่ากับ 4.65 และ ด้านเนื้อหา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 คือ นักศึกษากลุ่มทดลองมีความสนใจในวิธีการสอนรายวิชา 30104-2003 รายวิชาการติดตั้งไฟฟ้า 1 หน่วยการเรียนรู้ เรื่องมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1 ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ขจรพงษ์ พู่กมรไกรภพ. (2562). MIAP กับการจัดการเรียนรู้ระดับอาชีวศึกษ.*วารสารวิจัยและนวัตกรรมสถาบันการอาชีวศึกษากรุงเทพมหานคร*, 2 (2), 14–21.

[2] ชวลิต ศุภศักดิ์ธำรง.(2561). ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและความสามารถในการใช้เหตุผลในการเรียนวิชาสัมมนาการบริหารทรัพยากรมนุษย์ของนักศึกษาสาขาวิชาการบริหารทรัพยากรมนุษย์โดยใช้วิธีการสอนแบบ MIAP. *Veridian E Journal*, 11(3), 506-518.

[3] ขจรพงษ์ พู่กมรไกรภพ และคณะ. (2563). ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยกระบวนการสอนแบบMIAP ร่วมกับบทเรียนผ่านเครือข่ายเรื่อง การออกแบบเงื่อนไข ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ. *วารสารครุศาสตร์อุตสาหกรรม*, 19(2), 110-117.

[4] ณัฐพล ธนเชวงสกุล และณมน จีรังสุวรรณ. (2561). การออกแบบรูปแบบการเรียนการสอนด้วยกระบวนการเรียนรี่แบบ MIAP บนเทคโนโลยีการประมวลผลแบบคลาวด์ของนักศึกษาระดับปริญญาตรีเพื่อส่งเสริมทักษะการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21. *วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร*, 20(4), 58-69.

[5] ทักษพร เชื้อสา. (2559). ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนและความสามารถในการให้เหตุผลวิชาหลักการตลาดของนักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ที่ใช้การสอนแบบ MIAP และการสอนตามกระบวนการคิด ฮิวริสติกส์. ใน วิทยานิพนธ์ครุศาสตรมหาบัณฑิต สาขาหลักสูตรและการสอน. มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

[6] รัชพล กลัดชื่น และกฤช สินธนะกุล. (2562). การพัฒนารูปแบบการเรียนการสอนออนไลน์แบบผสมผสานตามแผนการสอนฐานสมรรถนะด้วยกระบวนการ MIAP รายวิชาการสื่อสารข้อมูลและเครือข่าย. *วารสารวิจัยและนวัตกรรม สถาบันการอาชีวศึกษากรุงเทพมหานคร*, 2(2), 117-127.



ชัยณรงค์ บุตรจำนง จบการศึกษา ปทส.ครุเทคนิคไฟฟ้ากำลัง จาก วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน คอ.ม. เทคโนโลยีการศึกษาทางการอาชีวะศึกษาและเทคนิคศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันเป็น ครู ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1



ชาญชัย แสนจันทร์ จบการศึกษา ค.อ.บ.วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์โทรคมนาคม จาก สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน คอ.ม. เทคโนโลยีการศึกษาทางการอาชีวะศึกษาและเทคนิคศึกษา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง ปร.ด.การบริหารและภาวะผู้นำทางการศึกษา จากมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปัจจุบันเป็น ผู้อำนวยการ วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1



ประกาศิต ปราบพาล จบการศึกษา วศ.บ.วิศวกรรมไฟฟ้า จาก มหาวิทยาลัยขอนแก่น วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ จาก มหาวิทยาลัยมหาสารคาม วศ.ด.วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปัจจุบันเป็น ครู ประจำแผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคอุดรธานี สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การควบคุมอุณหภูมิที่ผิวท่อฮีทไปป์

Temperature control at the surface of the heat pipe

สาเหะอันวา ดะแซ[1], ปิยะภัทร พ่วงศรี[1], เหมหงส์ จูรีนุกูล[1] และสันติ หวังนิพพานโต[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
เลขที่ 833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร
E-mail: Sahead77@gmail.com

บทคัดย่อ

การควบคุมอุณหภูมิของผิวท่อฮีทไปป์เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) โดยใช้ วิธี Pole Placement เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Kp, Ki, Kd) ให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่ศึกษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ Pole Placement สามารถลดค่า Overshoot ปรับปรุง Response Time และเพิ่มความเสถียรของระบบได้ดีกว่าการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีแบบดั้งเดิมของ Ziegler nicole นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบผลการควบคุมอุณหภูมิระหว่างการใช้ตัวควบคุม PID ที่ได้จากการคำนวณกับการทดสอบจริง เพื่อยืนยันความแม่นยำและประสิทธิภาพของระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดในสภาวะคงที่มีค่าน้อยมาก และการตอบสนองของระบบสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามการตั้งค่าเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ต้องการการควบคุมอุณหภูมิอย่างแม่นยำได้ต่อไป

คำสำคัญ: การควบคุมอุณหภูมิ, ฮีทไปป์, PID Controller, Pole Placement

Abstract

The temperature control of the heat pipe surface is an important factor that affects the efficiency of heat transfer. Especially in systems that need to maintain a constant temperature. This research presents the design of PID Controller using the Pole Placement method to configure the controller parameters (Kp, Ki, Kd) to the optimal value for the system being studied. The experimental results show that the use of pole placement can reduce overshoot, improve response time, and increase system stability better than using the parameters obtained from the traditional Ziegler nicole method. The experimental results show that the error value in the constant state is very small, and the system response can be adjusted according to the target setting effectively. This developed system can be further applied in industries that require precise temperature control.

Keywords: Temperature Control, Heat Pipe, PID Controller, Pole Placement

1. บทนำ

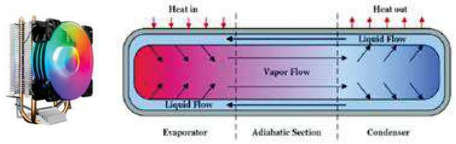
การควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุยังคงเป็นประเด็นที่ท้าทาย เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิววัสดุมักมีความไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะในระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง เช่น การเชื่อมโลหะ การทำความร้อนด้วยอินฟราเรด หรือการใช้งานทางการแพทย์ เช่น การจี้เนื้อเยื่อด้วยความร้อน ซึ่งต้องการความแม่นยำของอุณหภูมิที่ผิวในระดับสูงมาก หากควบคุมอุณหภูมิไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานหรือผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน

จากปัญหาดังกล่าว การพัฒนาเทคนิคการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุให้สามารถตอบสนองได้รวดเร็วและมีเสถียรภาพ เช่น การนำเทคนิคควบคุมเชิงพยากรณ์ (Model Predictive Control: MPC) หรือการปรับจูน PID Controller อย่างแม่นยำ โดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เช่น Pole Placement หรือ Ziegler–Nichols เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบที่มีการตอบสนองแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear response) ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของผิววัตถุด้วย PID Controller โดยออกแบบผ่านวิธี Pole Placement เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพ แม่นยำ และลดความผันผวนที่อาจเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกหรือความไม่แน่นอนในกระบวนการทำงาน[5] ซึ่งการทำงานของฮีทไปป์ (Heat Pipe) อาศัยหลักการกระจายความร้อนและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อ ที่ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วและมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ต่ำ ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ฮีทไปป์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลากหลายระบบ เช่น ระบบระบายความร้อนของพีซี ระบบกู้คืนพลังงานในอุตสาหกรรม และระบบแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องมือแพทย์ การควบคุมอุณหภูมิของตัวฮีทไปป์เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบโดยรวม [3]

2. ทฤษฎี

2.1 หลักการทำงานของฮีทไปป์

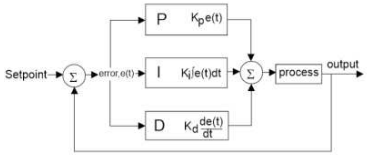
ฮีทไปป์เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ทำงานโดยอาศัยหลักการการระเหยและการควบแน่นของสารทำงานภายในท่อที่ปิดสนิท ฮีทไปป์มีความสามารถในการนำความร้อนได้มากกว่าวัสดุนำความร้อนทั่วไปถึง 100-1,000 เท่า [2] โดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอก ฮีทไปป์ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก 1) ส่วนระเหย (Evaporator Section) เป็นส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งความร้อน ทำให้สารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลวเกิดการระเหยกลายเป็นไอ 2) ส่วนกลาง (Adiabatic Section) เป็นส่วนที่ไอของสารทำงานเคลื่อนที่จากส่วนระเหยไปยังส่วนควบแน่น
3) ส่วนควบแน่น (Condenser Section) เป็นส่วนที่ไอของสารทำงานคายความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ของเหลวที่เกิดขึ้นจะไหลกลับไปยังส่วนระเหยผ่านโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick Structure) ด้วยแรงคาปิลลารี (Capillary Force) [1]



รูปที่ 1 โครงสร้างของฮีทไปป์แบบ ก.) ตัวยู ข.) แท่งตรง [4]

2.2 การควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

การควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Derivative) เป็นวิธีการควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรม เพื่อรักษาค่าของตัวแปรในกระบวนการให้อยู่ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ตัวควบคุม PID ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 การใช้ตัวควบคุมแบบ PID ในกระบวนการแบบปิด

สมการทั่วไปของตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถแสดงได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ

u(t) คือสัญญาณควบคุมที่ใช้ป้อนเข้าสู่ระบบ

e(t) คือค่าผิดพลาดหาได้จาก e(t) = - r(t) - y(t)

r (t), y(t) คือค่าเป้าหมาย (Setpoint)และค่าจริงของระบบ (Process)

K_p คือ, K_d คือพารามิเตอร์เกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน แบบอินทิกรัล และแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ

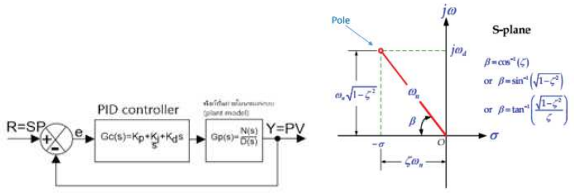
ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) สามารถเขียน ได้เป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์ K_p คือ, K_d ให้เหมาะสมจะช่วยให้ระบบสามารถตอบสนองได้ดีขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative Controller) เป็นกลไกควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) จะมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและสามารถปรับแต่งได้หลายวิธี เช่น วิธี Ziegler-Nichols, วิธี Cohen-Coon หรือวิธี Pole Placement [5]

2.3 วิธีการของ Pole Placement

Pole Placement เป็นเทคนิคในทฤษฎีระบบควบคุมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมโดยการกำหนดตำแหน่งของโพลของระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop System) ให้ได้ตามต้องการ [5] ตำแหน่งของโพลจะกำหนดลักษณะการตอบสนองของระบบ เช่น ความเร็วในการตอบสนอง (Response Speed), การพุ่งเกิน (Overshoot), และเสถียรภาพของระบบ (Stability) ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Pole Placement มีดังนี้



รูปที่ 3 ตำแหน่ง pole ของระบบควบคุมวงปิด ให้อยู่ทางซ้ายของ S-plane

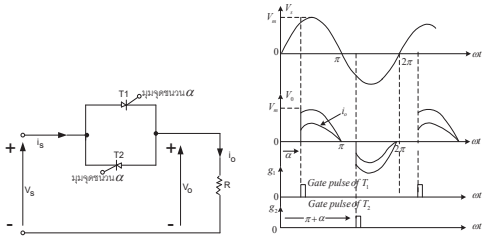
1) หาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (System Transfer Function) ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปิด (Open-Loop Transfer Function) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออกของระบบ 2) กำหนดตำแหน่งโพลที่ต้องการ โพลของระบบควบคุมวงปิดควรกำหนดโพลทั้งหมดให้อยู่ในซีกซ้ายของระนาบ S เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและตอบสนองตามที่ต้องการ
3) เทียบสัมประสิทธิ์ของสมการลักษณะของฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบลูปปิดกับพหุนามลักษณะโพลที่ต้องการ พหุนามที่ต้องการคือ

$$s^2+2\delta\omega_n s+\omega_n^2=0 \quad (3)$$

2.4 เอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ เปิด ปิดไฟ สามารถควบคุมกระแสอินพุตได้ทั้ง 2 ทิศทางผ่านมุมจุดชนวน (Triggering angle) ไปที่เอสซีอาร์ (T1) และเอสซีอาร์ (T2) ดังรูปที่ 4 ทำให้เราสามารถปรับเปลี่ยนแรงดัน V_o ที่จ่ายให้กับโหลดผ่านมุมจุดชนวน ตามสมการ

$$V_o = V_s \frac{1}{\pi}\left(\pi-\alpha+\frac{\sin 2\alpha}{2}\right) \quad (4)$$



รูปที่ 4 วงจรเอสซีอาร์และรูปคลื่น

2.5 การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

การหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจากการตอบสนองทางเวลาต่อสัญญาณขั้นบันไดสามารถทำได้มี ขั้นตอนดังนี้

1) เก็บข้อมูลการตอบสนองทางเวลา

1.1 ป้อนสัญญาณขั้นบันได (Step Input) เข้าสู่ระบบ

1.2 บันทึกผลตอบสนองของระบบตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสภาวะคงตัว

2) วิเคราะห์ผลตอบสนองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์สำคัญ

2.1 ค่าสภาวะคงตัว (K) คือค่าเกนของระบบเป็นอัตราส่วนของสัญญาณเอาต์พุตต่ออินพุตเมื่อเวลาผ่านไปนานพอ

2.2 เวลาหน่วง (L) คือเวลาที่นับตั้งแต่การปล่อยสัญญาณอินพุตเข้าระบบจนกระทั่งเอาต์พุตของระบบเริ่มตอบสนอง

2.3 เวลาคงตัว (T) คือ เวลาที่สัญญาณเอาต์พุตถึง 63.2% ของค่าสภาวะคงตัวหลังจากเวลาเชิงเส้น

3) ประมาณฟังก์ชั้นถ่ายโอนของระบบ

สำหรับระบบอันดับหนึ่งที่มีการหน่วงเวลา ฟังก์ชันถ่ายโอนสามารถประมาณได้เป็น

$$G_{P(S)} \quad \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (5)$$

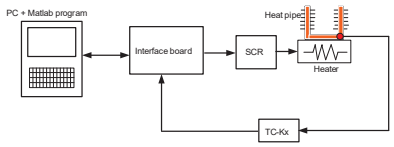
3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการศึกษา

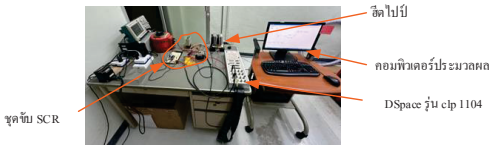
ในการศึกษาครั้งนี้จะแบ่งเป็นหัวข้อการศึกษา คือ

1) การหาข้อมูลการควบคุมของระบบที่เกี่ยวข้อง 2) ทำ Step test เพื่อหาค่าตัวแปร และหา Plant Model ของระบบ 3) หาค่า พารามิเตอร์เกนของตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธี pole placement เมื่อกำหนดให้มุมเบต้า 45 °C, ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent overshoot) 5% และ Setting Time 100 วินาที เปรียบเทียบกับวิธีของ Ziegler Nicole 4) ทดสอบจริงด้วยโปรแกรม Matlab ร่วมกับบอร์ด อินเตอร์เฟส DSpace รุ่น clp 1104 เพื่อดูค่าผลตอบสนองต่อระบบ

3.2 การเตรียมชุดทดลองในการควบคุมอุณหภูมิที่ผิวท่อฮีทไปป์ สำหรับแบบร่างของชุดทดลองและชุดทดลองจริงจะแสดงในรูปที่ 5



ก.) แบบร่าง

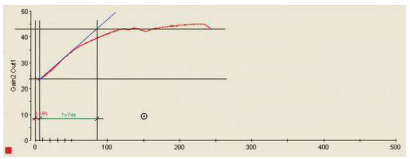


ข.) ติดตั้งจริง

รูปที่ 5 การเตรียมระบบควบคุมอุณหภูมิผิวท่อฮีตไปป์ตัวยู

จากการทำ Step test โดยการป้อนสัญญาณผ่านชุดขับ Solid state Relay (SSR) เพื่อให้ลวดความร้อน และทำให้ผิวท่อส่วนร้อน (Evaporator) ของฮีตไปป์ทำงานและถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนเย็น (Condenser) ได้ จากนั้นบันทึกผลอุณหภูมิผิวท่อฮีตไปป์ได้ดังรูปที่ 6 และบันทึกค่าต่างๆ เพื่อคำนวณหา Transfer Function ของ Plant model ตามสมการ (6) และสามารถนำ Transfer Function นี้ไปใช้ในการจำลองระบบและหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ต่อไป

$$G_{P(S)} = \frac{0.215e^{-6s}}{74s+1} \quad (6)$$



รูปที่ 6 การทำ Step test จาก 0 ไป 5 V เพื่อป้อนให้ SCR ทำงานเต็มที่เพื่อให้อุณหภูมิผิวท่อฮีตไปป์ร้อนขึ้น ณ แรงดันไฟฟ้าสลับ 170V

3.3 การหาค่า PI ด้วยวิธีของ Pole Placement และ Ziegler–Nichols การหาค่าพารามิเตอร์ของ PI ด้วยวิธีของ pole placement และPI ด้วยวิธีของ Ziegler–Nichols จะสรุปได้ตามตารางที่ 1

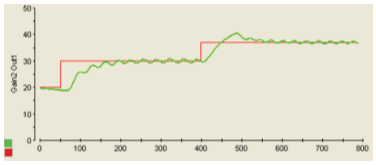
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เกณฑ์ของ PI Controller

วิธีการปรับ	K_p	K_i
Pole Placement	13.90	0.323
Ziegler–Nichols	328.37	27.36

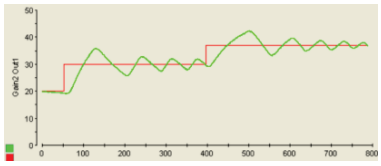
4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบชุดควบคุมที่ออกแบบกับระบบจริง

เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ด้วยวิธีของ Pole Placement และ Ziegler–Nichols ใช้กับชุดต่อร่วมเป็นบอร์ดอินเตอร์เฟส DSpace รุ่น clp 1104 ที่อุณหภูมิเป้าหมายต่างๆ จะได้ผลการตอบสนองดังรูปที่ 7



ก.)



ข.)

รูปที่ 7 ผลการควบคุมอุณหภูมิเป้าหมาย 30 °C และ 37 °C จริง ด้วยวิธีของ ก.) Pole Placement ข.) Ziegler–Nichols

4.2 ผลตอบสนองระบบควบคุมจริง

จากรูปที่ 7 สามารถสรุปผลตอบสนองระบบควบคุมจริงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปผลตอบสนองระบบควบคุมจริง ที่ Tsp-37°C

Method	Overshoot (%)	Rise time (sec)	Steady state error (%)
Pole Placement	10.8	50	0.5
Ziegler–Nichols	14.8	50	1

หมายเหตุจากรูปที่ 7 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูงและต่ำรอบค่าเป้าหมาย เกิดจากกลไกการรับและคายความร้อนของฮีทไปป์ต้องใช้เวลาดังนั้นทำให้เกิดการหน่วงสะสมเป็นช่วงๆ เกิดขึ้น

5. สรุป และข้อเสนอแนะ

การควบคุมอุณหภูมิที่ผิวท่อฮีทไปป์สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ผลการตอบสนองของระบบที่ออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธีการของ Pole Placement ที่อุณหภูมิเป้าหมาย 37°C จะใช้เวลาขาขึ้น (Rise time) เท่ากับ 50 วินาที ค่าเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Percent Overshoot) เท่ากับ 10.8% และค่าผิดพลาดที่สภาวะคงที่เท่ากับ ±0.5 °C

2.การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการอุณหภูมิด้วยขั้นตอนวิธีของ Pole Placement สามารถทำให้เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน และค่าผิดพลาดที่เวลาคงตัวน้อยกว่าวิธีของ Ziegler–Nichols เท่ากับ 27.03% และ 50% ตามลำดับและสามารถติดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามความต้องการ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานด้านอื่นอีกมากมาย

ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้

1. ควรมีการศึกษาต่อเนื่องในระยะยาวเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความคงตัวของสารที่ใช้ในการทดลองในสภาพแวดล้อมจริง

2. ควรขยายขอบเขตการทดลองไปยังพื้นที่หรือกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความครอบคลุมของผลการวิจัย

3. ควรนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์หรือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มมูลค่าและประโยชน์ต่อชุมชน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่อำนวยความสะดวกในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Faghri, “Heat pipes: Review, opportunities and challenges,” *Frontiers in Heat Pipes*, vol. 5, no. 1, pp. 1–48, 2014.

[2] D. A. Reay and P. A. Kew, *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*, 6th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2016.

[3] S. W. Chi, *Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook*. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.

[4] Anonymous, “Working principle of a heat pipe,” *[Image]*, [Online]. Available:https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-a-heat-pipe_fig2_353925138. [Accessed: Oct. 26, 2024].

[5] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 8th ed. Boston, MA: Pearson, 2018.



ประวัติผู้เขียนบทความ สาเหะอันวา ดะแซ ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน สนใจงานวิจัยทางด้านตัวควบคุมแบบพีไอดีและกระบวนการทางพันธุกรรม

หุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับการเพาะปลูกข้าว

Spraying Robot for Rice Cultivation

วิรัช กองสิน[1*] ชัยนรินทร์ ขุมทอง[1],นาวินต้า ฟักแก้ว[1] และ นิติธร ทองเรือง[1]
1*สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
E-mail: wiruch.k@rmutsb.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเครื่องต้นแบบหุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับการเพาะปลูกข้าวมีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับการเพาะปลูกข้าวเพื่อกำจัดวัชพืชและศัตรูพืชในการเจริญเติบโตในช่วงแต่ละอายุของข้าวในส่วนเก็บค่าไฟฟ้าในที่หุ่นยนต์ใช้ และในส่วนการเก็บน้ำยาที่ต่อการฉีดพ่นดูปริมาณน้ำยาในสรุปได้ว่าการใช้น้ำยาแบบชิกแซกจะประหยัดน้ำยากว่าแบบก้นหอยน้ ายาที่ใช้ไปของ ชิกแซก 25 ลิตร และก้นหอยใช้ไป 35 ลิตร แบบแรก แบบชิกแซกใช้พลังงานต่อ 1 ชั่วโมง กระแส 32.36 A แรงดัน 12.08 V วัตต์ที่ใช้ 390.874 W กิโลวัตต์ 0.3906 kW คิดเป็นค่าไฟที่ใช้ 0.118 บาท เวลาในการเคลื่อนที่ 58 นาที แบบที่สองแบบก้นหอย ใช้พลังงานต่อ 1 ชั่วโมง กระแส 32.38 A แรงดัน 12.24 V วัตต์ที่ใช้ 397.66 W กิโลวัตต์ 0.397 kW คิดเป็นค่าไฟที่ใช้ 0.1208 บาท เวลาในการเคลื่อนที่ 60 นาที

คำสำคัญ: ชิกแซก, หุ่นยนต์ฉีดยา, ปลูกข้าว

Abstract

This research studies a prototype spraying robot for rice cultivation. The objectives are to design and build a spraying robot for rice cultivation to eliminate weeds and pests during each growth stage of rice. The study also examines the electrical energy consumption of the robot and the volume of sprayed solution. The results indicate that the zigzag spraying pattern is more economical in solution usage compared to the spiral pattern. The zigzag pattern consumed 25 liters of solution, while the spiral pattern consumed 35 liters. For the zigzag pattern, the energy consumption per hour was 32.36 A current, 12.08 V voltage, 390.874 W power, 0.3906 kW, resulting in an electricity cost of 0.118 baht, with a movement time of 58 minutes. For the spiral pattern, the energy consumption per hour was 32.38 A current, 12.24 V voltage, 397.66 W power, 0.397 kW, resulting in an electricity cost of 0.1208 baht, with a movement time of 60 minutes.

Keywords: injection robot, rice cultivation, weeds

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชที่สำคัญของประชากรในภูมิภาคเอเชียมีถิ่นกำเนิดทางตอนใต้ของ เทือกเขาฮิมาลายานในบริเวณของประเทศอินเดีย พม่า และไทย ข้าวสามารถปลูกได้ ทั้งเขตร้อนและเขตอบอุ่น ที่ระดับน้ำทะเลสูง 2,500 เมตร ต่อมาได้วิวัฒนาการเป็นข้าวปลูกพันธุ์ต่างๆจำนวนมาก ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการปรับตัวให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมโดยธรรมชาติ หรือการคัดเลือกของ ชาวนาโดยภูมิปัญญาท้องถิ่นที่มีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันภาคเกษตรกรรมเป็นภาคการผลิตที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยนับจากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีการจ้างงานแรงงานไทยวัยทำงานเป็นส่วนใหญ่แม้จะพบว่าภาคเกษตรกรรมมีจำนวนแรงงานลดลงในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมาแต่ในปัจจุบันยังคงมีแรงงานประมาณ 12.7 ล้านคน หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 30% ของก าลังแรงงานทั้งหมดในประเทศไทยอยู่ในภาคเกษตรทั้งนี้ภาคเกษตรยังคงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย โดยภาคเกษตรกรรม การป่าไม้และการประมงคิดเป็นร้อยละ 8 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศในขณะที่เศรษฐกิจของไทยเติบโตและคนมีระดับการศึกษาสูงขึ้น แรงงานไทยเริ่มหันไปสู่อาชีพที่มีทักษะสูงขึ้น ทำให้เกิดการขาดแคลนแรงงานในภาคเกษตรกรรม ส่งผลให้ต้องมีการจ้างแรงงานข้ามชาติแทนที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆในปี 2562ร้อยละ 11.4 ของแรงงานข้ามชาติที่ขึ้นทะเบียน (317,996คน) เป็นแรงงานในภาคเกษตร โดยยังไม่นับรวมแรงงานข้ามชาติที่ไม่มีเอกสารที่ไม่ทราบจำนวนในภาคการผลิตนี้ ค่าจ้างที่ต่ำ แรงงานในภาคเกษตรกรรมจะขาดแคลนรุนแรงมากขึ้น[1]

จากบทวิจัยข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัย หุ่นยนต์พ่นยาสำหรับการเพาะปลูกข้าวที่เป็นประโยชน์ต่อการทำนาข้าวของเกษตรกรด้วยการควบคุมหุ่นยนต์พ่นยาสำหรับเพาะปลูกข้าวผ่านการบังคับด้วย

รีโมทโดยหุ่นยนต์มีลักษณะขนาดเล็ก มีตีนตะขาบขนาดเล็กเพื่อให้เคลื่อนที่ผ่านโคลนที่สะดวกและทำความเสียหายกับต้นข้าวน้อยที่สุด และมีหัวฉีดอยู่สองข้างเพื่อใช้ฉีดพ่นได้ครอบคุมพื้นที่ในการฉีด เกษตรกรสามารถบังคับควบคุมเส้นทางได้สะดวกและสามารถมองเห็นทิศทางการทำงานของหุ่นยนต์ได้เพื่อแก้ปัญหา ของการใช้คนฉีดพ่นสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและป้องกันสารเคมีเข้าสู่ร่างกาย

2. ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

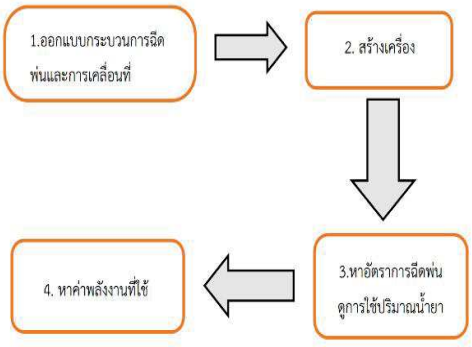
2.1 แมลงศัตรูพืชของข้าว[2]

พฤติกรรมการทำลายของเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลพฤติกรรมการทำลายข้าวของแมลงเกิดขึ้น ได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การดูดกินน้ำเลี้ยงจากพืชอาหารซึ่งเป็นพฤติกรรมการทำลายทางตรง โดยทำให้ต้นข้าวมีลักษณะใบเหลืองและแห้งตายทั้งต้นที่เรียกว่าอาการไหม้ (hopper burn) ความรุนแรงของอาการต้นข้าวใบเหลืองและแห้งตายนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนประชากรของเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลและ ความต่อเนื่องของการดูดกินของแมลง และการถ่ายทอดไวรัสโรคข้าวซึ่งเป็นพฤติกรรมการท าลายทางอ้อม ซึ่งพฤติกรรมทั้งสองลักษณะนี้จะก่อให้เกิดความเสียหายในระดับ 10-100 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะการถ่ายทอดไวรัสจะมีความไม่แน่นอน และจากการศึกษาพบว่าแมลงมี เปอร์เซ็นต์การถ่ายทอดไวรัสได้ในระดับที่แตกต่างกัน ซึ่งลักษณะพฤติกรรมการท าลายข้าว ดังกล่าวมีปัจจัยสำคัญเพื่อความอยู่รอดและการแสดงออกทางพฤติกรรมของแมลง ได้แก่ ความอุดมสมบูรณ์ของพืชอาหารและพืชอาศัย ปริมาณ ความหนาแน่นของประชากร

การกำจัดศัตรูพืชสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของศัตรูพืช (เช่น แมลง เชื้อรา วัชพืช) และลักษณะของพืชที่ปลูก โดยทั่วไปมี 5 วิธีหลัก ๆ ดังนี้:

1. วิธีทางกายภาพ เช่นใช้มือจับหรือเก็บศัตรูพืชออก, ใช้กับดัก เช่น กับดักแมลงวันผลไม้, ใช้น้ำแรงดันฉีดพ่นไล่แมลง, ใช้แสงไฟล่อแมลงกลางคืน, ปิดแปลงด้วยตาข่ายหรือพลาสติกป้องกัน
2. วิธีทางชีวภาพ เช่น ใช้ศัตรูธรรมชาติ เช่น แมลงห้ำ (เช่น ตัวห้ำเต่าทอง) หรือ ตัวเบียน (เช่น แตนเบียน), ใช้เชื้อจุลินทรีย์ เช่น เชื้อบีที (Bacillus thuringiensis) หรือเชื้อราไตรโคเดอร์มา ควบคุมแมลงหรือเชื้อรา
3. วิธีทางเคมี ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช เช่น ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าเชื้อรา ยากำจัดวัชพืช
4. วิธีทางวัฒนธรรม เช่น ปลูกพืชหมุนเวียนเพื่อหลีกเลี่ยงการสะสมของศัตรูพืช, ปลูกพืชร่วมที่ช่วยไล่แมลง, กำจัดเศษพืชที่เป็นแหล่งอาศัยของศัตรูพืช, ใช้พันธุ์พืชต้านทานโรคและแมลง
5. วิธีผสมผสาน (IPM: Integrated Pest Management) เป็นการใช้หลายวิธีร่วมกันเพื่อควบคุมศัตรูพืชอย่างยั่งยืน ลดการใช้สารเคมีให้น้อยที่สุด

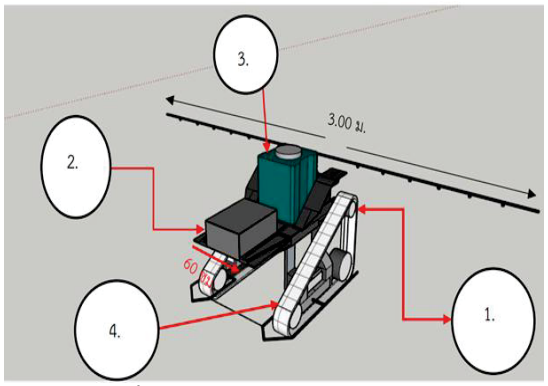
2.2 กระบวนการสร้างของหุ่นยนต์พ่นยา



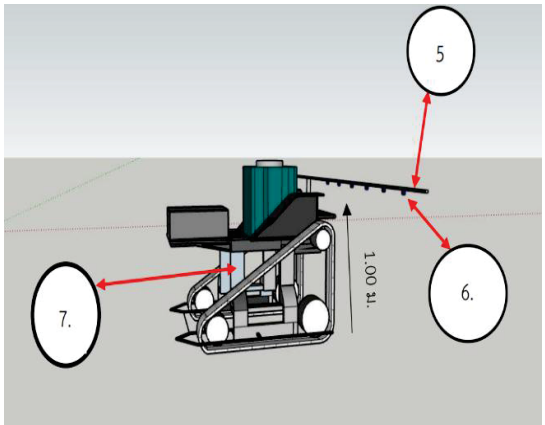
รูปที่ 1 ไดอะแกรมกระบวนการสร้างของหุ่นยนต์พ่นยา

กระบวนการในรูปที่ 1 เป็นขั้นตอนการออกแบบ สร้างและทำการทดลองหุ่นยนต์พ่นยาเพื่อนำผลที่ได้มาดำเนินการในงานวิจัยนี้

2.3 การออกแบบหุ่นยนต์พ่นยาในนาข้าว



รูปที่ 2 โครงสร้างของหุ่นยนต์พ่นยา (ด้านหน้า)

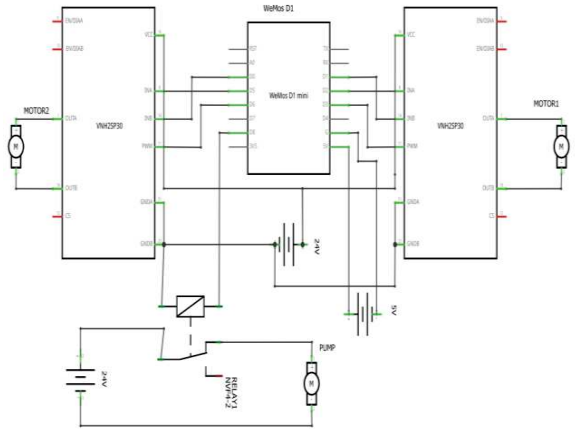


รูปที่ที่ 3 โครงสร้างของหุ่นยนต์พ่นยา (ด้านข้าง)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักของหุ่นยนต์พ่นยา

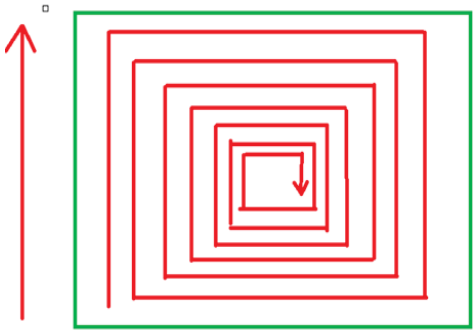
องค์ประกอบ
1. มอเตอร์ไฟฟ้า ใช้สำหรับขับตีนตะขาบ
2. กล่องแผงวงจรและแบตเตอรี่ ใช้สำหรับควบคุมการทำงาน
3. ถังน้ำ ใช่สำหรับใส่สารเคมี
4. ล้อตีนตะขาบ ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์
5. แขนฉีดยา ใช้สำหรับติดตั้งหัวฉีดยา
6. หัวฉีดยา ใช้สำหรับฉีดพ่นสารเคมี
7. โครงสร้าง

2.4 ระบบควบคุม

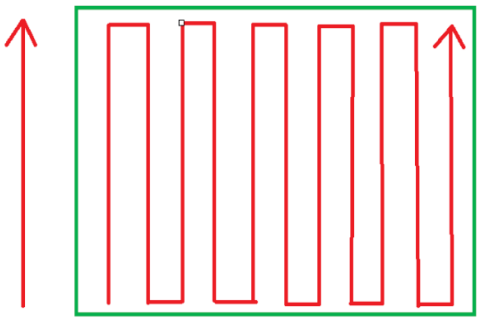


รูปที่ 4 ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์พ่น

2.5 ผังรูปแบบการฉีดยาของหุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับการเพราะปลูกข้าว



รูปที่ 5 รูปแบบการฉีดยาแบบก้นหอย

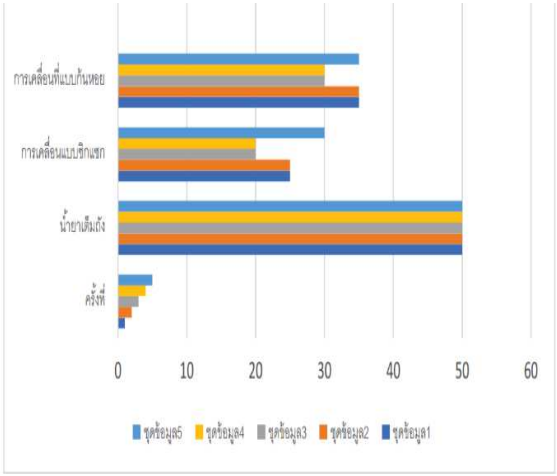


รูปที่ 6 รูปแบบการฉีดยาแบบซิกแซก

จากรูปที่ 5 และ 6 เป็นการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์พ่นสารเคมีโดยกำหนดเป็น 2 รูปแบบคือแบบซิกแซกและ แบบก้นหอย เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าแบบไหนถึงจะเหมาะสมในการทำงานของหุ่นยนต์พ่นสารเคมี

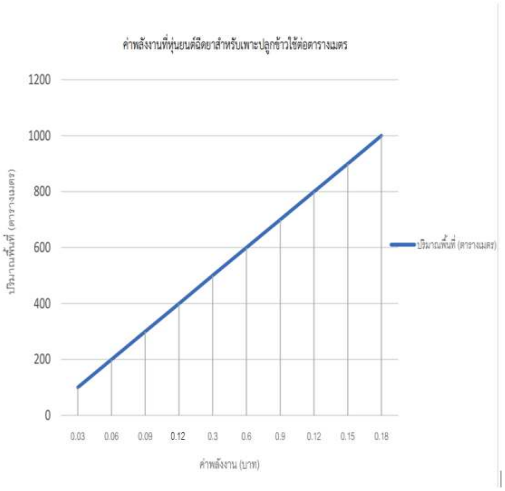
3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 วิเคราะห์หาประสิทธิภาพรูปแบบการเคลื่อนที่ดีที่สุดจากวิธีการซิกแซ็ก ก้นหอย และแบบสุ่ม



รูปที่ 7 แผนภูมิแสดงการใช้ปริมาณน้ำยา

จากรูปที่ 7 การใช้ปริมาณน้ำยาของการเคลื่อนที่แต่ละแบบจากน้ำยาเต็มถัง 50 ลิตร และทดลองทั้งหมด จำนวน 5 ครั้ง คือการเคลื่อนที่แบบซิกแซก เฉลี่ยการใช้น้ำยาไป 20-25 ลิตร ใช้น้ำมากที่สุดคือการเคลื่อนแบบก้นหอย ใช้น้ำยาไปโดยเฉลี่ย 30-35 ลิตร โดยประมาณ



รูปที่ 8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าพลังงานต่อระยะทาง (ตารางเมตร)

จากรูปที่ 8 เครื่องต้นแบบหุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับเพาะปลูกข้าว ถังน้ำบรรจุที่ 50 ลิตร หัวฉีดพ่นแบบละอองหมอกมีอัตราการฉีดพ่นอยู่ที่ 0.12 ลิตร/วินาที มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 ซม. รัศมี 10 ซม. พื้นที่เส้นรอบวงกลม 71.74 ตารางเมตร ต่อหัวฉีด 1 หัว หัวฉีดที่หุ่นยนต์ใช้มีทั้งหมด 6 หัว ดังนั้นความระยะความกว้างการฉีดพ่นจะอยู่ที่ 430.44 ตารางเมตร ใน 1 รอบจะใช้เวลา 3.67นาที ได้ระยะทาง 130 เมตร รวม 6 หัวได้ 1581.17 ตารางเมตรใช้ระยะเวลา 3.76 นาที กระแสไฟ 1.50 A ฉลี่ยแต่ละการเคลื่อนที่ของทั้ง 2 การเคลื่อนที่ แรงดัน อยู่ที่ 12 V วัตต์ อยู่ที่ 390 W กิโลวัตต์ 0.0151 KWh หุ่นยนต์ฉีดยาสำหรับเพาะปลูกข้าวมีอัตราการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบการเคลื่อนที่ แบบ ซิกแซก เคลื่อนที่ อยู่ 0.118 m/s แบบก้นหอยเคลื่อนที่ อยู่ 0.1208 m/s ดังนั้นค่าพลังงานที่หุ่นยนต์ต้นแบบฉีดยาสำหรับเพาะปลูกข้าว ใช้ได้เท่ากับ 1 ตารางเมตร ใช้พลังงาน 0.0000317 บาท/ตารางเมตร 1 ไร่มีเนื้อที่ เท่ากับ 1600 ตารางเมตรใช้พลังงานเท่ากับ 0.05072 บาท

3. สรุป

หุ่นยนต์ต้นแบบฉีดยาสำหรับเพาะปลูกข้าวมีถังน้ำบรรจุ 50 ลิตรและหัวฉีด 6 หัว โดยแต่ละหัวฉีดมีอัตราการฉีดพ่นละอองหมอกที่ 0.12 ลิตร/วินาที ซึ่งสามารถครอบคลุมพื้นที่ 71.74 ตารางเมตรต่อหัวฉีด หรือรวมทั้งหมด 430.44 ตารางเมตรในการฉีดพ่น 1 รอบ ใช้เวลา 3.67 นาทีในการเคลื่อนที่ระยะทาง 130 เมตร และใช้เวลา 3.76 นาทีในการเคลื่อนที่ครบทั้ง 6 หัวฉีด พลังงานที่ใช้ในการทำงานมีค่า 390 W หรือ 0.0151 KWh โดยมีค่าใช้พลังงาน 0.0000317 บาทต่อ 1 ตารางเมตร ซึ่งเท่ากับ 0.05072 บาทต่อไร่ (1 ไร่ = 1600 ตารางเมตร) จากการทดลอง 5 ครั้งพบว่าในการเคลื่อนที่แบบซิกแซก หุ่นยนต์ใช้ปริมาณน้ำยาเฉลี่ย 20-25 ลิตรต่อการเคลื่อนที่ 1 ครั้ง ส่วนในการเคลื่อนที่แบบก้นหอยใช้น้ำยาเฉลี่ย 30-35 ลิตรต่อการเคลื่อนที่ 1 ครั้ง โดยในการเคลื่อนที่แบบก้นหอยจะใช้น้ำยาได้มากที่สุด

4. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร.(2565). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้มปี 2565. สืบค้นเมื่อ11 มกราคม 2566.

[2] สุวัฒน์. (2533).วัฏจักรชีวิตของเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล. สืบค้นเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2566. จาก https://li01.tcithaijo.org(15) Energy for Dammis. (2024).

[3] วีรยุทธ พรหมจันทร์ และ เกรียงไกร แซมม่วง. (2563). ออกแบบและสร้างแขนกลพ่นน้ำยาควบคุมระยะไกลแบบติดตั้งกับโดรนสำหรับฉีดพ่นยอดมะพร้าวที่เกิดด้วงเจาะทำลาย. การประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34 วันที่ 15-17ธันวาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์.189-197.

[4] อนุชา หรบรรพ์, สรศักดิ์ นวลส าลี,อนุวัฒน์ ดีด้วยชาติ และธีระศักดิ์ จะเชนรัมย์.2560.รถพ่นยาบังคับวิทยุขับเคลื่อนสี่ล้อและการฉีดพ่น. สืบค้นเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2566.

[5] ศุภชัย กุลมุติวัฒน์. (2563). การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูง. สืบค้นเมื่อ 11มกราคม 2566. จาก https://li01.tcithaijo.org/index.php/TSAEJ/article/download/213781/168482/849065

[6] พิสิฐพงศ์ แป้นทอง. (2560). การควบคุมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แม่นยำสูง. สืบค้นเมื่อ 13 กุมภาพันธ์ 2566. จาก http://libdoc.dpu.ac.th › thesis ›Pisitpong.Pan



ประวัติผู้เขียนบทความ

ชื่อ – สกุล:	นายวิรัช กองสิน
ประวัติการศึกษา:	วุฒิการศึกษา
2546	วศ.บ. วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
2552	วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ประวัติการทำงาน	
2553 – 2555	ตำแหน่ง อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขต ตาก
2555 – ปัจจุบัน	ตำแหน่ง อาจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ความเชี่ยวชาญ	วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง (Electrical Power engineering)
	การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมในอุตสาหกรรม (Control System Application for industrial)
	การออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติและหุ่นยนต์
	การออกแบบและประยุกต์ใช้พลังงานและอาคาร

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสสำหรับโหลดแบบพาสซีฟ

Harmonics Analysis of Single-Phase Matrix Converter for the Passive Loads

สันติสุข สว่างกล้า[1] สถาพร เสือเทศ[2] สามารถ ใจซื่อ[3] และ ประสพโชค โห้ทองคำ[4*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

[2]สาขาวิชาวิศวกรรมมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[3]ภาควิชาวิศวกรรมการพิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

[4*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

E-mail: *prasopchok.hot@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหลักการคำนวณและวิเคราะห์ค่าฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟที่มีการปรับค่าความถี่เอาท์พุทและอัตราการมอด ในการวิเคราะห์จะใช้หลักการของอนุกรมฟูเรียร์มาคำนวณแล้วทำการพล็อตกราฟ เพื่อพิจารณาผลของค่าฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ของรูปคลื่นเอาท์พุทของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสนี้ รวมทั้งทำการคำนวณหาค่าการลดทอนฮาร์มอนิก (THD) ของรูปคลื่นด้วยการใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ช่วยในการคำนวณและพล็อตกราฟฮาร์มอนิก ผลการทดสอบเป็นไปในทางที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปได้

คำสำคัญ: วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส, เอซี-เอซี คอนเวอร์เตอร์, การวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิก

Abstract

This paper presents a calculation method and harmonics analysis of the voltage and current waveforms for the single-phase matrix converter. This converter was tested with the passive loads which it can be adjusted the frequencies and modulation indexes. The Fourier Series method is applied to the analysis and spectrums plot for the several harmonics order of the output waveforms. In addition, the total harmonics distortion (THD) of the waveforms can be analysed and spectrum plotted by the MATLAB/Simulink program. These results are good agreement and satisfaction.

Keywords:single-phase matrix converter, AC-AC converter, harmonics analysis

1. บทนำ

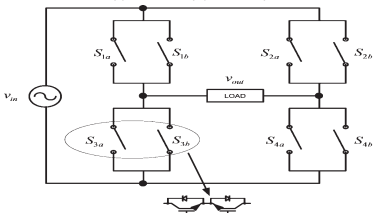
วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่มีค่าขนาดและความถี่คงที่ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทสามารถปรับค่าขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าได้ด้วยการใช้สวิตช์สองทางจำนวน 4 ชุด ในการตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟส ซึ่งสวิตช์นี้สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลได้สองทิศทางผ่านสวิตช์สองทางนี้ โดยมีการนำเสนออยู่อย่างแพร่หลายในงานวิจัย คือ มีการออกแบบ สร้างและทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟเพื่อทำการวัดรูปคลื่นทางด้านเอาท์พุทที่มีการปรับความถี่เอาท์พุทและอัตราการมอดเพื่อทดสอบกับโหลด รวมทั้งวัดประสิทธิภาพของวงจรด้วย ซึ่งมีลักษณะที่สามารถใช้งานได้จริง [1], [2] การประยุกต์ใช้วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในลักษณะของวงจรรูปแบบ เช่น Chopper, rectifier, inverter ได้มีการใช้งานด้วยการจำลองการทำงานของระบบดังกล่าวนี้มีผลการจำลองที่เป็นไปในทางที่ดีสามารถมาประยุกต์ใช้งานได้ [3] ระบบ Uninterruptible Power Supply (UPS) ได้มีการนำวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมาใช้ในการควบคุมการทำงานแทนที่วงจรอินเวอร์เตอร์ที่มีการแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองขั้นตอนลดให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดีด้วยการจำลองการทำงานได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ [4] อีกทั้งมีการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบการอัดประจุแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าด้วยวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสในระบบ Inductive wireless power transfer (IWPT) ก็สามารถใช้งานได้ในการอัดประจุแบตเตอรี่แบบไร้สาย ซึ่งให้ผลค่าตัวประกอบกำลังที่สูงขึ้นเป็นผลดีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง [5] จากงานวิจัยที่ได้กล่าวในเบื้องต้นเป็นการประยุกต์และใช้งานวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสอย่างแพร่หลายแต่ในงานวิจัยนี้จะเป็นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของรูปคลื่นเอาท์พุททั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เชื่อมต่อโหลดแบบฟาสซีฟด้วยหลักการของอนุกรมฟูเรียร์เพื่อพิจาณาดูค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นรวมทั้งค่า Total Harmonics Distortion (THD) ของรูปคลื่นเอาท์พุทที่ได้คำนวณออกมาเพื่อแสดงถึงกหารปรับความถี่และอัตราการมอดของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการขับนสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ด้วยว่ามีผลอย่างไรต่อค่าฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทที่เปลี่ยนแปลงไป

2. วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส [1], [2]

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสมีลักษณะวงจรดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยสวิตช์สองทางจำนวน 4 ชุด ต่อกันในลักษณะบริดจ์ เพื่อทำการตัดต่อไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าคงที่และความถี่

คงที่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ด้านเอาท์พุทสามารถปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ได้ โดยค่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุทมีค่าเท่ากับ

$$v_{in}(t) = V_{im} \sin \omega_i t \quad (1)$$



รูปที่ 1 วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส

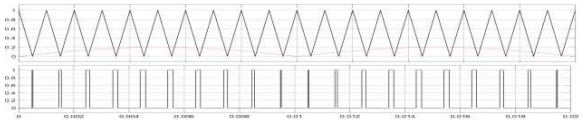
และมีค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทเท่ากับ

$$v_{out}(t) = V_{om} \sin \omega_o t \quad (2)$$

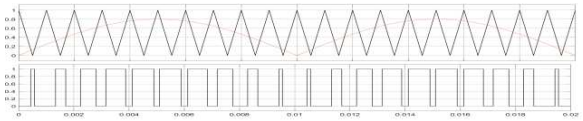
สวิตช์จะทำหน้าที่ตัดต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าอินพุทเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทที่สามารถปรับความถี่และอัตราการมอดดูเลตได้ โดยมีการทำงานดังสมการที่ 3 ดังนี้

$$v_{out}(t) = \begin{cases} v_{in}(t) & S_1 \& S_4 \text{ are ON} \\ -v_{in}(t) & S_2 \& S_3 \text{ are ON} \\ 0 & S_1 \& S_2 \text{ are ON} \\ 0 & S_3 \& S_4 \text{ are ON} \end{cases} \quad (3)$$

สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสวิตช์สองทางที่ได้ทำการสร้างขึ้น เพื่อทำให้ได้ค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz และอัตราการมอดต่างๆ สามารถสร้างได้จากสัญญาณไซน์และสัญญาณสามเหลี่ยมนำมาทำการเปรียบเทียบกันเพื่อได้ได้ค่าสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ค่าความถี่ต่างๆและค่าอัตราการมอดต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2



(ก) อัตราการมอดที่ 0.2



(ข) อัตราการมอดที่ 0.8

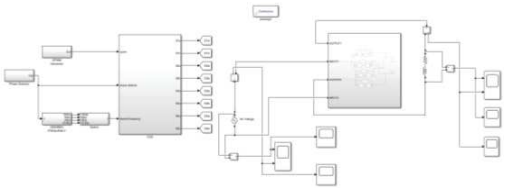
รูปที่ 2 สัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการขับนำสวิตช์สองทางในวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์ที่อัตราการมอดต่างๆ

ในการปรับความถี่และอัตราการมอดของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มสามารถทำได้ตามสมการที่ 4 และ 5

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{\sin e}} \quad (4)$$

$$m_a = \frac{V_{m,\sin e}}{V_{m,tri}} \quad (5)$$

ในการจำลองการทำงานของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟส สามารถสร้างระบบในการจำลองได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์หนึ่งเฟสที่ใช้ในการจำลองการทำงานที่ต่อกับโหลดแบบพาสซีฟ

3. การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเอาท์พุท

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าสามารถเขียนได้เป็นสมการฟูเรียร์ เพื่อวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกได้ตามสมการที่ 6-10 แล้วทำการคำนวณหาค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ค่า n ใดๆ เพื่อนำมาพล็อตในรูปกราฟสเปกตรัมเพื่อพิจารณาค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นของรูปคลื่นเอาท์พุท ส่วนในกรณีของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 11 ซึ่งจะสามารถหาค่าขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ค่า n ใดๆ ได้เช่นเดียวกัน โดยสามารถแสดงผลการคำนวณของรูปคลื่นที่นำมาพิจารณาตามรูปที่ 4 ที่ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงก็สามารถใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณได้เช่นเดียวกันแล้วนำมาแสดงผลด้วยกราฟสเปกตรัมของค่าฮาร์มอนิกที่ค่าลำดับ n ต่างๆ

$$v_{out}(\omega_O t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n\omega_O t \ + \ b_n \sin n\omega_O t] \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(\omega_o t)\cos n\omega_o t d(\omega_o t) \quad (7)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(\omega_o t)\sin n\omega_o t d(\omega_o t) \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(\omega_o t)\sin n\omega_o t d(\omega_o t) = \frac{MV_o(t)}{T}\left[\frac{1}{1-n}\sin(1-n)\omega_o t - \frac{1}{1+n}\sin(1+n)\omega_o t\right]_0^T \quad (9)$$

$$V_n = \frac{MV_o(t)}{T}\left[\frac{1}{1-n}\sin(1-n)\omega_o t - \frac{1}{1+n}\sin(1+n)\omega_o t\right] \quad (10)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega_o L|} \quad (11)$$

โดยที่ ค่า n มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, …. n, $\omega_o = 2\pi f_o$, M = อัตราการมอดมีค่าเท่ากับ 0 – 1.0

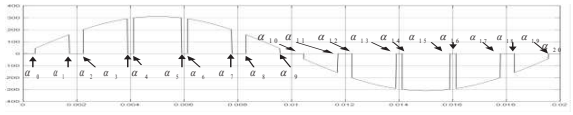
ในการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าจากรูปคลื่นจะทำการแทนค่ามุม α ใดๆ ลงในสมการดังกล่าวข้างต้น แล้วทำการคำนวณในช่วงเวลาหนึ่งคาบของรูปคลื่นดังรูปที่ 4 และที่แต่ละค่าความถี่เอาท์พุท f_o (25Hz หรือ 50Hz) ที่เปลี่ยนแปลงสามารถคำนวณได้โดยการแทนค่า

ของความถี่ f_o ลงในค่าของ $\omega_o = 2\pi f_o$ แล้วทำการคำนวณต่อไป ส่วนของกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกได้ตามสมการที่ 11

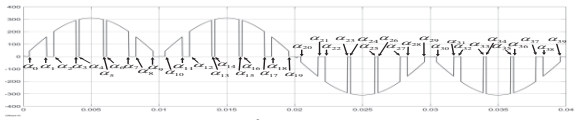
การคำนวณหาค่า Total Harmonics Distortion (THD) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 12 และ 13

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n\neq 1} I_{n,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n\neq 1} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} \quad (12)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(V_{n,rms}\right)^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (13)$$



(ก) ค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 50Hz

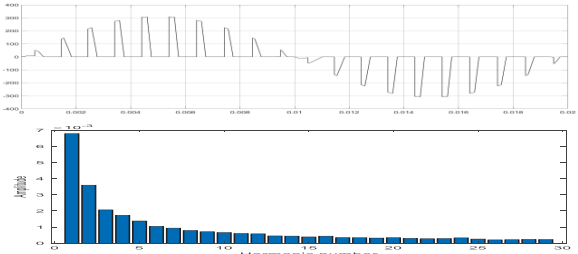


(ข) ค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz

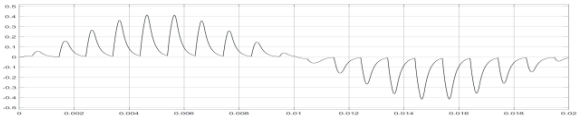
รูปที่ 4 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ค่าความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz, อัตราการมอดเท่ากับ 0.8

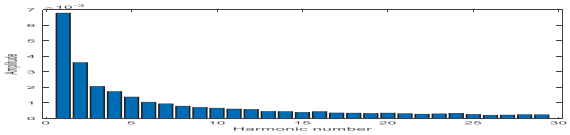
4. ผลการจำลองและทดสอบ

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่นำเสนอได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 220V, 50Hz และได้ทำเชื่อมต่อโหลดที่เป็นพาสซีฟที่ใช้ตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากับ 100 โอห์ม และ 15 มิลลิเฮนรี่ ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์หาค่าฮาร์มอนิกด้วยสมการดังกล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่ 3 แล้วทำการพล็อตสเปกตรัมฮาร์มอนิกทั้งรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่เอาท์พุทเท่ากับ 25Hz และ 50Hz ที่อัตราการมอดเท่ากับ 0.2 และ 0.8 ดังรูปที่ 4-8



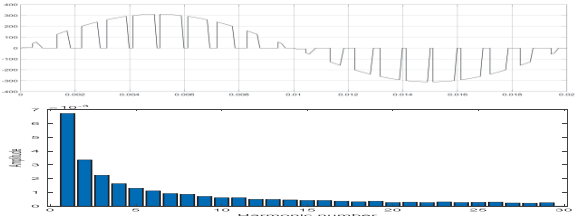
แรงดันไฟฟ้า (THD=78.4%)



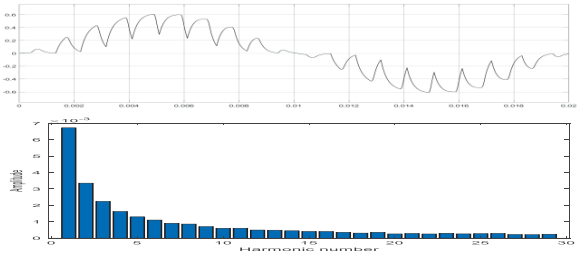


กระแสไฟฟ้า (THD=78.4%)

รูปที่ 5 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ความถี่ 50Hz อัตราการมอดเท่ากับ 0.2 และสเปคตรัมฮาร์มอนิก

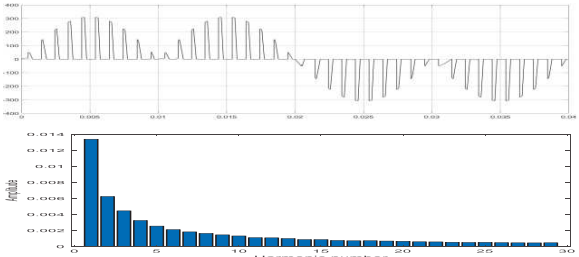


แรงดันไฟฟ้า (THD=76.9%)

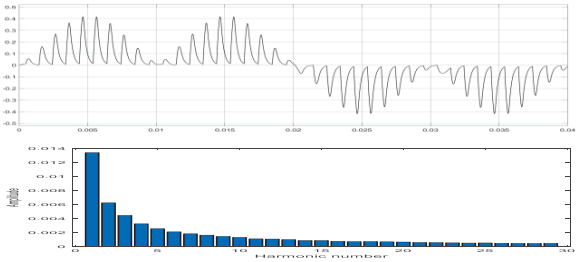


กระแสไฟฟ้า (THD=76.9%)

รูปที่ 6 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ความถี่ 50Hz อัตราการมอดเท่ากับ 0.8 และสเปคตรัมฮาร์มอนิก

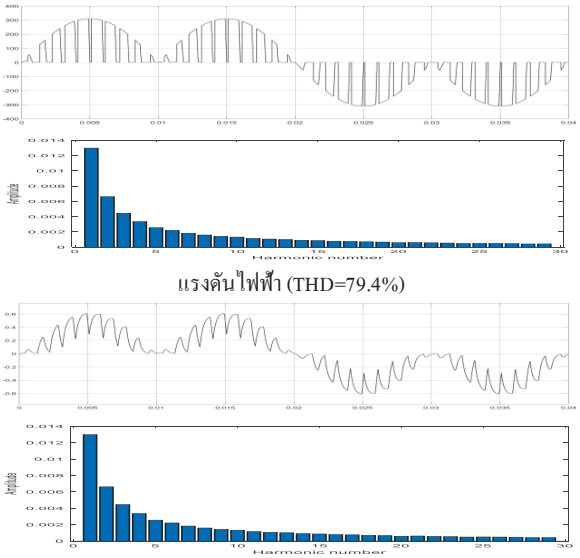


แรงดันไฟฟ้า (THD=74.8%)



กระแสไฟฟ้า (THD=74.8%)

รูปที่ 7 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ความถี่ 25Hz อัตราการมอดเท่ากับ 0.2 และสเปคตรัมฮาร์มอนิก



แรงดันไฟฟ้า (THD=79.4%)

กระแสไฟฟ้า (THD= 79.4%)

รูปที่ 8 รูปคลื่นเอาท์พุทที่ความถี่ 25Hz อัตราการมอดเท่ากับ 0.8 และสเปคตรัมฮาร์มอนิก

จากการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุทของวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ต่อโหลดแบบพาสซีฟที่ได้จากการจำลอง พบว่าค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่อันดับ n ค่าต่างๆ ตามที่ได้แสดงดังรูปข้างต้น รวมทั้งทำการคำนวณหาค่า THD ซึ่งรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากมีความใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ที่น้อยแต่มีลักษระเป็นรูปคลื่นไซน์ที่มีการถูกสับตามสัญญาณพีดับบลิวเอ็มที่ใช้ในการขับนำสวิตช์สองทางในกรณีของแรงดันไฟฟ้า ส่วนกรณีของกระแสไฟฟ้าก็จะมีลักษณะที่คล้ายแรงดันไฟฟ้าแต่จะมีความเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์ไปเพราะมีผลของโหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่ด้วยจึงเกิดลักษณะเช่นนี้ การเปลี่ยนความถี่เอาท์พุทของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้มีผลต่อขนาดของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าดังรูปข้างต้นแต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า THD น้อย ส่วนอัตราการมอดของสัญญาณพีดับบลิวเอ็มจะมีผลต่อค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า คือ เมื่ออัตราการมอดต่ำจะมีค่า THD ที่สูงกว่าที่อัตราการมอดสูงของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางด้านเอาท์พุท

5. สรุปผล

วงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกและค่า THD ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทางเอาท์พุทจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink นั้น จะมีการปรับเปลี่ยนค่าความถี่และอัตราการมอดที่สัญญาณพีดับบลิวเอ็ม พบว่าการปรับความถี่และอัตราการมอดมีผลต่อค่าฮาร์มอนิกและค่า THD ทั้งของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรคอนเวอร์เตอร์นี้ที่เชื่อมต่อโหลดแบบพาสซีฟที่ใช้เป็นตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งมีผลต่อรูปคลื่นเอาท์พุทของวงจรด้วย ผลจากการศึกษาและการจำลองนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อประยุกต์ใช้งานวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสกับงานด้านต่างๆ ต่อไปและเพื่อใช้ในการพัฒนางานวิจัยทางด้านนี้ต่อไปอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว) ร่วมกับโครงการวิจัยพื้นฐานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้มอบทุนวิจัยงบทางด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ปี 2564 (เลขที่สัญญา A11-2564) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยแก่งานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ประสพโชค โห้ทองคำ, กิตติธัช ศิริพรนพคุณ, จุฑาธร จันทร์สีชัง, อาสา วงษ์คำ, และ ครองยศ โพธิ์ชัย (2557). การสร้างและทดสอบวงจรเอซีทูเอซีเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสกับโหลดแบบพาสซีฟ. ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 37 (The 37th Electrical Engineering Conference (EECON-37)) วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2557 ณ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออคิด จ. ขอนแก่น มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[2] ประสพโชค โห้ทองคำ, วรัตถ์ มากกาญจนกุล, ปฏิพัทธ์ นุชแก้วฟ้า, สิริวัตร มั่นบุญสม, และครองยศ โพธิ์ชัย (2559). การสร้างวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสเพื่อทดสอบกับโหลดแบบพาสซีฟ. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 39 (The 39th Electrical Engineering Conference (EECON-39)) วันที่ 2-4 พฤศจิกายน 2559 โรงแรมเดอะรีเจ้นท์ ชะอำบีชรีสอร์ท จังหวัดเพชรบุรี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[3] Jawahar Lal Jaiswal, Arinjoy Biswas, and Vineeta Agarwal, “Implementation of Single phase matrix converter as generalized single phase converter”, 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems

[4] Rahimi Baharom, Muhammad Shawwal Mohamad Rawi, and Nor Farahaida Abd Rahman, “Uninterruptible Power Supply Employing Single-Phase Matrix Converter Topology”, 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECON)

[5] Abhishek Singhal and Narsa Reddy Tummuru, “Bidirectional Power Flow Control of Single Phase Matrix Converter Based Inductive WPT System for E-Vehicle Application”, 2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนากระบวนการแปรรูปกาแฟด้วยระบบอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและเทคโนโลยีพลังงาน

Development of Coffee Processing Using Low Temperature and Low Humidity Systems with IoT and Energy Technologies

สิทธิชัย จีนะวงษ์[1] ปรานต์ เมฆอากาศ[2] ธีรชาติ สถิตธรรมพนา[3] และ สุจิตรา จีนะวงษ์[1*]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
99 หมู่ 10 ต.ทรายขาว อ.พาน จ.เชียงราย 57120 *E-mail: sithichai19@gmail.com

[2]โปรแกรมวิชาวิศวกรรมพลังงานและเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
80 หมู่ 9 ต.บ้านดู่ อ.เมืองเชียงราย จ.เชียงราย 57100

[3]สวนกาแฟลีซูมีดอยช้าง (LISUMI Coffee Farm) และ Q Arabica Grader (Q Grader) by Coffee Quality Institute (CQI)
ต.วาวี อ.แม่สรวย จ.เชียงราย 57180

บทคัดย่อ

การพัฒนากระบวนการแปรรูปกาแฟด้วยระบบอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและเทคโนโลยีพลังงาน เป็นระบบควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ โดยใช้ NETPIE ในการแสดงผลผ่านอินเทอร์เน็ตและบันทึกค่าต่าง ๆ ระบบควบคุมสามารถตั้งค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งได้ที่ 40-60% RH ภายในห้องอบแห้งสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ในการควบคุมอยู่ที่ 0.62% อบแห้งกาแฟด้วยกระบวนการแบบแห้ง ที่อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้อง 26.41 ºC ทำการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ 214.12 kg ประสิทธิภาพในการอบแห้งของระบบอยู่ที่ 39.62% คุณภาพรสชาติกาแฟที่ผ่านการทดสอบโดย Q Grader พบว่าเพิ่มขึ้นจากระดับดีมากไปสู่ระดับยอดเยี่ยม

คำสำคัญ : กาแฟพิเศษ การควบคุมคุณภาพกาแฟ ระบบบอบแห้งอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เทคโนโลยีพลังงาน

Abstract

Development of Coffee Processing Using Low Temperature and Low Humidity Systems with IoT and Energy Technologies is System for Control and Monitoring of Temperature and Relative Humidity by NETPIE. NETPIE is a Monitoring and Recording by IoT Server. The Range of Controlling Relative Humidity Controller System are 40-60%RH. Mean Absolute Error of The Controller System is 0.62%. In This study, the Processing of Coffee is Dry Processes. The Average of Temperature in the Drying Room is 26.41 ºC. Evaporation of Water in the Coffee is 214.12 kg. Energy Efficiency of Drying System is 39.62%. The Flavor Quality Testing by Q-Grader is Increased form Verry Good to Excellent.

Keywords: Specialty Coffee, Quality Coffee Control, Low Temperature Low Relative Humidity Drying, Internet of Thing, Energy Technology

1 บทนำ

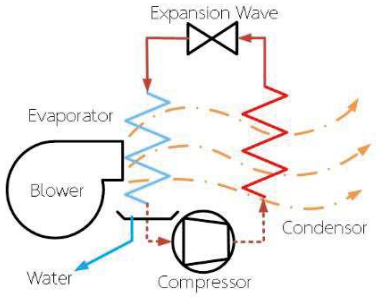
กาแฟพิเศษ (Specialty Coffee) เป็นอีกช่องทางของการสร้างคุณค่าให้แก่ตลาดกาแฟทั่วโลก ซึ่งมีวิธีการพัฒนาที่พิถีพิถันเพื่อสร้างรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ และขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย เช่น สายพันธุ์และแหล่งที่ปลูกกาแฟ ความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในบริเวณที่ปลูก รวมถึงกระบวนการแปรรูปกาแฟ (Coffee Processing) ซึ่งส่งผลต่อรสชาติของกาแฟ [1] ในกระบวนการแปรรูปกาแฟนั้นมีหลายวิธี ได้แก่ กรรมวิธีแบบเปียก (Wet Process) กรรมวิธีแบบแห้ง (Dry Process) และกรรมวิธีแบบกึ่งแห้งหรือฮันนี (Semi-Dry Process, Honey Process) รวมถึงกระบวนการพิเศษ (Special Process) ที่มีขั้นตอนและวิธีการซับซ้อนมากขึ้น ทำให้เป็นที่นิยมของนักดื่มกาแฟและมีมูลค่าสูงขึ้น [2]

ทั้งนี้ในกระบวนการแปรรูปกาแฟจะอยู่ในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวกาแฟ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน [3] เป็นช่วงฤดูหนาวคาบเกี่ยวถึงฤดูร้อน และเป็นช่วงที่อาจมีพายุฤดูร้อนบางครั้ง ทำให้การตากกาแฟให้แห้งใช้ระยะเวลานานขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้คุณภาพของสารกาแฟลดลงหรือเกิดความเสียหาย จึงเป็นที่มาของการวิจัยและพัฒนากระบวนการแปรรูปกาแฟด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (Low Temperature, Low Humidity Drying: LTLH) แบบอัตโนมัติผ่านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและเทคโนโลยีพลังงาน เพื่อควบคุมคุณภาพการแปรรูปกาแฟ แก้ปัญหาผลกระทบจากสภาพอากาศ และศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของการแปรรูปกาแฟพิเศษ

2 วิธีดำเนินการวิจัย

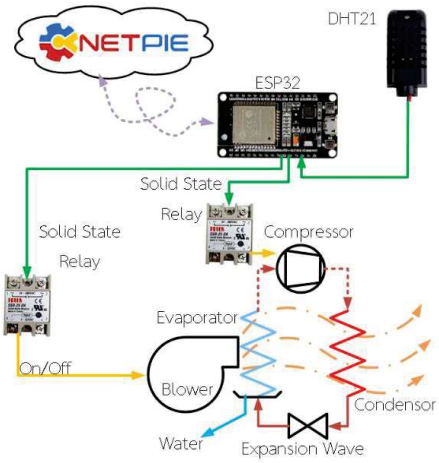
2.1 ออกแบบและสร้างระบบควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้ง

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการอบแห้งด้วยระบบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ คือ การทำให้กาแฟแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่ไม่เกิน 40 ºC และใช้อากาศแห้งพัดผ่านสารกาแฟ ทำให้ความชื้นในกาแฟลดลงถึง 12% โดยไม่ทำให้สารอาหารในกาแฟเสียหาย อีกทั้งยังรักษากลิ่นที่ดีของกาแฟให้คงไว้ [4] ห้องอบแห้งมีขนาดกว้าง 2.5 m ยาว 4.0 m สูง 3.0 m และใช้เครื่องลดความชื้น (Dehumidifier) ที่ทำงานด้วยหลักการของวัฏจักรอัดไอ (Compression Cycle) ซึ่งสามารถลดความชื้นในอากาศ โดยอากาศชื้นภายในห้องถูกส่งผ่านเครื่องระเหย (Evaporator) ที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้ไอน้ำในอากาศควบแน่นกลายเป็นน้ำ ส่งผลให้อากาศที่ผ่านออกมามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของเครื่องลดความชื้นชนิดอัดไอ

2.2 ระบบควบคุมและแสดงผลของห้องอบแห้ง



รูปที่ 2 ระบบควบคุมและแสดงผลผ่าน IoT

ระบบควบคุมและแสดงผลใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผล ทำงานร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ DHT21 และควบคุมการเปิดปิดเครื่องเป่าลมและเครื่องอัดไอด้วยโซลิดสเตตรีเลย์ (Solid State Relay) ระบบสามารถตั้งค่าควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ระหว่าง 40-60%RH

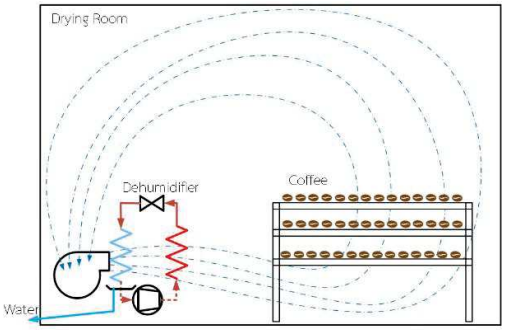
ข้อมูลจากตัวตรวจวัดถูกส่งไปยังระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยใช้ NETPIE [5] ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อบันทึกและแสดงผลผ่านอินเทอร์เน็ต ประสิทธิภาพของระบบควบคุมวัดจากค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) ตามสมการ

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^{n}|RH_t - \widehat{RH_t}|}{n} \quad (1)$$

โดย MAE คือ ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (%)
RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้น ($\%_{RH}$)
$\widehat{RH}$ คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดตั้งค่า ($\%_{RH}$)
t คือ ตำแหน่ง ณ ช่วงเวลาที่ทำการบันทึก
n คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการบันทึก

2.3 ทดสอบประสิทธิภาพการอบแห้ง

การทดสอบใช้กาแฟอาราบิก้าจากดอยช้าง จ.เชียงราย มาแปรรูปแบบแห้ง (Dry Process) โดยใช้เครื่องลดความชื้นควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ทำให้กาแฟคายความชื้นออกมา อากาศที่มีความชื้นสูงขึ้นจะวนกลับไปผ่านเครื่องลดความชื้นอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทดสอบระบบอบแห้งด้วยเครื่องลดความชื้น

จากนั้นทำให้ความชื้นในกาแฟลดลง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอในอุณหภูมิใด ๆ ที่เรียกว่าเอนทัลปีของการกลายเป็นไอ ณ ช่วงอุณหภูมิใด ๆ (Enthalpy of evaporation: h_{fg} ;kJ/kg) จากตารางไอน้ำ [6] จะได้สมการดังนี้

$$Q_{Drying} = (M_{Coffee,0} - M_{Coffee,T})h_{fg} \quad (2)$$

โดย Q_{Drying} คือ พลังงานการอบแห้ง (kJ)
$M_{Coffee,0}$ คือ น้ำหนักกาแฟก่อนอบ (kg)
$M_{Coffee,T}$ คือ น้ำหนักกาแฟสิ้นสุด (kg)
h_{fg} คือ เอนทัลปีของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องลดความชื้นวัดได้โดยตรงเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ซึ่งแปลงเป็น kJ ได้ดังนี้

$$1\ kWh = 3600\ kJ \quad (3)$$

$$P_{kJ} = P_{kWh} \cdot 3600 \quad (4)$$

โดย P_{kJ} คือ พลังงานไฟฟ้า (kJ)

P_{kWh} คือ หน่วยกำลังไฟฟ้าใน 1 ชั่วโมง (kWh)

ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (η) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta = Q_{Drying} / P_{kJ} \quad (5)$$

โดย η คือ ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (kJ/kJ)

2.4 วัดคุณภาพกาแฟ

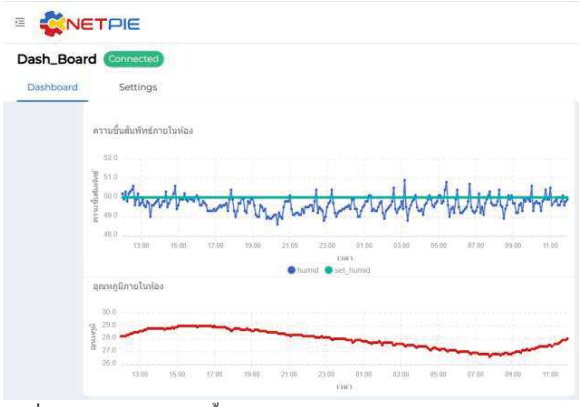
คุณภาพกาแฟทดสอบโดยวิธีการคัปปิ้ง (Cupping) จากนักชิมกาแฟ (Q Grader) ที่ได้รับการรับรองจาก Coffee Quality Institute (CQI) [7] ดังแสดงในรูปที่ 4 การทดสอบทำตามมาตรฐาน Cupping Protocol ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การคั่วกาแฟถึงการชงและชิม โดยคั่วระดับอ่อนถึงกลางอ่อน ใช้อัตราส่วนกาแฟ 8.25 กรัม ต่อน้ำ 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 92.2-94.4 °C



รูปที่ 4 การรับรอง Q Arabica Grader จาก CQI

3 ผลการทดลองและทดสอบ

3.1 ระบบอบแห้ง LTLH



รูปที่ 5 การแสดงผลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

ระบบอบแห้งด้วยเครื่องลดความชื้นสามารถควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์ได้ดี มีค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์อยู่ที่ 0.62% และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในห้องอบแห้งอยู่ที่ 50.13%RH โดยอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องอยู่ที่ 26.41 ºC ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำพอที่จะไม่ทำให้สารอาหารในเมล็ดกาแฟเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 6 เครื่องลดความชื้นภายในห้องอบแห้ง

3.2 ผลการอบแห้ง

กาแฟที่นำมาอบแห้งมีน้ำหนักเริ่มต้น 280 kg ใช้เวลาอบ 15 วัน จนเหลือ 65.88 kg มีความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงเหลือ 10.5%wb ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 26.41 ºC หลังจากสีกะเทาะกะลาเหลือน้ำหนักสารกาแฟ 56.1 kg ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การวัดค่าความชื้นของเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องวัดความชื้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยระบบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่ใช้เครื่องปรับอากาศ (อุณหภูมิเฉลี่ย 19.4 ºC) [9] พบว่า การทำให้น้ำระเหยที่อุณหภูมิ 26.41 ºC ใช้พลังงาน 2,300.32 kJ/kg_{Water} ซึ่ง

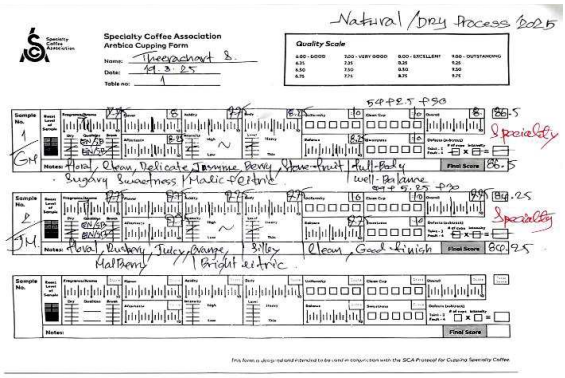
น้อยกว่าการระเหยที่อุณหภูมิ 19.4 ºC ที่ต้องใช้พลังงาน 2,454.93 kJ/kg_{Water}

3.3 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

ระบบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำทำให้น้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ 214.12 kg คิดเป็นพลังงานในการระเหยน้ำทั้งหมด 492,539.92 kJ ในระยะเวลา 15 วัน โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 345 kWh หรือ 1,243,263.76 kJ มีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ 39.62%

3.4 วัดคุณภาพกาแฟ

กาแฟที่ผ่านการอบแห้งด้วยระบบ LTLH และนำไปคั่วระดับอ่อน พักเป็นเวลา 7 วัน พบว่ามีกลิ่นของดอกไม้ มะลิ มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น กลิ่นและรสให้ความรู้สึกที่สะอาดขึ้น ความรู้สึกเป็นผลไม้ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น และเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นจากเดิม คะแนนการคัปปิ้ง (Cupping Score) ดังแสดงในรูปที่ 8 เพิ่มขึ้นจาก 82.75 เป็น 85.2 คะแนน ซึ่งถือว่ายกระดับจากกาแฟระดับดีมากไปสู่ระดับยอดเยี่ยม



รูปที่ 8 การให้คะแนนของการคัปปิ้งตามมาตรฐาน SCA

4 สรุปผล

ระบบควบคุมและแสดงผลอุณหภูมิต่ำและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้งได้เป็นอย่างดี มีค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เพียง 0.62% ระบบสามารถอบแห้งกาแฟแบบกระบวนการแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ 39.62% และที่สำคัญคุณภาพรสชาติของกาแฟมีการพัฒนาขึ้นจากระดับดีมากเป็นระดับยอดเยี่ยม [10]

ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการอบแห้งที่กล่าวมาเป็นการทดลองระบบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแบบเต็มรูปแบบ ในการพัฒนารสชาติกาแฟ ยังสามารถใช้วิธีผสมผสานกับกระบวนการอื่น ๆ ได้ เช่น การตากแดด หรือ การผึ่งลมในที่ร่ม เพื่อควบคุมการเกิดรสชาติที่ซับซ้อนอย่างเป็นระบบ อีกทั้งยังช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นพลังงานสิ้นเปลือง และเครื่องลดความชื้นแบบอัดไอเป็นเทคโนโลยีการอบแห้งที่มุ่งเน้นไปที่การลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องอบแห้ง ปัจจัยในการควบคุมจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเครื่องปรับอากาศที่ใช้ปัจจัยควบคุมหลักคืออุณหภูมิ ทำให้การระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเหมาะกับสภาพอากาศในประเทศไทย โดยเฉพาะพื้นที่สูงที่มีอากาศค่อนข้างเย็นและชื้น

แหล่งอ้างอิง

[1] C.-T. Yeh, The Study of Specialty Coffee Consumption in Bangkok, Thailand, Mahidol University, 2023.

[2] P.Poltronieri and F.Rossi, “Challenges in Specialty Coffee Processing and Quality Assurance,” Challenges, vol. 7;19, pp. 1-22, 2016.

[3] ก. กองพัฒนาการเกษตรพื้นที่เฉพาะ, “การปลูกและดูแลรักษาต้นกาแฟอาราบิก้า,” กรมส่งเสริมการเกษตร, 2554. [ออนไลน์]. Available:https://esc.doae.go.th/wpcontent/uploads/2020/02/Arabica.pdf. [%1 ที่เข้าถึง2568].

[4] อ. สุวัณณกีฏะ, “The Basic Concept of LTLH รวบรวมความรู้พื้นฐานของการทำ LTLH Drying พร้อมภาพประกอบฉบับเข้าใจง่าย,” ปรีดา, ตุลาคม 2566. [ออนไลน์]. Available: https://www.preda-roastinghouse.com/blog/4707/the-basic-concept-of-ltlh-coffee-drying-. [มีนาคม 2568].

[5] “Netpie,” National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), 2020. [Oneline]. Available: www.netpie.io. [2024].

[6] “Thermodynamics Tables and Charts,” [Online]. Available: https://engineering.wayne.edu/mechanical/pdfs/thermodynamic-_tables-updated.pdf. [2025].

[7] “ทำความรู้จัก Q Grader อาชีพ นักชิมกาแฟ ที่ไม่ใช่แค่ชิมกาแฟ”, redwoodcoff, [ออนไลน์]. Available: https://redwoodcoff.com/what-is-q-grader. [เข้าถึง2568].

[8] “Cupping เพื่อหา Character”, hillkoff, [ออนไลน์]. Available: https://www.hillkoff.shop/content/25916/cupping-เพื่อหา-character. [เข้าถึง2568].

[9] ป. ฝั้นแก้ว, ก. วุฒิจารี และ ศ. เอกบาง, “การพัฒนาและสร้างห้องอบอุณหภูมิต่ำความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสำหรับอบแห้งเมล็ดกาแฟ,” ใน การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติ ครั้งที่ 13, ประเทศไทย, 2564.

[10] “Introduction of Coffee Value Assessment (CVA),” INDONESIA SPECIALTY COFFEE, September 2024. [Oneline]. Available: https://specialtycoffee.id/articles/coffee-value-assessment-system-by-sca/. [2025].

การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารบนพื้นฐาน IoT

Development of IoT-Based Electricity Consumption Data Storage System in Buildings

พงษ์ชัย จำนงค์นอก ชลลัดดา คงม่วงหมู่ ศุภณกร พวงมาลัย รุ่งวิลัย กลิ่นทองหลาง และชัยวุฒ ชูรักษ์*
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม
E-mail: chaiwut_su@hotmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารอย่างเป็นระบบ โดยใช้กรณีศึกษาภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหลายพื้นที่ได้แก่ ชั้น 2, ชั้น 5 และพื้นที่ใช้งานในอาคารใกล้เคียง วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของภาควิชาโดยใช้เทคโนโลยี IoT และการแสดงผลแบบออนไลน์จากทุกพื้นที่การใช้งาน ระบบจัดเก็บข้อมูลการใช้พลังงานในอาคารที่ติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตเพื่อบันทึกข้อมูลการพลังงานไฟฟ้า เช่น แรงดันไฟฟ้า (V), กระแสไฟฟ้า (A), กำลังไฟฟ้า (W), และพลังงานไฟฟ้าสะสม (kWh) ผ่านการสื่อสารแบบไร้สาย ข้อมูลที่ได้ถูกส่งไปยัง Cloud Server และแสดงผลผ่านแดชบอร์ดออนไลน์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถวัดและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าได้และสามารถติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างแม่นยำและเป็นเครื่องมือสำคัญในการสนับสนุนการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: เทคโนโลยี IoT, การจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน

Abstract

This research focuses on the development of a systematic data collection and monitoring system for electrical energy usage in a building, using a case study of the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, which uses electrical energy from many areas, including the 2nd floor, 5th floor, and areas in the nearby building. The main objective of this research is to develop a data collection system for electrical energy usage in the department using IoT technology and online display from all areas of use. The data collection system for electrical energy usage in a building is equipped with a digital electricity meter connected to an Internet-connected device to record electrical energy data, such as voltage (V), current (A), electrical power (W), and accumulated electrical energy (kWh) via wireless communication. The obtained data is sent to the Cloud Server and displayed on an online dashboard. The experimental results show that the system can measure and record electrical energy values and can accurately track electrical energy usage and is an important tool to support sustainable energy management

Keywords: IoT technology, sustainable energy management

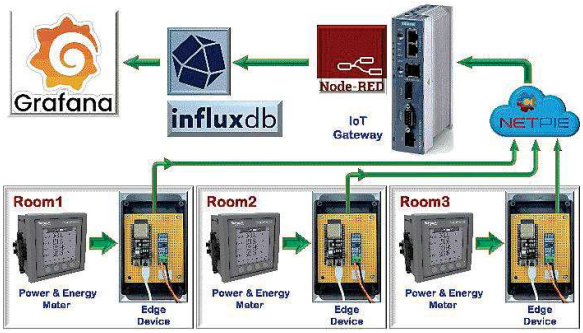
1. บทนำ

ในยุคที่ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ภายใต้บริบทของเป้าหมายด้านความยั่งยืนในระดับโลก การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพในอาคารกลายเป็นประเด็นสำคัญเชิงกลยุทธ์ อาคารคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 40% ของการใช้พลังงานทั่วโลก จึงเป็นเป้าหมายหลักในการลดการใช้พลังงาน [1] อย่างไรก็ตาม วิธีการติดตามพลังงานแบบเดิม ซึ่งอาศัยการอ่านค่ามิเตอร์เป็นระยะ หรือการวัดผลจากจุดรวมศูนย์ มักมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ การบันทึกข้อมูลด้วยมนุษย์ที่อาจมีข้อผิดพลาด (Human Error) และขาดฟังก์ชันในการวิเคราะห์แนวโน้มพลังงาน รวมถึง ขาดระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติของพลังงาน ทำให้การแก้ไขปัญหาล่าช้า และอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร ระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันยัง อีกทั้งยัง ไม่สามารถพยากรณ์แนวโน้มการใช้พลังงานได้ เนื่องจากขาดระบบที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลังเพื่อนำไปใช้วางแผนลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) เมื่อถูกรวมเข้ากับระบบบริหารจัดการพลังงานในอาคาร (Building Energy Management Systems: BEMS) ได้เปิดทางสู่การจัดการพลังงานที่อิงข้อมูลและอัตโนมัติอย่างแท้จริง ระบบ IoT ประกอบด้วยเซนเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรโตคอลการสื่อสารไร้สายที่ทำงานร่วมกันเพื่อเก็บ ส่ง และประมวลผลข้อมูลการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ [2] ระบบเหล่านี้สามารถให้ข้อมูลย้อนกลับทันทีแก่ผู้ใช้งานหรือผู้ดูแลอาคาร

และการดำเนินมาตรการตอบสนองโหลด (Demand Response) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถติดตั้งแบบแยกชุดหรือโมดูลาร์ และปรับขยายได้ตามประเภทอาคารที่หลากหลาย โดยไม่จำเป็นต้องใช้งบประมาณสูง

การพัฒนาเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) ได้เพิ่มวิธีการประยุกต์ใช้กับระบบอัตโนมัติในการตรวจสอบพลังงาน การจัดเก็บข้อมูลและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ระบบที่ใช้ IoT สามารถเก็บข้อมูลการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์จากเซ็นเซอร์และจัดเก็บข้อมูลในแพลตฟอร์มคลาวด์เพื่อการวิเคราะห์และการตัดสินใจที่แม่นยำยิ่งขึ้น [3] ระบบจัดเก็บข้อมูลอัจฉริยะ ที่ผสานรวมกับ IoT สำหรับการจัดการพลังงานในอาคาร



รูปที่ 1 ระบบจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้า

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบไฟฟ้าโดยใช้ Internet of Things (IoT) การดำเนินการวิจัยแบ่งขั้นตอนการพัฒนาระบบงานตามหลักของวงรอบการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle : SDLC) [4] รูปที่ 1 แสดงระบบตรวจวัดและวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) โดยใช้มิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลสำหรับการวัดและบันทึกค่าพลังงานที่ใช้งานในแต่ละช่วงเวลา กระบวนการเริ่มต้นจากการดึงข้อมูลจากมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลภายในอาคารผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตสำหรับรวบรวมข้อมูล จากนั้นข้อมูลพลังงานที่ได้จะถูกส่งผ่าน IoT Gateway โดยใช้โปรโตคอลการสื่อสาร RS-485 ซึ่งเป็นโปรโตคอลที่เหมาะสำหรับการส่งข้อมูลระยะไกลและมีความเสถียรสูง ข้อมูลพลังงานที่ถูกรวบรวมจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลเพื่อให้สามารถเข้าถึงและวิเคราะห์ข้อมูลในภายหลังได้อย่างสะดวก ในขั้นตอนสุดท้าย ข้อมูลพลังงานจะถูกนำมาประมวลผลและแสดงผลในรูปแบบกราฟิกบนแดชบอร์ดเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและตรวจสอบการใช้พลังงานภายในอาคารได้แบบเรียลไทม์ ทั้งยังช่วยในการวิเคราะห์แนวโน้มการใช้พลังงาน รวมถึงนำค่าพลังงานที่ได้ไปคิดค่าไฟและปรับปรุงการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

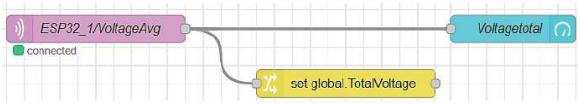
2.1 การออกแบบกล่องรับ-ส่งข้อมูล

กล่องรับ-ส่งข้อมูลมิเตอร์ถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการรวบรวมข้อมูลจากมิเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในพื้นที่ต่าง ๆ ของอาคาร โดยข้อมูลที่ต้องการประกอบด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริง ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์ และความถี่ของระบบ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ถูกส่งต่อไปยังระบบเครือข่ายผ่านเทคโนโลยีไร้สาย เพื่อนำไปจัดเก็บวิเคราะห์ และแสดงผลในระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์

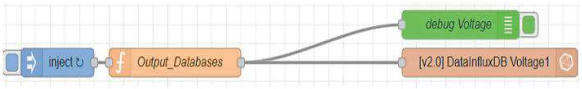
อุปกรณ์ที่ใช้ภายในกล่องประกอบด้วยโมดูลแปลงสัญญาณ MAX485 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 ซึ่งเชื่อมต่อกันเพื่อทำหน้าที่ดึงข้อมูลจากมิเตอร์ผ่านโปรโตคอล Modbus RTU ที่ใช้สัญญาณ RS-485 โดย MAX485 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากมาตรฐาน RS-485 ให้สามารถเชื่อมต่อกับขา TX/RX ของ ESP32-S3 ได้อย่างเหมาะสม จากนั้น ESP32-S3 ประมวลผลข้อมูลและส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยังแพลตฟอร์ม NETPIE ผ่านโปรโตคอล MQTT ซึ่งเป็นมาตรฐานที่นิยมในระบบ Internet of Things (IoT) การเลือกใช้ ESP32-S3 เนื่องจากเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความสามารถเชื่อมต่อ Wi-Fi ได้ในตัว รองรับการประมวลผลข้อมูลในระดับที่เพียงพอสำหรับงานลักษณะนี้ อีกทั้งยังมีหน่วยความจำเพียงพอ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่เกิดปัญหาความร้อนสะสมหรือล่มระหว่างการทำงาน ส่วน MAX485 เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลแบบ RS-485 ได้อย่างเสถียร สามารถใช้งานในระยะทางไกลถึง 1,200 เมตร เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพแวดล้อมของอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำในการสื่อสารข้อมูลจากมิเตอร์ไฟฟ้า

2.2 การออกแบบการส่งข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า

ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากอาคารจะถูกวัดโดยเครื่องวัดพลังงาน (Power Meter) และส่งผ่านโปรโตคอล Modbus ผ่านสายสื่อสาร RS-485 ไปยังตัวแปลงสัญญาณที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ RS-485 ให้เป็น TTL เพื่อให้สัญญาณดังกล่าวสามารถถูกอ่านได้โดยไมโครคอนโทเลอร์ ESP32 เมื่อ ESP32 รับข้อมูลแล้วจะทำการประมวลผล และส่งต่อข้อมูลไปยังแพลตฟอร์ม NETPIE ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มสำหรับการสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลในระบบ IoT สุดท้ายข้อมูลเหล่านี้สามารถถูกจัดเก็บและแสดงผลเพิ่มเติมผ่าน Siemens IoT Gateway



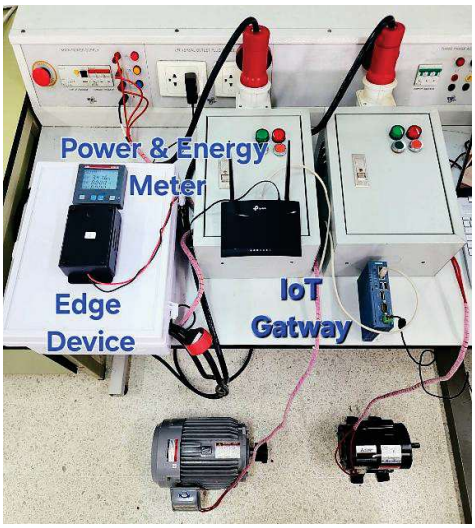
รูปที่ 2 Node การรับข้อมูลจาก ESP32 ด้วยโปรโตคอล MQTT



รูปที่ 3 Node ที่ส่งข้อมูลไปยัง InfluxDB

2.3 การรวบรวมข้อมูลพลังงานเพื่อบันทึกลงบนฐานข้อมูล

ข้อมูลการใช้พลังงานจากอาคารถูกส่งผ่านแพลตฟอร์ม NETPIE ไปยังโปรแกรม Node-RED ที่ทำงานบน Siemens IoT2050 Gateway ขั้นตอนนี้ Node-RED ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการจัดการและรวมข้อมูลที่ได้รับจากหลายแหล่งดังแสดงในรูปที่ 2 ข้อมูลการใช้พลังงานทั้งหมดจะถูกประมวลผลและบูรณาการเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการจัดเก็บ จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในฐานข้อมูล InfluxDB (Data Base) หลังจากการจัดเก็บข้อมูลแล้ว ข้อมูลดังกล่าวยังถูกส่งไปแสดงผลบนแพลตฟอร์ม Gafana (Dashboard) ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 การทดสอบระบบที่นำเสนอกับโหลดจำลอง

2.4 การทดสอบการทำงานของระบบที่นำเสนอ

การทดสอบระบบกล่องรับ-ส่งข้อมูลมิเตอร์ ได้มีการจัดเตรียมอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ โดยประกอบด้วย Power & Energy Meter Edge Device (กล่องรับ-ส่งข้อมูลที่ออกแบบ) IoT Gateway และชุดโหลดที่จำลองขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานของระบบในสภาพแวดล้อมจริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความแม่นยำในการอ่านค่าจากมิเตอร์และประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบคลาวด์

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการเชื่อมต่อมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลเข้ากับอุปกรณ์ Edge Device ผ่านสายสื่อสาร RS-485 โดย Edge Device ประกอบด้วยโมดูล MAX485 และไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32-S3 ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลจากมิเตอร์แล้วส่งผ่านเครือข่าย Wi-Fi ไปยัง IoT Gateway โดยใช้แพลตฟอร์ม NETPIE และโปรโตคอล MQTT ในการส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบกลาง การทดสอบได้มีการจำลองโหลดโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 เฟส 1 ตัว และมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด3 เฟส 1 ตัวเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4 โดยทำการเก็บข้อมูลที่แสดงบนหน้าจอมิเตอร์และเปรียบเทียบกับค่าที่แสดงผลบนระบบปลายทางที่รับข้อมูลจาก Edge Device ผ่าน IoT Gateway การทดสอบนี้ดำเนินการเป็นระยะเวลา 1 วัน เพื่อประเมินความเสถียรในการรับส่งข้อมูล และตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่ส่งจากกล่องเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่แสดงบนมิเตอร์จริง จากนั้นนำระบบที่ออกแบบไว้ติดตั้งกับมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลภายในอาคารของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร



รูปที่ 5 การทดสอบระบบที่นำเสนอกับมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลภายในอาคาร

3. ผลการทดสอบระบบ

3.1 ผลการทดสอบระบบโหลดที่จำลอง

การทดลองได้ทำการต่อโหลดโดยใช้ มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 เฟส จำนวน 1 ตัว และ มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 เฟส จำนวน 1 ตัว เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าพลังงานในระบบจริง โดยการดำเนินการทดสอบมีรูปแบบดังนี้ เริ่มจากการ เปิดมอเตอร์ขนาด 1 เฟสเพียงตัวเดียวเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงทำการ เปิดมอเตอร์ขนาด 3 เฟสเพิ่มเติมอีก 1 ตัว ทำให้มีมอเตอร์ทั้งสองตัวทำงานพร้อมกันเป็นเวลา 15 นาที ต่อมา ปิดมอเตอร์ขนาด 1 เฟส ให้เหลือเพียงมอเตอร์ 3 เฟสทำงานเดี่ยวอีก 15 นาที และสลับกลับไปเปิดมอเตอร์ 1 เฟสอีกครั้ง เพื่อให้ทั้งสองตัวทำงานร่วมกัน จนครบระยะเวลา 1 ชั่วโมง

การทดลองได้ทำการต่อโหลดโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 เฟส และ 3 เฟส เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าทางไฟฟ้าในสภาวะใช้งานจริง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นช่วงเวลาตามลำดับการเปิด-ปิดโหลด รวมทั้งหมด 1 ชั่วโมง ผลการวัดจากระบบแสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้ามีความคงที่ตลอดการทดลอง ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับพฤติกรรมของโหลดอย่างชัดเจน โดยเพิ่มขึ้นเมื่อมีโหลดมากขึ้น และลดลงเมื่อปิดโหลดบางส่วน ทั้งนี้ ค่าพลังงานสะสมมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความสามารถของระบบในการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลได้อย่างแม่นยำและเสถียร

นอกจากนี้ ความถี่ไฟฟ้าในระบบคงที่ที่ 50 Hz ตลอดการทดลอง แสดงถึงความมั่นคงของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และระบบที่พัฒนาขึ้น

สามารถนำไปใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าและวางแผนการจัดการพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 การแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าของโหลดจำลอง

3.2 ผลการทดสอบระบบโหลดภายในอาคาร

หลังจากการทดสอบจำลองโหลด ระบบสามารถวัดค่าทางไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง จึงได้นำระบบไปทดสอบกับโหลดภายในอาคารจริง พบว่าสามารถตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า ความถี่ กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานสะสมได้อย่างถูกต้องและต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยค่าที่วัดได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้โหลดจริงของอาคาร แสดงให้เห็นถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้า และเป็นพื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนได้ต่อไป



รูปที่ 7 การแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร

4. สรุป

การพัฒนาระบบจัดเก็บข้อมูลและตรวจสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารได้ออกแบบกล่องอุปกรณ์เก็บข้อมูลพลังงานซึ่งภายในประกอบด้วย ESP32-S3 และ MAX485 เพื่อใช้ในการรับข้อมูลการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลและส่งข้อมูลไปยังระบบประมวลผลหลัก การรับข้อมูลจากมิเตอร์ไฟฟ้าดิจิทัลผ่าน RS-485 และส่งข้อมูลไปยัง Node-RED เพื่อประมวลผลและจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูล InfluxDB ข้อมูลที่ได้รับจะถูกนำไป แสดงผลผ่านแดชบอร์ดแบบเรียลไทม์เพื่อให้สามารถติดตามการใช้พลังงานได้สะดวกยิ่งขึ้น ระบบทั้งหมดถูกควบคุมผ่าน Siemens IoT 2050 ซึ่งเป็นศูนย์กลางในการประมวลผลและสื่อสารข้อมูล โดยการออกแบบระบบนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบการใช้พลังงานลดความผิดพลาดของบุคคลและอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งานในการติดตามข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและแม่นยำ การพัฒนาระบบนี้ทำเพื่อใช้เก็บข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากหลายพื้นที่ของภาควิชาไฟฟ้า โดยเน้นการนำเทคโนโลยี IoT มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและบริหารจัดการพลังงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย จากกองทุนสนับสนุนการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

เอกสารอ้างอิง

[1] Mahmud, S., Bensaali, F., & Houchati, M., “Multimodal feature fusion and ensemble learning for non-intrusive occupancy monitoring using smart meters,” *Building and Environment*, 271, 112635, 2025.

[2] H. K. Egos, J. A. Layo and E. A. Tacda, “Design and Development of an IoT-Based Load Monitoring Device for Three-Phase Building,” *6th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)*, Pattaya, Thailand, pp. 1-9, 2024.

[3] Fajri, T. I., Rahayu, N., Wasiran, Budiman, Y. U., & Hasti, N. “Internet of Things (IoT) Integration for Real-Time Monitoring in Smart Cities,” *International Journal Software Engineering and Computer Science* (IJSECS), 5(1), 22–28, 2025.

[4] เกียรติพงษ์ อุดมธนะธีระ, “วงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle : SDLC),” กองโลจิสติกส์ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2019.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การทดสอบภาคสนามของระยะเบรกรถไฟ: ผลกระทบของความเร็ว มวล และบทบาทของระบบเบรกเชิงไฟฟ้า

Field Testing of Train Braking Distance: Effects of Speed, Mass, and the Role of Electrical Brake Systems

คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ์* กฤตยา สมสัย จีระพงศ์ ศรีวิชัย อรรถชัย ภูมิผานิล เมธา ทัศคร และณัฐวุฒิ สมพงษ์
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
E-mail: khomkrit.sr@rmuti.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบภาคสนามของระบบหยุดขบวนรถไฟอัตโนมัติสำหรับหัวรถจักรขนาดเล็ก โดยมี track gauge ขนาด 12 นิ้ว เพื่อใช้ในการแข่งขัน TRRN Railway Challenge 2025 การทดสอบมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบของความเร็วและน้ำหนักบรรทุกต่อระยะเบรกของขบวนรถไฟ รวมถึงการทำงานของระบบเบรกเชิงกลและไฟฟ้า โดยเฉพาะ Regenerative Braking ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหยุดขบวนรถไฟ การทดลองภาคสนามดำเนินการภายใต้ความเร็วเริ่มต้นที่ 5 – 7 km/h และน้ำหนักขบวนที่ 450 – 550 kg ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วและน้ำหนักเพิ่มขึ้นระยะเบรกจะยาวขึ้นตามหลักฟิสิกส์ของพลังงานจลน์ โดยระบบเบรกไฟฟ้าสามารถช่วยลดระยะเบรกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมระยะเบรกของรถไฟขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความแม่นยำ นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการพัฒนาระบบหยุดรถไฟอัตโนมัติในอนาคต โดยเฉพาะการนำมาตรฐาน ETCS (European Train Control System) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมระยะเบรกและความปลอดภัยของระบบขนส่งทางราง

คำสำคัญ: ระบบหยุดรถไฟอัตโนมัติ, ระบบเบรกไฟฟ้า, ระยะเบรก

Abstract

This research presents the design and field testing of an automatic train stopping system for a small locomotive with a 12-inch track gauge, developed for the TRRN Railway Challenge 2025. The study focuses on the effects of speed and load weight on braking distance, as well as the performance of mechanical and electrical braking systems, particularly Regenerative Braking, which enhances stopping efficiency. Field tests were conducted at initial speeds of 5–7 km/h and train weights of 450–550 kg. The results indicate that as speed and weight increase, the braking distance extends, following the principles of kinetic energy. The electrical braking system significantly improves braking performance by reducing stopping distance. This study provides insights into the development of braking control systems for small locomotives, aiming to enhance safety and precision. Furthermore, the findings contribute to the advancement of automatic train stopping systems, particularly through the application of the European Train Control System (ETCS) standard to improve braking distance control and railway transport safety.

Keywords: Automatic train stopping system, electrical braking system, braking distance

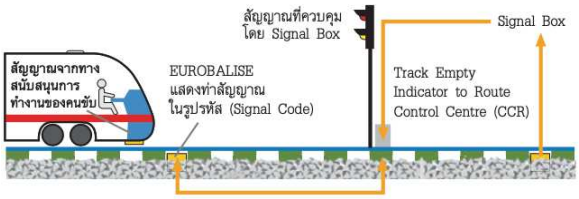
1. บทนำ

การขนส่งทางรางเป็นระบบการคมนาคมที่มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมทั่วโลก ด้วยความสามารถในการขนส่งผู้โดยสารและสินค้าปริมาณมากอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบรางมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับรูปแบบการขนส่งอื่นๆ เนื่องจากมีเส้นทางเฉพาะและมาตรการควบคุมที่เข้มงวด ความปลอดภัยในระบบรางเป็นหัวใจสำคัญในการดำเนินงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการเคลื่อนที่และการหยุดของรถไฟ การควบคุมการเบรกที่มีประสิทธิภาพช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุ และเพิ่มความน่าเชื่อถือในการให้บริการ ในบทความนี้ จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างหัวรถจักรไฟขนาดเล็ก โดยมีขนาดความกว้างราง (track gauge) 12 นิ้ว เพื่อเข้าร่วมการแข่งขันการออกแบบหัวรถจักรไฟ TRRN Railway Challenge 2025 ณ ศูนย์อนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (อพ.สธ.-มทส.) ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา ที่ซึ่งมีการแข่งขันระบบหยุดรถไฟแบบอัตโนมัติ (ATS) ทีมอาจารย์และนักศึกษาคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี FIT Railway ได้ออกแบบและทดสอบวงจรควบคุมการหยุดรถไฟอัตโนมัติ โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการหยุดรถ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบอาณัติสัญญาณ

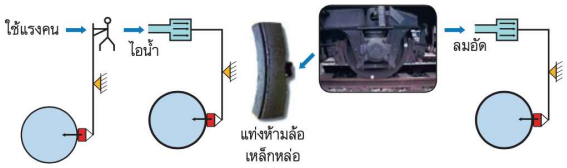
การเดินรถไฟอัตโนมัติเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการเดินทางโดยรถไฟ ซึ่งองค์ประกอบสำคัญของการเดินรถไฟคือ ระบบอาณัติสัญญาณ เพื่อควบคุมและกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟในการเดินรถ ป้องกันการชนและเพิ่มความปลอดภัยในการเดินรถ ระบบนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น สัญญาณไฟ ระบบบังคับสัมพันธ์ และระบบควบคุมจากศูนย์กลาง มาตรฐานการควบคุมรถไฟ ดังแสดงรูปที่ 1 คือ European Train Control System (ETCS) ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลสำหรับระบบควบคุมและอาณัติสัญญาณรถไฟในยุโรป ETCS มีหลายระดับ (ETCS Level 0-3) ซึ่งมีการส่งข้อมูลผ่านอุปกรณ์รายทางคือ Eurobalise เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพทางและสัญญาณแก่ขบวนรถไฟ ช่วยให้ระบบป้องกันเหตุอันตรายของขบวนรถโดยอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) [1-3]



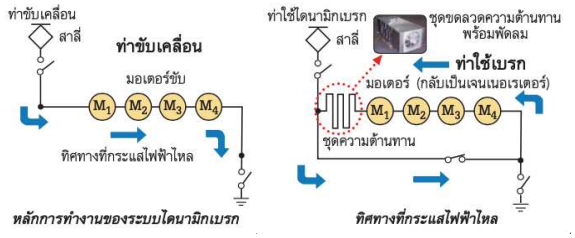
รูปที่ 1 องค์ประกอบการควบคุมการเดินขบวนรถไฟ ECTS Level 0

2.2 ระบบหยุดรถไฟ

การหยุดของรถไฟแบ่งออกเป็น 2 ระบบดังนี้ ระบบเบรกเชิงกลและเบรกเชิงไฟฟ้า ระบบเบรกเชิงกลอาศัยแรงกลสร้างแรงต้านโดยใช้ผ้าเบรกกดลงบนล้อหรือดิสก์เบรก ดังรูปที่ 2 เพื่อชะลอหรือหยุดขบวนรถไฟ ระบบนี้มีความน่าเชื่อถือสูงและเป็นที่นิยมใช้ในรถไฟทั่วไป นอกจากนี้ ระบบเบรกรถไฟเชิงไฟฟ้า อาศัยพลังงานไฟฟ้าในการสร้างแรงต้านกลับเพื่อชะลอหรือหยุดขบวนรถไฟ ดังรูปที่ 3 โดยมีข้อดีคือการตอบสนองที่รวดเร็วและการควบคุมที่แม่นยำ ระบบนี้มักใช้ร่วมกับระบบเบรกเชิงกลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหยุดรถ [4]



รูปที่ 2 ผังระบบเบรกรถไฟเชิงกล



รูปที่ 3 ผังระบบเบรกรถไฟเชิงไฟฟ้า[1]

2.3 ความสัมพันธ์ของระยะเบรก

การหยุดขบวนรถไฟขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความเร็วเริ่มต้นของรถไฟ แรงเบรก น้ำหนักของขบวน และลักษณะของราง โดยสามารถใช้สมการฟิสิกส์พื้นฐานมาอธิบายการคำนวณระยะเบรกได้ ดังนี้

$$d = \frac{v^2}{2a} \quad (1)$$

เมื่อ d คือระยะเบรก (m) v คือความเร็วของรถไฟก่อนเริ่มเบรก (m/s) และ a คืออัตราการลดความเร็ว (m/s^2) ซึ่งขึ้นอยู่กับระบบเบรก

2.4 แรงการหยุดรถไฟ (Braking Force)

$$F_b = ma \quad (2)$$

เมื่อ F_b คือแรงที่ใช้เบรก (N) m คือมวลของขบวนรถไฟ (kg) และ a คืออัตราการลดความเร็ว (m/s^2)

2.5 พลังงานจลน์ของขบวนรถไฟ (Kinetic Energy)

$$KE = \frac{1}{2}mv^2$$

เมื่อ KE คือพลังงานจลน์ของรถไฟ ระบบเบรกต้องมีความสามารถในการกระจายหรือเปลี่ยนพลังงานจลน์นี้ให้หมดไป โดยการแปลงเป็นพลังงานความร้อนในเบรกเชิงกล หรือพลังงานไฟฟ้าในระบบเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative)

ในบทความนี้จึงนำเสนอการการทดสอบภาคสนามของระยะเบรกรถไฟที่ออกแบบไว้ โดยหาความสัมพันธ์ของความเร็วและมวลของรถไฟต่อระยะการเบรกของขบวนรถ โดยใช้ความเร็วทดสอบที่ 5 – 7 km/h และน้ำหนักขบวนรถไฟ (หัวจักรและพ่วงโดยสาร)ที่ 450 – 550 kg

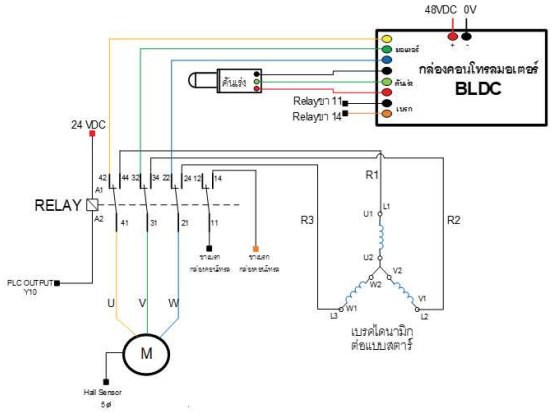
3. การทดสอบระยะเบรกรถไฟ

3.1 โครงสร้างหัวจักรรถไฟ

หัวจักรรถไฟที่ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย 2 โบกี้ ขนาดความกว้างของล้อสำหรับทางรถไฟ (Track gauge) 12inch แต่ละโบกี้ติดตั้งมอเตอร์และตัวควบคุมกำลังขนาด 1.5kW แรงดัน 48V แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 48V 100Ah ระบบห้ามล้อเป็นเชิงกลและไฟฟ้า คือใช้จานเบรก 1 ชุดต่อโบกี้ และรีเจนเนอร์ทีฟให้ตัวต้านทานขนาด 10Ω (200W) โดยแสดงวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 5 จากโครงสร้างหัวจักรรถไฟและชุดควบคุมมีน้ำหนักรวม 350 kg และขบวนพวงโดยสารสำหรับทดสอบมวลอีก 100 – 200 kg



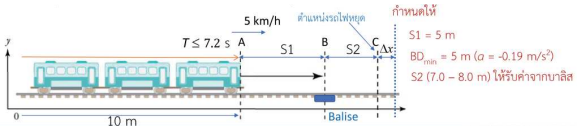
รูปที่ 4 โครงสร้างหัวจักรรถไฟ



รูปที่ 5 วงจรไฟฟ้าหัวจักรรถไฟ

3.2 การทดสอบระยะเบรกรถไฟภาคสนาม

การทดสอบระยะเบรกรถไฟอ้างจากกติกาการแข่งขัน Railway challenge 2025 ซึ่งเป็นการประลองระบบป้องกันรถไฟอัตโนมัติ (Automatic train protection: ATP) โดยให้รถไฟเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งที่จุด A ถึงจุด B ที่ระยะ 5 m และมีความเร็วไม่น้อยกว่า 5 km/h ระบบเบรกจะเริ่มที่จุด B และไปหยุดที่จุด C โดยมีระยะเบรก 7.0 – 8.0 m ในการทดสอบนี้จะให้รถไฟหยุดที่ระยะ 7 m เมื่อรถไฟตรวจจับบาลิสที่จุด B ดังแสดงในรูปที่ 6 และตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์อ่านบาลิสแสดงในรูปที่ 7 ความมุ่งหมายการทดสอบภาคสนามนี้คือการหาความสัมพันธ์ของความเร็วและมวลของขบวนรถไฟต่อระยะเบรกของรถไฟ เพื่อนำไปพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมระยะเบรกรถไฟ โดยทดสอบที่ความเร็ว 5 – 7 km/h และมวลของขบวนรถไฟ 450 – 550 kg



รูปที่ 6 การทดสอบระยะทำความเร็ว ระยะเบรกและระยะหยุดรถไฟ



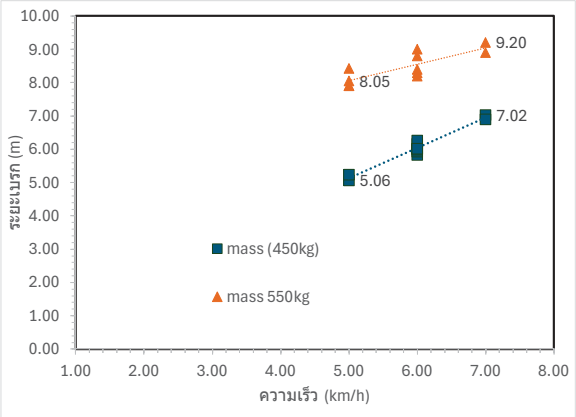
รูปที่ 7 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์อ่านบาลิสและบาลิส

4. ผลการทดลอง

การทดสอบระยะเบรกรถไฟภาคสนามด้วยความเร็ว 5 – 7 km/h และมวลของขบวนรถไฟ 450 – 550 kg ตามลำดับ ใช้เลเซอร์วัดระยะเบรกของรถไฟแบบดิจิทัล รุ่น RUN50 MARATHON ดังแสดงในรูปที่ 8 ผลการทดสอบพบว่า ระยะเบรกสั้นที่สุด 5.06 m ที่ความเร็ว 5 km/h มวลรถไฟ 450 kg และระยะเบรกไกลที่สุด 9.20 m ที่ความเร็ว 7 km/h มวลรถไฟ 550 kg และที่ความเร็ว 7 km/h มวลรถไฟ 450 kg รถไฟสามารถหยุดได้ใกล้ระยะที่กำหนดไว้ 7.02 m ซึ่งผลการวัดความเร็วและระยะเบรกเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบมากว่า 15 ครั้งและเป็นผลของการเบรกทางไฟฟ้า (regenerative) เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 เครื่องมือวัดระยะแบบดิจิทัลและการวัดระยะเบรก



รูปที่ 9 ผลการทดสอบระยะเบรกรถไฟ

5. สรุปและอภิปรายผล

จากการออกแบบและทดสอบภาคสนามของหัวจักรรถไฟเล็กขนาด 12 inch ระบบหยุดรถไฟอัตโนมัติ พบว่า ความเร็วและน้ำหนักของขบวนรถไฟส่งผลโดยตรงต่อระยะเบรก โดยผลการทดสอบมากกว่า 15 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าความเร็วของรถไฟ 5 km/h และน้ำหนัก 450 kg ระยะเบรกที่วัดได้สั้นที่สุดคือ 5.06 เมตร ขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วเป็น 7 km/h และน้ำหนักเป็น 550 kg ระยะเบรกเพิ่มขึ้นเป็น 9.20 เมตร ซึ่งเป็นไปตามหลักฟิสิกส์ที่ว่า พลังงานจลน์ของขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นตามมวลและกำลังสองของความเร็ว ส่งผลให้ต้องใช้แรงเบรกมากขึ้นและมีระยะเบรกที่ยาวขึ้น นอกจากนี้ระบบเบรกไฟฟ้า (Regenerative Braking) ที่ออกแบบขึ้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมระยะเบรกโดยแปลงพลังงานจลน์กลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหยุดขบวนรถไฟให้แม่นยำขึ้น โดยเฉพาะที่ความเร็ว 7 km/h และน้ำหนัก 450 kg ซึ่งสามารถหยุดได้ใกล้ระยะที่กำหนดไว้ที่ 7.02 เมตร ผลการทดลองนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการพัฒนาระบบควบคุมระยะเบรกของรถไฟขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความปลอดภัย อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการออกแบบระบบหยุดรถไฟอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยสูงสุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่สนับสนุนทุนวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] น. จันทศร, ช่างรถไฟ: ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ISBN 9786162101364.

[2] Lissom Logistics. (n.d.). Lissom Logistics: Homepage. Retrieved March 25, 2025, from https://www.lissom-logistics.co.th/index.php

[3] กรมการขนส่งทางราง.(2566), มขร.-SC-003-2566-มาตรฐานระบบควบคุมอาณัติสัญญาณจากศูนย์กลางบนโครงข่ายรถไฟสายประธาน, form https://www.drt.go.th

[4] ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2568). การควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณเบื้องต้น [Introduction of railway control and signalling]. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ISBN: 9789745337909



ประวัติผู้เขียนบทความ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์คมกฤษณ์ ศรีสุวรรณ์
อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
งานวิจัยที่สนใจ นวัตกรรมด้านพลังงาน สมองกลฝังตัว ระบบราง ยานยนต์ไฟฟ้า เครื่องมือวัดทางไฟฟ้าและอุตสาหกรรม

การทดสอบสมรรถนะเครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็ก

Performance Test of a Small Biomass Shredder

จักรกฤษณ์ เคลือบวัง[1*] อมรเทพ ประเสริฐน้อย[1] มณิสรา มั่นแก้ว[1] สวัสดิ์ ยุคะลัง[1] และ อภิรักษ์ ขัดวิลาศ[2]
[1*]หน่วยวิจัยพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
E-mail: jukkrit_k@rmutl.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบการใช้งานเครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็กเพื่อการการลดปริมาตรใบไม้และเปลือกไม้แห้งภายในสถานศึกษา วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการหาแนวทางทดแทนการเผาขยะชีวมวลเหล่านั้นช่วงฤดูแล้งที่มักก่อปัญหามลพิษทางอากาศอยู่เป็นประจำ เครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็กขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดเฟสเดียวพิกัด 2 แรงม้า ดำเนินการทดสอบกับขยะชีวมวลประเภทใบไม้แห้งจำนวน 5 ชนิดได้แก่ ใบสัก ใบหูกวาง ใบพลวง ใบพะยอม และ ใบยูคาลิปตัส ได้ผลการลดปริมาตรมากที่สุดคือ 83.78% ของใบสัก และน้อยที่สุดคือ 52.70% ของใบยูคาลิปตัส ส่วนขยะชีวมวลประเภทเปลือกลำต้น ได้แก่ เปลือกลำต้นยูคาลิปตัสให้การลดปริมาตรถึง 85.14% นอกจากนี้ยังได้หาแนวทางประหยัดพลังโดยทำงานร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมแรงดันได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: ขยะชีวมวล, เครื่องย่อยกิ่งไม้ใบไม้ขนาดเล็ก, การใช้พลังงาน

Abstract

This article proposes a use of small biomass shredder to reduce the volume of dry leaves and barks found on school campuses. It aims to replace burning that causes harmful air pollution. Experimental works demonstrate the soundness of the method. The small biomass waste shredder has been driven by a 2-hp single phase ac motor and tested with 5 types of dry leaf, Teak leaf, tropical Almond leaf, white shorea leaf, and Eucalyptus leaf. The obtained volume reduction shows that the largest and the smallest volume reduction is of the Teak leaf at 83.78% and of the Eucalyptus leaf at 52.70% , respectively. For the other type of biomass waste, Eucalyptus bark was used for test and gave the volume reduction at 85.14%. Further experiments on energy consumption using a thyristor-based power converter to control the shredder confirm that significant energy savings can be achieved.

Keywords: biomass waste, garden shredder, energy consumption



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 ตัวอย่างการจัดการขยะชีวมวล (ก) ย่อยสลายเองที่แหล่งผลิต (ข) ย่อยสลายเองที่ส่วนกลาง และ (ค) เผา

1. บทนำ

โลกถือกำเนิดขึ้นและวิวัฒนาการผ่านมากว่า 4,500 ล้านปี [1] จนถึงปัจจุบันมนุษย์ถือว่าเป็นผู้อาศัยหลักบนโลกที่อยู่ร่วมกับสิ่งมีชีวิตชนิดอื่น ๆ ทั้งสัตว์และพืช [2] เพื่อให้เกิดความสมดุลและความยั่งยืนของการอยู่ร่วมกันบนโลกใบนี้ต่อไป จึงจำเป็นต้องตระหนักถึงสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาวะภูมิอากาศโลกเนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ในยุคปัจจุบัน [3] ภายใต้กรอบการดำรงชีวิตของมนุษย์ที่ต้องการปัจจัย 4 ได้แก่ อาหาร ที่อาศัย เครื่องนุ่งห่ม และ ยารักษาโรค ย่อมก่อให้เกิดขยะชีวมวล ขึ้นแต่ละวันปริมาณมหาศาล [4] เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดภายหลังจึงจำเป็นต้องมีแนวทางการจัดการขยะชีวมวลอย่างเหมาะสม เช่นการนำขยะชีวมวลมาเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิง [5] การนำขยะชีวมวลมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน [6] และ การนำขยะชีวมวล ประเภทใบมะพร้าวมาใช้ประโยชน์ [7] เป็นต้น การจัดการขยะชีวมวลมีความหลากหลายตามชนิดและลักษณะของขยะชีวมวล ทั้งนี้ ควรมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ตัวอย่างดังรูปที่ 1 เป็นวิธีการจัดการขยะชีวมวลประเภทใบไม้และกิ่งไม้ของโรงเรียนแห่งหนึ่ง วิธีที่หนึ่ง การเผา เป็นวิธีที่ง่ายแต่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ แสดงดังรูปที่ 1(c) วิธีที่สอง การรวบรวมสะสมไว้โคนต้นไม้ เป็นวิธีที่สะดวกแต่ต้องการพื้นที่มากสำหรับต้นไม้ที่ปริมาณใบจำนวนมากโดยเฉพาะช่วงผลัดใบ เช่นต้นหูกวาง ซึ่งให้ร่มเงาได้ดี และมักนิยมปลูกตามโรงเรียน แสดงดังรูปที่ 1(a) วิธีสุดท้าย วิธีที่สาม การรวบรวมไว้บริเวณพื้นที่ฝังกลบ แต่หน่วยงานดังกล่าวจำเป็นต้องมีพื้นที่สำรองสำหรับกิจกรรมการกำจัดขยะชีวมวลโดยเฉพาะ จึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะกับเมืองขนาดใหญ่และประชากรอยู่อย่างหนาแน่น แสดงดังรูปที่ 1(b) ผู้วิจัยจึงสนใจร่วมค้นหาแนวทางการบริหารจัดการขยะชีวมวล ประเภทใบไม้และกิ่งไม้ สำหรับชุมชนขนาดเล็กที่ต้องการอยู่ร่วมกับพืชอย่างยั่งยืน โดยแนวทางดังกล่าวคือการลดขนาดขยะชีวมวลประเภทใบไม้ด้วยเครื่องย่อยขยะชีวมวล [8] ซึ่งจะช่วยลดพื้นที่การจัดเก็บและปล่อยให้กระบวนการย่อยสลายทางธรรมชาติดำเนินไปโดยสะดวกและรวดเร็ว หรือจะนำขยะชีวมวลที่ผ่านการลดขนาดและปริมาตรลงแล้วไปใช้ประโยชน์อื่น ย่อมดำเนินการได้โดยง่ายเนื่องจากสามารถบรรจุและขนส่งได้โดยง่าย บทความนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะของเครื่องย่อยขยะชีวมวลประเภทใบไม้และเปลือกต้นไม้ พร้อมทั้งผลทดสอบการใช้เครื่องย่อยขยะชีวมวลร่วมกับเครื่องควบคุมแรงดันที่ทำให้การทำงานได้เหมือนเดิมแต่ใช้พลังงานลดลง

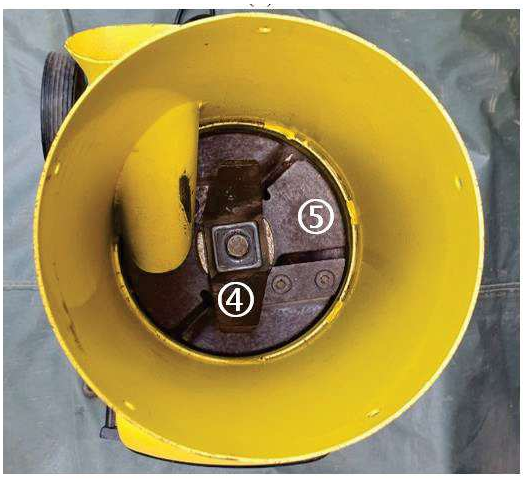
2. วิธีการและผลการวิจัย

2.1 เครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็ก

เครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็กสำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ① ส่วนรับขยะชีวมวล ②ห้องใบมีด③มอเตอร์ขับเคลื่อนชนิดไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว ④ใบมีดชุดที่ 1 ⑤ใบมีดชุดที่ 2 บนฐานรองใบมีด⑥แหล่งจ่ายไฟ⑦อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมระดับแรงดัน ⑧ขยะชีวมวลและ⑨ภาชนะบรรจุขยะชีวมวลปริมาตร 50 ลิตร ใบมีดชุดที่ 1จะเหมาะสำหรับขยะชีวมวลประเภทใบไม้แห้งหรือเปลือกลำต้นแห้งที่ป้อนมาจากทางด้านบน ส่วนใบมีดชุดที่ 2 ที่ติดตั้งบนฐานรองใบมีดจะเหมาะกับขยะชีวมวลประเภทกิ่งไม้ที่มีลักษณะค่อนข้างยาวโดยจะป้อนเข้าเครื่องย่อยจากช่องด้านข้าง



(ก)



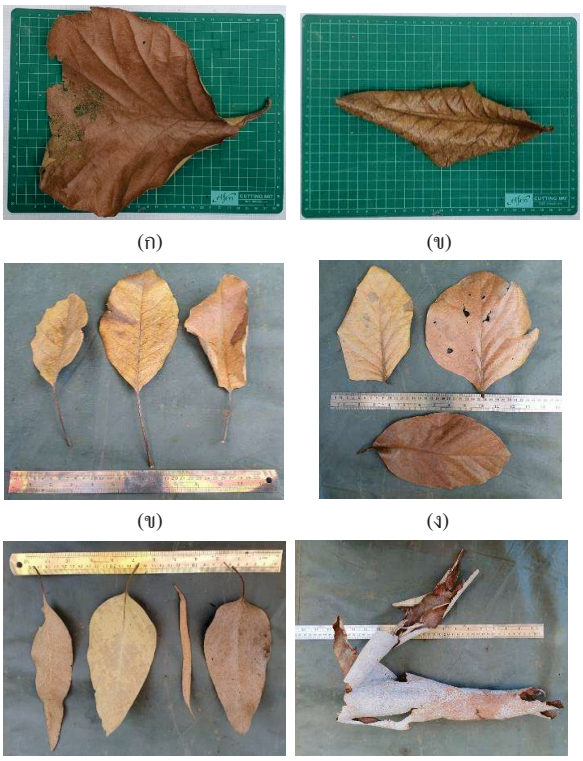
(ข)

รูปที่ 2 เครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็ก (ก) องค์ประกอบสำคัญสำหรับการทดสอบ และ (ข) ใบมีดและฐานรองใบมีด

2.2 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

2.2.1 วิธีการทดสอบ

แนวทางการทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การหาคุณสมบัติการลดปริมาตรของขยะชีวมวลด้วยเครื่องย่อย และส่วนที่ 2 การทดสอบแนวทางการใช้งานเครื่องย่อยแบบประหยัดพลังงาน การทดลองที่ 1 ขยะชีวมวลทั้ง 6 ชนิด ได้แก่ประเภทใบแห้ง 5 ชนิด และเปลือกต้นไม้ 1 ชนิด ดังรูปที่ 3 ผลการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการลดปริมาตรของเครื่องย่อยขยะชีวมวล สำหรับใบไม้ 5 ชนิด และเปลือกลำต้น 1 ชนิด แสดงดังตารางที่ 1 โดยทุกการทดลองจะมีปริมาตรเริ่มต้นเหมือนกันคือ 50 ลิตร ส่วนปริมาตรสุดท้ายจะต่างกันโดยพิจารณาจากความสูง แล้วคำนวณร้อยละการปริมาตรจากสมการที่ (3) พบว่าเปลือกต้นยูคาลิปตัสให้ค่าร้อยละการลดปริมาตรมากที่สุดคือ 85.14 ส่วนกลุ่มใบไม้แห้งที่ให้ร้อยละการลดปริมาตรที่สูงได้แก่ ใบสักและใบหูกวาง คือ 83.78 และ 82.44 ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ร้อยละการลดปริมาตรของขยะชีวมวลเหล่านี้สูง ส่วนหนึ่งเกิดจากลักษณะทางกายภาพตอนเริ่มต้นของเปลือกลำต้นแต่ชิ้นและใบไม้แต่ละใบใหญ่แต่เปราะ ดังรูปที่ 5(ก) แสดงตัวอย่างใบหูกวางก่อนการย่อย และ เมื่อผ่านเครื่องย่อยจะมีลักษณะดังรูปที่ 5(ข)



(ก) (ข) (ข) (ง) (จ) (ฉ)

รูปที่ 3 ขยะชีวมวลที่ใช้ทดสอบ (ก) ใบสัก (ข) ใบหูกวาง (ค) พะยอม (ง) ใบพลวง (จ) ใบยูคาลิปตัส และ (ฉ) เปลือกต้นยูคาลิปตัส

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติการลดปริมาตร (ปริมาตรเริ่มต้น 50 ลิตร)

ประเภทขยะชีวมวล	ปริมาตรสุดท้าย (ลิตร)	ร้อยละการลดปริมาตร
ใบสัก	8.11	83.78
ใบหูกวาง	8.78	82.44
ใบพะยอม	21.62	56.76
ใบพลวง	16.21	67.58
ใบยูคาลิปตัส	23.65	52.70
เปลือกต้นยูคาลิปตัส	7.43	**85.14**

2.2.2 การหาร้อยละการลดปริมาตร

ดัชนีชี้วัดสมรรถนะเครื่องย่อยขยะชีวมวลสำหรับการศึกษาครั้งนี้คือร้อยละการลดปริมาตรของขยะชีวมวลโดยจำเป็นต้องอาศัยภาชนะพลาสติกทรงกระบอกกลมขนาด 50 ลิตร สูง 37 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 โดยช่วงเริ่มต้นทดลองจะบรรจุขยะชีวมวลไว้เต็มภาชนะดังหมายเลข ① ของรูปที่ 2(ก) เมื่อเสร็จสิ้นการย่อยจะใช้ภาชนะเดิมบรรจุขยะชีวมวลที่ผ่านการย่อยแล้วเพื่อวัดปริมาตรที่ได้เปรียบเทียบก่อนและหลังการย่อยส่วนการคำนวณร้อยละการลดปริมาตรจะเป็นดังสมการที่ (1)-(3)

$$V_r = (V_b - V_a) \times 100 / V_b \quad (1)$$

$$V_r = (\pi r^2 H_b - \pi r^2 H_a) \times 100 / \pi r^2 H_b \quad (2)$$

$$V_r = (H_b - H_a) \times 100 / H_b \quad (3)$$

เมื่อ Vr คือ ร้อยละการลดลงของปริมาตรหลังการย่อย Vb คือ ปริมาตรก่อนการย่อย Va คือ ปริมาตรหลังการย่อย r คือ รัศมีของภาชนะทรงกระบอกกลม Hb คือ ความสูงของภาชนะทรงกระบอกกลม Ha คือ ความสูงของขยะชีวมวลหลังการย่อย



รูปที่ 4 ภาชนะบรรจุขยะชีวมวลปริมาตร 50 ลิตร สูง 37 เซนติเมตร

2.2.3 ผลของระดับแรงดันไฟฟ้าต่อการทำงานของเครื่องย่อยฯ

การศึกษาผลของระดับแรงดันไฟฟ้าต่อการทำงานของเครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็กต้องอาศัยตัวปรับระดับแรงดันอิเล็กทรอนิกส์ ดังหมายเลข ⑦ ของรูปที่ 2 (ก) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าการลดระดับแรงดันสามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าที่เครื่องย่อยใช้ได้โดยที่ความเร็วรอบไม่เปลี่ยนแปลง (pf คือ ตัวประกอบกำลัง)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ตัวอย่างใบหูกวาง (ก) ก่อนการย่อย และ (ข) หลังการย่อย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ

แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	pf	กำลังไฟฟ้า (W)	ความเร็วรอบ (RPM)
220	4.20	0.200	185	2,992
200	3.38	0.210	148	2,991
180	2.90	0.224	118	2,992
160	2.45	0.248	98	2,991
140	2.09	0.283	83	2,990
120	1.77	0.336	71	2,990
100	7.43	0.412	62	2,990

3. สรุป

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบสมรรถนะเครื่องย่อยขยะชีวมวลขนาดเล็กสำหรับสถานศึกษาผลการศึกษาพบว่าขยะชีวมวลประเภทเปลือกต้นยูคาลิปตัสสามารถถูกย่อยให้มีปริมาตรลดลงได้กว่าร้อยละ 85 ส่วนประเภทใบไม้ พบว่าใบไม้สักถูกย่อยให้ปริมาตรลดลงได้กว่าร้อยละ 83 นอกจากนี้การปรับระดับแรงดันให้กับเครื่องย่อยยังสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้อีกด้วย งานวิจัยต่อไปคือการขยายพิกัดให้มากขึ้นโดยที่ยังคงคุณลักษณะเด่นของเครื่องย่อยขยะชีวมวลนี้ได้อยู่

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) สำหรับทุนวิจัย (เลขที่สัญญา FF2567P001)

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Lin, T, Qian, “Earth’s climate history from 4.5 billion year to one minute”, in Atmosphere-Ocean, vol. 60, No.3-4, pp.188-232, 2022, doi.org/10.1080/07055900.2022.2082914.

[2] S.L. Lewis, M.A. Maslin, “Defining the Anthropocene”, Youplao, in Nature, vol. 519, pp. 171-180, 22 March 2015, doi: 10.1038/nature14258.

[3] M. Asif, N. Amin, M.S. Shabbir, H. Song, "Balancing growth and sustainability: COP28 policy implications of green energy, industrialization, foreign direct investment, and globalization in South Asia," in Journal of Environmental Management, vol. 369 (2024), 4 Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122290.

[4] K. Wang, Tester, “Sustainable of unavoidable biomass waste”, in Green Energy and Resource, vol. 1(2023), 7 Feb. 2023

[5] N.M. Clauser, G. Gonzalez, C. M. Mendieta, J. Kruyeniski, M.C. Area, M.E. Valleios, “Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels”, in Sustainability, vol.13, no.2, doi: 10.3390/su13020794.

[6] A.M. Omer, “Biomass energy resources utilization and waste management”, in Agricultural Science, vol.3, no.1, pp.124-145, 2012, doi:10.4236/as.2012.31016.

[7] U.L. Ganesh, V.V. Rampur, A.R. Banagar, “Design and fabrication of organic portable shredder machine”, in International of Engineering Research & Technology, vol.6, no.8, pp.358-361, 8 Aug. 2017, doi:10.17577/IJERTV6IS080181.

[8] C.S. Omkumar and K. MuthuKumar, “Experimental study on waste shredder”, in Journal of Advancement in Machine, vol.4, no.2, pp.1-19, 2016, doi:10.5281/zenodo.3233316.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เครื่องลดความชื้นขดลวดมอเตอร์

MOTOR WINDING DEHUMIDIFIER

ชูศักยฐ์ กมลขันติธร* กิตติพงษ์ อนันเอื้อ และ อธิษฐ์ บุตรโดย
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
E-mail: choosak.k@mail.rmutk.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องลดความชื้นในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส ขนาด 1–420 กิโลวัตต์ ซึ่งใช้งานในโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี โดยใช้ขดลวดความร้อนแบบครีบจำนวน 6 ชุด (ขนาด 3,000 วัตต์ต่อชุด) ควบคุมการทำงานด้วยตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบ RTD ร่วมกับระบบควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และระบบพัดลมหมุนเวียนอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน การทดสอบเชิงประสิทธิภาพพบว่า เครื่องต้นแบบสามารถลดระยะเวลาในการลดความชื้นได้สูงถึง 94.79% และช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ถึง 74.7% เมื่อเทียบกับวิธีการแบบเดิมที่ใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงการฟื้นฟูค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตามข้อกำหนด IEEE Standard 43-2000 และ IEEE Standard 1415-2006 ซึ่งบ่งชี้ว่าเครื่องลดความชื้นที่พัฒนาขึ้นสามารถยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์และเพิ่มความเชื่อมั่นในการบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การลดความชื้น, ขดลวดมอเตอร์, มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส, เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล, ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบ RTD, ขดลวดความร้อนแบบครีบ, การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

Abstract

This research presents the design and development of a dehumidification system for stator windings of three-phase induction motors ranging from 1 to 420 kW, applied at the Chong Nonsi Water Quality Control Plant. The system employs six 3,000 W finned heating elements, regulated by resistance temperature detectors (RTDs) and a digital temperature controller, coupled with an air circulation fan to enhance heat dissipation. Experimental results demonstrated that the proposed prototype significantly reduced dehumidification time by 94.79% and maintenance costs by 74.7% compared to the conventional metal halide lamp method. Furthermore, the system effectively restored the insulation resistance values of the windings to comply with IEEE Standard 43-2000 and IEEE Standard 1415-2006, indicating its potential to prolong motor lifespan and support predictive maintenance strategies with high reliability.

Keywords: dehumidification, motor winding, three-phase induction motor, digital temperature controller, RTD sensors, finned heater, predictive maintenance

1. บทนำ

ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของกรุงเทพมหานคร โดยเฉพาะในโรงควบคุมคุณภาพน้ำช่องนนทรี มีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเพื่อขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำแบบจุ่มในระบบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมักประสบปัญหาความชื้นสะสมในขดลวดสเตเตอร์ ส่งผลให้ฉนวนไฟฟ้าเสื่อมสภาพ เกิดไฟฟ้าลัดวงจร และต้องหยุดระบบเพื่อซ่อมบำรุง ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเฉลี่ยมากกว่า 3.4 ล้านบาทต่อปี โดยวิธีการลดความชื้นเดิมคือการใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ ใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองพลังงาน จากปัญหาดังกล่าว ได้มีการศึกษาแนวทางการพัฒนาเครื่องลดความชื้นในขดลวดมอเตอร์ โดยอ้างอิงจากหลักการถ่ายเทความร้อนด้วยขดลวดความร้อนแบบครีบ (Finned Heater) ร่วมกับการควบคุมแบบดิจิทัล ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงในอุตสาหกรรมระบบ HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) [1] โดยเฉพาะเมื่อทำงานร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิชนิด RTD และระบบพัดลมหมุนเวียนอากาศเพื่อเร่งกระบวนการระเหยความชื้นออกจากฉนวน งานวิจัยของ Chua และคณะ [2] ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้เทคโนโลยีดูดความชื้นแบบทึบ (Solid Desiccant Dehumidification) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการความชื้นในสภาวะชื้นสูงได้อย่างมีประสิทธิผล โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงเช่นในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางที่บทความฉบับนี้พัฒนาขึ้น

นอกจากนี้ มาตรฐาน IEEE 1415-2006 และ IEEE 43-2000 [3], [4] ยังให้แนวทางที่ชัดเจนเกี่ยวกับการประเมินค่าความต้านทานขดลวดและความต้านทานฉนวน เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของการเสื่อมสภาพ และใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Predictive Maintenance) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการทดสอบเครื่องต้นแบบในงานวิจัยนี้ จากข้อมูลที่กล่าวมา งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและทดสอบเครื่องลดความชื้นในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยเน้นการพัฒนาให้สามารถลดระยะเวลาในการลดความชื้น ประหยัดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ตลอดจนสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

2. ทฤษฎี

2.1 หลักการถ่ายเทความร้อนในการลดความชื้น

การลดความชื้นในขดลวดมอเตอร์ด้วยวิธีการให้ความร้อนมีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้อง 3 กลไกหลัก ได้แก่

1) การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านสื่อที่เป็นของแข็ง เช่น ขดลวดความร้อนถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศรอบข้าง

2) การพาความร้อน (Convection) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านขดลวดที่ได้รับความร้อน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่อง

3) การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นการแผ่พลังงานความร้อนออกจากผิวของขดลวดโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

การใช้ขดลวดความร้อนแบบครีบสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ ส่งผลให้การพาความร้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสามารถกระจายความร้อนได้อย่างทั่วถึงในบริเวณที่มีขดลวดมอเตอร์อยู่ [1] ทั้งนี้ การรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (ประมาณ 70–120 °C) จะส่งผลให้ความชื้นระเหยออกจากฉนวนโดยไม่ทำให้ฉนวนเสียหาย [2]

2.2 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิแบบ RTD (Resistance Temperature Detector)

เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงานตามหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะที่สัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ [5] ตัวอย่างที่ใช้แพร่หลายคือ Pt100 ซึ่งมีค่าความต้านทาน 100 โอห์มที่อุณหภูมิ 0°C และเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยค่าความต้านทานจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการ

$$Rt = R_{\circ}\,(1 + \alpha t) \qquad (1)$$

โดยที่ Rt คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ t องศาเซลเซียส
$R_{\circ}$ คือ ค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ 0°C และ
α คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทาน

การเลือกใช้ RTD ในระบบควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลในงานวิจัยนี้ มีข้อดีคือ ความแม่นยำสูง การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรวดเร็ว และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยมีความเสถียรในการวัดสูงกว่าการใช้เทอร์มิสเตอร์หรือเทอร์โมคัปเปิลในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงบ่อย [2]

2.3 การทดสอบค่าความต้านทานฉนวนและดรรชนีความต้านทานฉนวน

การทดสอบค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดในมอเตอร์เป็นวิธีพื้นฐานในการประเมินความสมบูรณ์ของฉนวน โดยอ้างอิงจาก IEEE Standard 43-2000 ซึ่งแนะนำให้ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 500–10,000 โวลต์ ขึ้นกับขนาดของมอเตอร์ การวัดทำในอุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 1 นาที [4] ค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน (Polarization Index: PI) คำนวณจากอัตราส่วนของค่าความต้านทานที่วัดได้ใน 10 นาที ต่อค่าที่วัดได้ใน 1 นาที

$$2+L\ 4_{54}\quad \text{£}4_{5\ kg\ l} \qquad (2)$$

โดยทั่วไป ค่า 2ที่มากกว่า 2.0 แสดงถึงฉนวนที่อยู่ในสภาพดี หากต่ำกว่า 1.0 บ่งชี้ว่าฉนวนเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง [3]

ในงานวิจัยนี้ มีการนำแนวทางนี้มาใช้วัดค่าความต้านทานฉนวนก่อนและหลังการลดความชื้น ซึ่งส่งผลให้สามารถประเมินผลของกระบวนการลดความชื้นได้อย่างชัดเจน และช่วยยืนยันความปลอดภัยของการนำมอเตอร์กลับมาใช้งานใหม่

2.4 การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ตามมาตรฐาน IEEE 1415-2006

มาตรฐาน IEEE Std 1415-2006 [3] ให้คำแนะนำในการตรวจสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำชิงโครนัสแบบกรงกระรอก ทั้งในด้าน การวัดความต้านทานขดลวด, การตรวจสอบความไม่สมดุลของเฟส, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, และการวัดอุณหภูมิของขดลวด เพื่อนำมาวิเคราะห์ความเสี่ยงในการเกิดความล้มเหลวของมอเตอร์ โดยเฉพาะหัวข้อ 4.3.40 แนะนำให้วัดค่าความต้านทานขดลวดในอุณหภูมิเดียวกันเพื่อป้องกันค่าคลาดเคลื่อน และค่าความต้านทานของแต่ละเฟสควรอยู่ภายใน ±3–5% จากค่าเฉลี่ย หากค่าความต้านทานของเฟสใดเบี่ยงเบนเกินกว่าค่าที่กำหนด อาจบ่งชี้ถึงปัญหาการเปิดวงจรหรือลัดวงจรภายในขดลวด ซึ่งจำเป็นต้องดำเนินการตรวจสอบเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้แนวทางดังกล่าวในการประเมินความเสื่อมของมอเตอร์ทั้งก่อนและหลังการอบลดความชื้น ทำให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์อย่างเป็นระบบและเชื่อถือได้

3. ผลการทดสอบ

3.1 การลดความชื้นขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พิกัด 12.5 กิโลวัตต์ แรงดัน 660/380 โวลต์ ตามมาตรฐานการทดสอบบำรุงรักษาและการวิเคราะห์ความล้มเหลวของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ IEEE Standard 1415-2006 และ มาตรฐานการทดสอบความต้านทานฉนวนของเครื่องจักรกลชนิดหมุน IEEE Standard 43-2000

(1) การวัดค่าความต้านทานขดลวดก่อนการลดความชื้น

ตารางที่ 1.1 ค่าความต้านทานขดลวดก่อนการลดความชื้น

ชุดขดลวด	ค่าที่วัดได้ (โอห์ม)
U1-U2	0.31
V1-V2	0.30
W1-W2	0.32

(2) การวัดค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดก่อนการลดความชื้น

ตารางที่ 1.2 ค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดก่อนลดความชื้น

ชุดขดลวด	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	ค่าความต้านทานฉนวนขั้นต่ำที่แนะนำ (เมกะโอห์ม)	ค่าที่วัดได้ (เมกะโอห์ม)
U-G	500	100	-
V-G	↓	↓	-
W-G			-
U-V			-
V-W			-
W-U			-

(3) การวัดค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดหลังการลดความชื้นด้วยวิธีการทดสอบหาค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน

ตารางที่ 1.3 ค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน

ชุดขดลวด	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	ค่าที่วัดได้ใน 1 นาที (เมกะโอห์ม)	ค่าที่วัดได้ใน 10 นาที (เมกะโอห์ม)	ค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน
U-G	500	100	384	3.84
V-G	↓	108	434	4.02
W-G		109	425	3.90

3.2 การลดความชื้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พิกัด 420 กิโลวัตต์ แรงดัน 660/380 โวลต์ ตามมาตรฐานการทดสอบบำรุงรักษาและการวิเคราะห์ความล้มเหลวของเครื่องจักรกลเหนี่ยวนำ IEEE Standard 1415-2006 และ มาตรฐานการทดสอบความต้านทานฉนวนของเครื่องจักรกลชนิดหมุน IEEE Standard 43-2000

(1) การวัดค่าความต้านทานขดลวดก่อนการลดความชื้น

ตารางที่ 1.4 ค่าความต้านทานขดลวดก่อนลดความชื้น

ชุดขดลวด	ค่าที่วัดได้ (โอห์ม)
U1-U2	0.23
V1-V2	0.24
W1-W2	0.24

(2) การวัดค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดก่อนการลดความชื้น

ตารางที่ 1.5 ค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดก่อนลดความชื้น

ชุดขดลวด	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	ค่าความต้านทานฉนวนขั้นต่ำที่แนะนำ (เมกะโอห์ม)	ค่าที่วัดได้ (เมกะโอห์ม)
U-G	500	100	-
V-G	↓	↓	-
W-G			-
U-V			-
V-W			-
W-U			-

(3) การวัดค่าความต้านทานฉนวนของขดลวดหลังการลดความชื้นด้วยวิธีการทดสอบหาค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน

ตารางที่ 1.6 ค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน

ชุดขดลวด	แรงดันทดสอบ (โวลต์)	ค่าที่วัดได้ใน 1 นาที (เมกะโอห์ม)	ค่าที่วัดได้ใน 10 นาที (เมกะโอห์ม)	ค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน
U-G	500	111	414	3.73
V-G	↓	105	453	4.31
W-G		106	537	5.07

3.3 การเปรียบเทียบการลดความชื้นขดลวดระหว่างการใช้หลอดเมทัลฮาไลด์กับเครื่องลดความชื้นขดลวดมอเตอร์

ตารางที่ 1.7 ผลการเปรียบเทียบการลดความชื้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พิกัด 12.5 กิโลวัตต์ แรงดัน 660/380 โวลต์

วิธีการลดความชื้น	การใช้พลังงาน (กิโลวัตต์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้า (บาท)	อัตราการประหยัดค่าใช้จ่าย (เปอร์เซ็นต์)
หลอดเมทัลฮาไลด์	2	96	768	-
เครื่องลดความชื้นฯ	9.7	5	194	74.7

ตารางที่ 1.8 ผลการเปรียบเทียบการลดความชื้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พิกัด 420 กิโลวัตต์ แรงดัน 660/380 โวลต์

วิธีการลดความชื้น	การใช้พลังงาน (กิโลวัตต์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้า (บาท)	อัตราการประหยัดค่าใช้จ่าย (เปอร์เซ็นต์)
หลอดเมทัลฮาไลด์	2	96	768	-
เครื่องลดความชื้นฯ	9.7	5	194	74.7

4. สรุปผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบสำหรับลดความชื้นในขดลวดมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พบว่า เครื่องต้นแบบสามารถฟื้นฟูคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขดลวดได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐานทั้งด้านค่าความต้านทานของขดลวด และค่าความต้านทานฉนวน การทดลองกับมอเตอร์ขนาด 12.5 กิโลวัตต์ และ 420 กิโลวัตต์ ก่อนดำเนินการลดความชื้นพบว่า ไม่สามารถวัดค่าความต้านทานฉนวนได้ในทุกเฟส ซึ่งบ่งชี้ถึงการสะสมของความชื้นในระดับรุนแรงที่เป็นอันตรายต่อการใช้งาน จากนั้นเมื่อดำเนินการลดความชื้นด้วยเครื่องต้นแบบ พบว่าค่าความต้านทานฉนวนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 414 ถึง 537 เมกะโอห์ม และค่าดรรชนีความต้านทานฉนวน (Polarization Index: PI) อยู่ในช่วง 3.73 ถึง 5.07 ซึ่งจัดอยู่ในเกณฑ์ดีมากตามมาตรฐาน IEEE Std 43-2000 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของเครื่องต้นแบบในการฟื้นฟูคุณสมบัติของฉนวนได้อย่างน่าเชื่อถือ

ค่าความต้านทานขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ทั้งสองขนาดยังแสดงความสมดุลที่ดี โดยมีค่าความเบี่ยงเบนไม่เกิน ±3.2% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับตามมาตรฐาน IEEE Std 1415-2006 สะท้อนให้เห็นว่าขดลวดไม่มีความเสียหายเชิงโครงสร้างเพิ่มเติมจากความชื้น อีกทั้งการใช้เครื่องลดความชื้นต้นแบบยังแสดงศักยภาพด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมอย่างชัดเจน กล่าวคือ เครื่องต้นแบบแม้จะใช้กำลังไฟฟ้าสูงกว่าวิธีการเดิมที่ใช้หลอดเมทัลฮาไลด์ แต่สามารถลดระยะเวลาในการลดความชื้นจาก 96 ชั่วโมง เหลือเพียง 5 ชั่วโมง ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าลดลงจาก 768 บาท เหลือเพียง 194 บาท คิดเป็นอัตราการประหยัดถึง 74.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นความสำเร็จเชิงประสิทธิภาพและการประยุกต์ใช้งานได้จริงในบริบทของโรงงานและสถานประกอบการที่ต้องการลด Downtime และต้นทุนการบำรุงรักษา

เอกสารอ้างอิง

[1] Herbert, M.B. 1998. "The HVAC Design Factor." In HVAC Maintenance and Operations Handbook. pp. 11–13. Robert C. Rosaler, ed. New York : McGraw–Hill.

[2] Prabakaran, Vivekh., and Chua, K. J. 2021. Progressive Development of Solid Desiccant Dehumidification Technology. Cham : Springer.

[3] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2006. Winding Resistance. New York : McGraw-Hill.

[4] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000. Recommended Minimum Value of Polarization Index and Insulation Resistance. New York : McGraw-Hill.

[5] Bentley, John P. 2005. *Principles of Measurement Systems*. 4th ed. Harlow : Pearson Education.

[6] Hand, Augie. 2011. **Test Instrument and Services**. 2nd ed. New nork : McGraw-Hill.

[7] Prabakaran, Vivekh., and Chua, K. J. 2021. **Progressive Development of Solid Desiccant Dehumidification Technology**. Cham : Springer.

[8] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2006. **Winding resistance**. New York : McGraw-Hill.

[9] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2000. **Recommended minimum value of polarization index and insulation resistance**. New York : McGraw-Hill.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักยฐ์ กมลขันติธร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



กิตติพงษ์ อนันเอื้อ ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ



อธิษฐ์ บุตรโดย ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนาระบบควบคุมเครื่องซีลปลายหลอด

Development of a control system for tube end sealing machine

สายัณห์ ฉายวาส* ทัศพล ชมภูอาจ วจี พาที และ ผดุงรัตน์ ปรองพิมาย
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
E-mail: sayan.cha@cdti.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับพัฒนาระบบควบคุมเครื่องซีลปลายหลอดสำหรับผลิตหลอดลามิเนต โดยเปลี่ยนระบบควบคุมจากตัวเก่าเป็น PLC FX5U-32MT เป็นตัวควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยการเขียนและออกแบบโปรแกรมใหม่ทั้งหมด เพิ่มฟังก์ชันการควบคุมเครื่องและใช้จอ HMI สำหรับควบคุมและแสดงผลต่างๆ ของเครื่อง เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น จากผลการทดสอบการใช้งานเครื่องซีลปลายหลอดที่ได้พัฒนาระบบควบคุมแล้ว ฟังก์ชันการทำงานที่เพิ่มเข้ามาช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้งานได้สะดวกกว่าระบบควบคุมแบบเก่า เนื่องจากสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ละเอียดกว่าแบบเก่า มีฟังก์ชันที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตั้งเครื่องได้ง่ายกว่า มีการแสดงผลค่าพารามิเตอร์และการสั่งงานผ่านจอ HMI พร้อมทั้งปรับเงื่อนไขการทำงานของเครื่องได้ อีกทั้งมีข้อความแสดงการแจ้งเตือน เวลาเครื่องมีปัญหา ช่างหรือวิศวกรสามารถวิเคราะห์ปัญหาได้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาในการซ่อมได้

คำสำคัญ: เครื่องซีลปลายหลอด, พัฒนาระบบควบคุม, PLC

Abstract

This article presents the development of a control system for a tube end-sealing machine used in the production of laminated tubes. The existing control system was replaced with an FX5U-32MT PLC, which now manages the operation of all components. A new program was completely designed and written to include enhanced control functions, and an HMI was integrated to facilitate machine control and display various operational parameters, improving overall user convenience.

The results from testing the upgraded tube end-sealing machine show that the newly added functions significantly improve usability compared to the previous control system. Operators can now adjust parameters with greater precision, simplifying the machine setup process. The HMI interface enables both parameter display and control commands, while also allowing adjustments to the machine's operating conditions. Additionally, the system includes alert messages when issues occur, allowing technicians or engineers to diagnose problems more quickly and thereby reduce repair time.

Keywords: Tube end sealing machine , Development control system , PLC

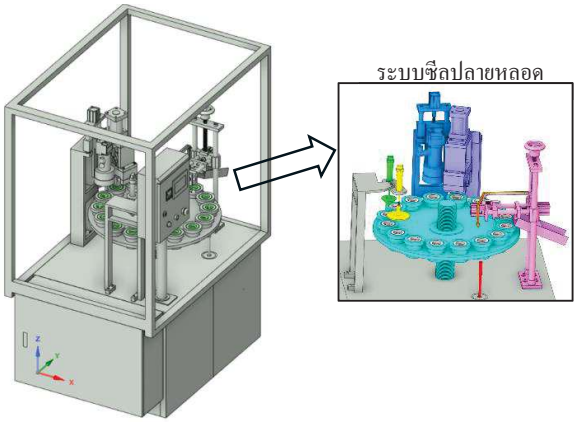
1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะสายการผลิตหลอดลามิเนต (laminated tube) สำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ประเภทครีม ยา หรือเครื่องสำอาง เครื่องซีลปลายหลอดเป็นเครื่องจักรสำคัญที่ทำหน้าที่ปิดผนึกปลายหลอดด้วยความร้อนและแรงกด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง ทนทานต่อการรั่วซึม และดูสวยงามเหมาะสมกับการจัดจำหน่าย โดยทั่วไปเครื่องจักรเหล่านี้มักทำงานร่วมกับสายพานลำเลียงและระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ทันกับความต้องการในตลาด อย่างไรก็ตาม เครื่องซีลปลายหลอดที่ใช้งานอยู่ในโรงงานหลายแห่งยังคงเป็นเครื่องรุ่นเก่าที่ใช้งานมานานนับสิบปี ส่งผลให้ชิ้นส่วนทางกลและระบบควบคุมภายในเริ่มเสื่อมสภาพ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการบำรุงรักษา การหาอะไหล่ทดแทน รวมถึงประสิทธิภาพในการควบคุมที่ไม่สอดคล้องกับความต้องการในปัจจุบัน เช่น การตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ยุ่งยาก ไม่มีการแสดงผลสถานะเครื่องแบบเรียลไทม์ และขาดระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดปัญหา

เพื่อยกระดับประสิทธิภาพของระบบควบคุม จึงได้มีการปรับปรุงโดยเปลี่ยนจากระบบเดิม มาใช้ PLC รุ่นใหม่ที่มีความสามารถในการประมวลผลสูง รองรับการทำงานที่ซับซ้อน และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้อย่างยืดหยุ่น ระบบใหม่นี้ได้รับการพัฒนาโดยออกแบบโปรแกรมควบคุมใหม่ทั้งหมด พร้อมทั้งเพิ่มฟังก์ชันการตั้งค่าที่ละเอียดขึ้น ติดตั้งหน้าจอ HMI สำหรับสั่งงานและแสดงผลข้อมูล ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้งานเครื่องได้อย่างสะดวกและปลอดภัยยิ่งขึ้น

2. การออกแบบ

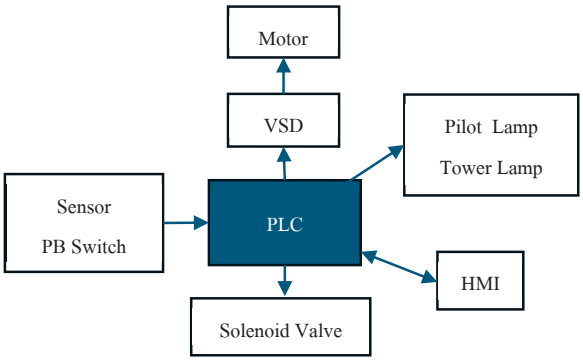
เนื่องจากในงานนี้เป็นการปรับปรุงเครื่องซีลปลายหลอดเดิมที่มีอุปกรณ์บางตัวชำรุดและทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ให้ดีขึ้นละใช้งานง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นในส่วนของตัวเครื่องหลักจึงไม่ได้สร้างขึ้นใหม่ยังคงใช้เครื่องเดิม แต่จะทำการซ่อมแซม ปรับปรุงอุปกรณ์ที่ชำรุดเสียหายให้ใช้งานได้ปกติ และไปมุ่งเน้นพัฒนาวงจรไฟฟ้ารวมทั้งโปรแกรมสำหรับควบคุมเป็นหลัก ภาพรวมของเครื่องซีลปลายหลอดแสดงดังรูปที่ 1 โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ชุดซีลปลายหลอด และตู้ควบคุม การทำงานของชุดซีลปลายหลอด จะประกอบด้วย บล็อกใส่หลอด มีหน้าที่ล็อกหลอดให้อยู่ในเบ้า ถาดหมุน มีหน้าที่รองรับบล็อกใส่หลอดและหมุนตามจังหวะเครื่องในทิศตามเข็มนาฬิกาเพื่อส่งหลอดไปตามชุดต่างๆ ตามลำดับจนได้ชิ้นงานออกมา ชุดกดหลอดหน้าที่กดหลอดที่อยู่ในบล็อกให้แน่น ชุดเป่าลมร้อนมีหน้าที่เป่าลมร้อนไปยังส่วนปลายของหลอดเพื่อให้หลอดอ่อนตัวเพื่อทำการซีล โดยอุณหภูมิจะอยู่ที่ 300-450 องศาเซลเซียส ชุดซีลปลายหลอดมีหน้าที่ในการซีลปลายหลอดที่ผ่านการเป่าลมร้อนมาแล้ว ชุดตัดปลายหลอดมีหน้าตัดปลายหลอดส่วนเกินออกหลังจากผ่านกระบวนการซีลแล้ว เป็นกระบวนการสุดท้ายของการซีลปลายหลอด ชุดกระทุ้งหลอดมีหน้าที่กระทุ้งหลอดออกจากบล็อกเป็นกระบวนการนำหลอดที่ผ่านกระบวนการซีลปลายเสร็จแล้วเรียบร้อยแล้วออกจากเครื่อง ชุดเป่าหลอดจะทำการเป่าหลอดให้ตกไปยังสายพาน เพื่อนำหลอดที่ผ่านกระบวนการซีลเสร็จสมบูรณ์แล้วไปเข้าสู่กระบวนการตรวจสอบคุณภาพต่อไป



รูปที่ 1 เครื่องซีลปลายหลอด

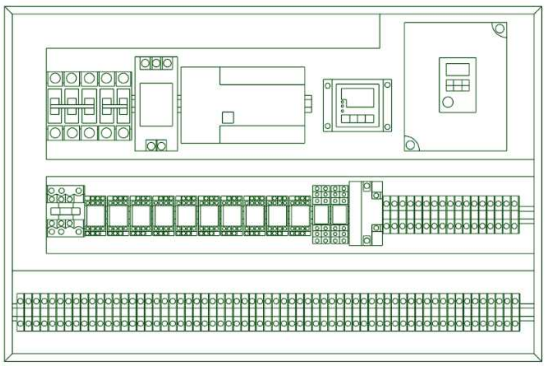
2.1 การออกแบบวงจรควบคุม

กระบวนการออกแบบระบบควบคุมเครื่องซีลปลายหลอดจะยังการอ้างอิง ขั้นตอนการทำงานของเครื่องเดิม และปรับปรุงการทำงานบางส่วนให้เหมาะสม และใช้งานสะดวกมากขึ้น โดยรูปที่ 2 แสดงวงจรรวมของระบบควบคุมโดยใช้ PLC เป็นตัวควบคุม

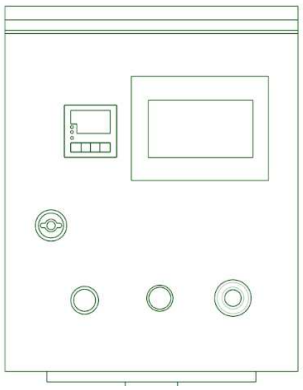


รูปที่ 2 ไดอะแกรมรวมของวงจรควบคุมเครื่องซีลหลอด

รูปที่ 3 แสดงแบบการจัดวางอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมที่พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งตู้ควบคุมเดิมอุปกรณ์ชำรุดเสียหายบางส่วนและการเดินสายสัญญาณต่าง ๆ ไม่เป็นระเบียบทำให้ยากต่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษา ตู้ควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วนแยกกันคือ (1) ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าแสดงดังรูป 3 (ก) อุปกรณ์ภายในประกอบด้วย Inverter สำหรับควบคุมมอเตอร์ ตัวควบคุมอุณหภูมิ Terminal แมกเนติก โซลิดสเตตรีเลย์ PLC เบรกเกอร์ Power supply รีเลย์ (2) ตู้ควบคุมจอแสดงผล HMI แสดงดังรูปที่ 3 (ข) เป็นส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับแสดงผล ควบคุมและสั่งการระบบทั้งหมดของเครื่องซีลปลายหลอด ประกอบด้วย จอแสดงผล HMI ตัวควบคุมอุณหภูมิ TTM-004 สวิตช์ Start สวิตช์ Stop และ สวิตช์หยุดฉุกเฉิน (Emergency Switch)



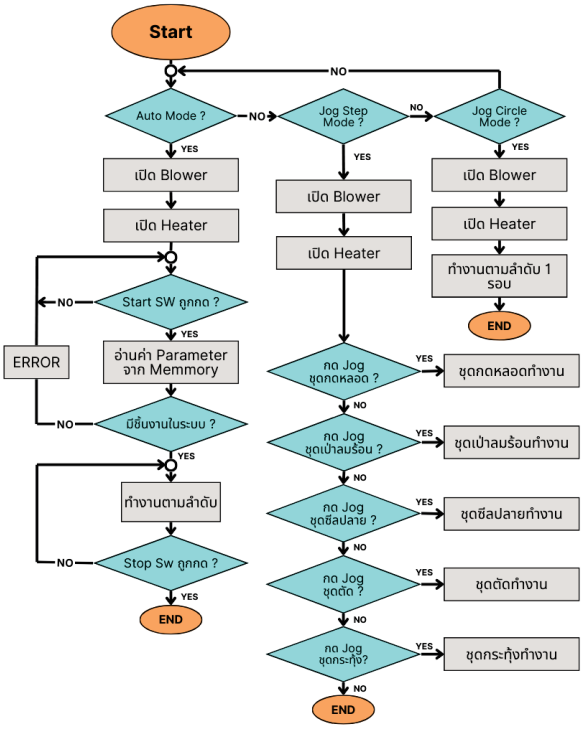
(ก)



(ข)

รูปที่ 3 แบบการวางอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุม (ก) การวางอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมระบบไฟฟ้า (ข) แบบการวางอุปกรณ์ในตู้ควบคุมจอแสดงผล HMI

2.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุม



รูปที่ 4 ผังการทำงานของโปรแกรมควบคุม

จากรูปที่ 4 โปรแกรมการทำงานเครื่องแบ่งเป็น 2 โหมด การทำงานโหมด Auto และการทำงานโหมด Jog

การทำงานในโหมด Auto โดยผู้ใช้งานจะต้องทำการกรอกค่า Parameter ต่าง ๆ และกรอกความเร็วของเครื่องผ่านจอ HMI แล้วกดปุ่ม Start เครื่องจะเริ่มทำงาน เมื่อทำใส่หลอดไปในถาดหมุน ถาดหมุนจะหมุนไปตามเข็มนาฬิกา เริ่มจากชุดกดหลอดต่อด้วยศูนย์ตรง จากนั้นหลอดจะถูกพาไปยังชุดเป่าลมร้อน และส่งไปยังชุดซีลปลาย หลอดที่ถูกซีลปลายจะไปยังชุดตัด หลอดที่ตัดปลายหลอดเรียบร้อยจะถูกกระทุ้งและเป่าลมออกจากบล็อกใส่หลอดให้หลอดหลุดออกไปยังสายพานการผลิตต่อไป

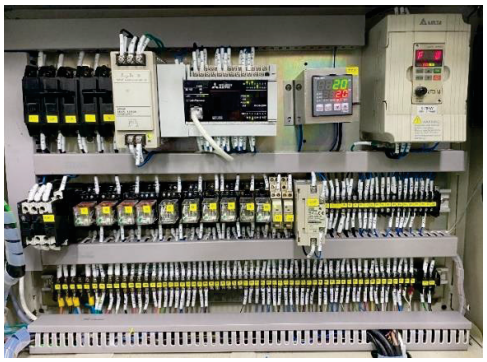
การทำงานในโหมด Jog จะทำงานได้ใน 2 แบบคือ การ Jog Step จะเป็นการสั่งงานในแต่ละขั้นตอนแยกอิสระจากกัน ซึ่งในโหมดนี้จะเอาไว้สำหรับการตั้งค่าต่างๆ ก่อนการรันงานจริง Jog Circle จะเป็นการสั่งให้เครื่องทำงานคล้ายโหมด Auto คือทำงานตั้งแต่กระบวนการแรกถึงกระบวนการสุดท้าย แต่จะทำงานแค่รอบเดียวแล้วหยุด

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ระบบควบคุม



(ก)



(ก)

รูปที่ 5 (ก) ตู้ควบคุมเก่าก่อนการปรับปรุง (ข) ตู้ควบคุมใหม่ที่พัฒนาแล้ว

รูปที่ 5 (ก) เป็นตู้ควบคุมเก่าที่ยังไม่มีการแก้ไขจะเห็นว่าการวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ และการเดินสายสัญญาณต่าง ๆ ไม่เป็นระเบียบ ทำให้ยากต่อการซ่อมแซม และบำรุงรักษา PLC ที่ใช้เป็นตัว

ควบคุมหลักเป็น PLC รุ่นเก่าที่มาพร้อมกับเครื่องจักร มีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี ดังนั้น ฟังก์ชั่นบางตัวไม่สามารถใช้งานได้แล้ว การแก้ไขโปรแกรมต่างๆ ทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากไม่สามารถต่อกับระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์รุ่นปัจจุบันได้จะต้องใช้กับคอมพิวเตอร์รุ่นเก่าจึงจะติดต่อได้ ดังนั้นในตู้ควบคุมที่พัฒนาขึ้นใหม่ดังรูป 5 (ข) จึงได้เปลี่ยนเป็น PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX5U-32M ซึ่งเป็น PLC ที่ได้รับความนิยมใช้งานแพร่หลายในประเทศไทย นอกจากนี้ยังได้ทำการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ และเดินสายไฟและสายควบคุมให้เป็นระเบียบเพื่อให้ง่ายต่อการซ่อมแซมและบำรุงรักษา



(ก) (ข)

รูปที่ 6 (ก) จอแสดงผลเก่าก่อนการพัฒนา (ข) จอแสดงผลใหม่ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 6 เป็นหน้าจอสำหรับควบคุมและแสดงผลค่าต่างๆ ของเครื่องโดยรูปที่ 6 (ก) เป็นจอแสดงผลรุ่นที่ติดมากับเครื่องซึ่งมีอายุการใช้งานมากแล้ว ส่วนรูปที่ 6 (ข) เป็นจอแสดงผลที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยใช้จอยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น GOT2000 หน้าจอที่ออกแบบนี้ สามารถช่วยให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้น มีส่วนแสดงสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องซีลปลายหลอด มีปุ่มเลือกเงื่อนไขในการทำงานต่างๆ ที่ช่วยให้การทำงานสะดวกมากขึ้น และสามารถปรับค่าของพารามิเตอร์ได้อย่างละเอียด

3.2 ผลการทดสอบเครื่อง

ผลการทดสอบเครื่องซีลปลายหลอดที่พัฒนาแล้วเป็นดังตารางที่ 1 ในจะทดสอบการทำงานเราทดสอบกับงานจริง โดยตั้งความเร็วในการทำงานอยู่ที่ 54 หลอด/นาที ตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมกับชิ้นงานในแต่ละรุ่น ชิ้นงานทดสอบมี 3 รุ่น คือ Product 1, 2, 3 ตามลำดับ การทดสอบ Product 1 จำนวน 10,000 ชิ้น พบว่ามีชิ้นงานเสียไม่ผ่าน QC จำนวน 362 ชิ้น คิดเป็นของดี 96.38 % Product 2 จำนวนทดสอบ 20,000 ชิ้น มีชิ้นงานไม่ผ่านการ QC จำนวน 700 ชิ้น คิดเป็นของดี 96.5 % และProduct 3 จำนวนทดสอบ 10,000 ชิ้นจำนวนชิ้นงานไม่ผ่าน QC จำนวน 156 ชิ้น คิดเป็นของดี 98.4 % ชิ้นงานที่ไม่ผ่าน QC เกิดจากกระบวนการซีลปลาย และกระบวนการตัด เนื่องจากเครื่องจักรมีอายุการใช้งานมานานหลายสิบปีจึงทำให้ระบบ Mechanics ไม่ดีเท่ากับเครื่องใหม่ ทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการผลิตขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบระบบ

	Product 1	Product 2	Product 3
ขนาดหลอด Ø x L	38 x 120 mm	38 x97 mm	28 x 100 mm
จำนวนทดสอบ	10,000	20,000	10,000
จำนวนหลอดเสีย	362	700	156
เปอร์เซนต์	96.38%	96.5%	98.4%

4. สรุป

จากการที่ได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องซีลปลายหลอด เพื่อพัฒนาระบบควบคุมเครื่องซีลปลายหลอดให้ดีขึ้น คณะผู้จัดทำได้ทำการเปลี่ยน PLC และจอ HMI ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้าและโปรแกรมการทำงานใหม่ทั้งหมด ผู้ใช้งานสามารถใช้งานเครื่องที่พัฒนาแล้วได้ปกติ สามารถสั่งการและควบคุมชุดการทำงานแต่ละชุดแยกกันได้ พร้อมทั้งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ตามความเหมาะสมกับงานนั้นๆ ได้ ซึ่งทั้งสองส่วนที่กล่าวมานั้นในระบบควบคุมแบบเก่าไม่สามารถทำได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Gupta, R., & Verma, M. (2023). *An overview of the use of PLC in food packaging machines*. ResearchGate.

[2] Kiran, G., & Ramesh, A. (2021). *Design of automatic food grain and powder packing machine*. NVEO Journal, 12(6), 987–995..

[3] ณัฐพล อั่วกลาง และคณะ. “ชุดฝึกควบคุมอัตโนมัติควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์,” วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. นครราชสีมา, 2564

[4] PERFECT. (ม.ป.ป.). วิธีการเลือก INVERTER เลือกอย่างไร. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2567. สืบค้นจาก https://www.perfectthai.net / uncategorized/how-to-choose-inverter/

[5] Factomart. (ม.ป.ป.). ส่วนประกอบของแมกเนติก (Magnetic Contactor) มีอะไรบ้าง ไปดูกัน. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2567. สืบค้นจาก https://mall.factomart.com/component-of-magnetic-contactor/

[6] พวนใจชม, ปริญญา. (2563). การควบคุมระบบบรรจุโดยใช้พีแอลซี. *วิทยานิพนธ์*, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การคำนวณค่าฟลักซ์การส่องสว่างของหลอดไฟโดยวิธีทรงกลมรวมแสง
Calculation of luminous flux of lamps by the spherical method of light

วิวัฒน์ ทิพจร[1*] วิฑูรย์ พรมมี[1] นพัตธร พิชัยวง[1] และ สมเกียรติ ปันยา[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
E-mail: wiwat@rmutl.ac.th [*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการคำนวณปริมาณแสงของหลอดไฟโดยวิธีทรงกลมรวมแสง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของหลอดไฟชนิดต่าง ๆ ได้แก่ หลอดไส้ 100 วัตต์ หลอดเอลอีดี (LED) 12 วัตต์ และหลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ 23 วัตต์ โดยทดสอบหลอดละ 10 ชิ้น ผลการทดลองพบว่าทรงกลมรวมแสงสามารถวัดปริมาณแสงได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับมาตรฐาน LM-80 ช่วยให้สามารถรวบรวมแสงจากทุกทิศทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลอดเอลอีดี ให้ค่าฟลักซ์ส่องสว่างสูงกว่าข้อมูลผู้ผลิต 7.82 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่หลอดไส้และหลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ให้ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าข้อมูลผู้ผลิต 14.89 เปอร์เซ็นต์ และ 5.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการวิจัยนี้สนับสนุนการพัฒนาเครื่องมือวัดแสงที่มีความแม่นยำสูง สำหรับการทดสอบคุณภาพและการวางแผนพัฒนาระบบส่องสว่างในอนาคต

คำสำคัญ: ทรงกลมรวมแสง, ฟลักซ์ส่องสว่าง, มาตรฐาน LM-80 และประสิทธิภาพหลอดไฟ

Abstract

This article describes the calculation of the luminous flux of lamps by the combined sphere method to evaluate the efficiency of different types of lamps, including 100-watt incandescent lamps, 12-watt LED lamps, and 23-watt compact fluorescent lamps. LED bulbs provide luminous flux values 7.82% higher than the manufacturer's data, while incandescent and compact fluorescent bulbs provide 14.89% and 5.77% lower flux values, respectively. The results of this research support the development of high-precision optical measurement instruments for quality testing and planning for future lighting system development.

Keywords: Integrating sphere, luminous flux, LM-80 standard, and lamp efficiency

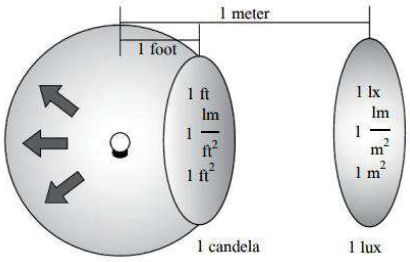
1. บทนำ

การวัดฟลักซ์การส่องสว่างที่แม่นยำเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของหลอดไฟ ด้วยความต้องการที่เพิ่มขึ้นสำหรับแสงสว่างที่ประหยัดพลังงาน การรับรองการปฏิบัติตามมาตรฐานที่กำหนดไว้จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค หนึ่งในวิธีที่น่าเชื่อถือที่สุดในการคำนวณค่าฟลักซ์ส่องสว่างของหลอดไฟ คือการใช้ทรงกลมรวมแสง ซึ่งช่วยให้สามารถวัดการกระจายแสงได้สม่ำเสมอและลดการรบกวนของแสงภายนอกในระบบปิด [1] การวิจัยโดย Ryu et al. เน้นย้ำถึงบทบาทของวิธีทรงกลมรวมแสงเพื่อให้ได้ความแม่นยำในการวัดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับหลอดเอลอีดี [2] และการประยุกต์ใช้มาตรฐาน LM-80 ยังมีความสำคัญในการรับรองความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือในขั้นตอนการทดสอบหลอดไฟ [3] นอกจากนี้ การศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีหลอดไฟต่างๆ เช่น Chen และ Zhang ยังเน้นย้ำถึงความสำคัญของการวัดฟลักซ์ที่แม่นยำในการทำความเข้าใจช่องว่างด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานระหว่างหลอดไส้ หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดเอลอีดี [4] วิธีทรงกลมร่วมแสงไม่เพียงแต่ช่วยสนับสนุนมาตรฐานการวัด แต่ยังให้ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงการออกแบบหลอดไฟและการรับรองประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [5] ความก้าวหน้าเหล่านี้มีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของอุตสาหกรรมหลอดไฟไปสู่ความยั่งยืนทางการอนุรักษ์พลังงาน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การคำนวณ ฟลักซ์การส่องสว่างของหลอดไฟประเภทต่างๆ เช่น หลอดไส้ หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเอลอีดี โดยใช้วิธีทรงกลมรวมแสงการที่ได้รับการปรับปรุง เพื่อให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับปริมาณแสงและการใช้พลังงานของหลอดไฟ ผลลัพธ์คาดว่าจะสนับสนุนความก้าวหน้าในเทคโนโลยีแสงสว่าง การประกันคุณภาพและการพัฒนาระบบการวัดแสงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

2.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟลักซ์การส่องสว่างของหลอดไฟ



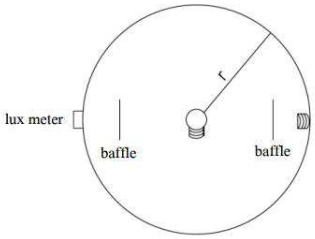
รูปที่ 1 ปริมาณแสงของหลอดไฟ

ฟลักซ์การส่องสว่าง (luminous flux) หมายถึง ปริมาณแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงมีหน่วยเป็น ลูเมน (lumen, lm)

ความส่องสว่าง (illuminance) หมายถึง ปริมาณแสงที่ตกลงบนพื้นที่ต่อตารางเมตร (lm/m^2) มีหน่วยเป็น ลักซ์ (lux, lx)

ความเข้มการส่องสว่าง (luminous intensity) หมายถึง ปริมาณแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงในทิศทางหนึ่ง มีหน่วยเป็นแคนเดลา (candela, cd) ดังรูปที่ 1

2.2 การคำนวณฟลักซ์การส่องสว่างโดยวิธีทรงกลมรวมแสง



รูปที่ 2 แบบจำลองวงกลมรวมแสง

การคำนวณฟลักซ์การส่องสว่างโดยวิธีทรงกลมรวมแสง ตามสมการที่ 1 โดยอ่านค่าความส่องสว่างแนวตั้งได้จากลักซ์มิเตอร์

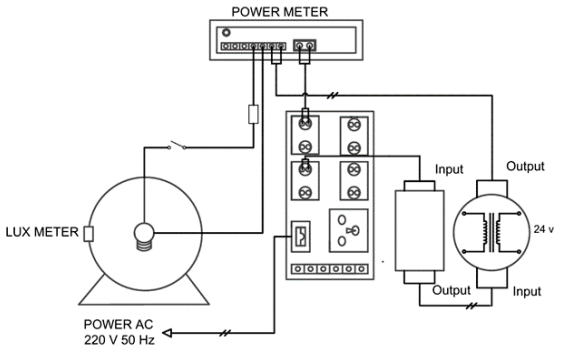
$$\phi_v = kE_v \times 4\pi r^2 \quad (1)$$

ϕ_v คือ ฟลักซ์การส่องสว่างแนวตั้ง (lm)
k คือ ค่าการปรับตั้ง
E_v คือ ความส่องสว่างแนวตั้ง (lx)
r คือ รัศมีวงกลม (m)

ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดไฟ หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณแสงที่ออกมาจากหลอดไฟต่อกำลังไฟฟ้า หน่วยเป็น ลูเมนต่อวัตต์ ตามสมการที่ 2

$$Luminous\ efficacy = \frac{\phi_v}{P} \quad (2)$$

ϕ_v คือ ฟลักซ์การส่องสว่างแนวตั้ง (lm)
P คือ กำลังไฟฟ้า (W)



รูปที่ 3 การต่อเชื่อมเครื่องมือวัดกับทรงกลมรวมแสง

จากรูปที่ 3 เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ เข้าไปยังปลั๊กไฟ จากนั้นนำเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามาเสียบต่อจากปลั๊กไฟก่อนจะเอาต์พุตออกจากเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ไปเข้าอินพุตกับหม้อแปลงปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาพุตออก 24 โวลต์ ไปยังเครื่องมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า ส่วนช่องโหลดต่อไปยังฟิวส์ป้องกันกระแสไม่เกิน 2 แอมแปร์ไปยังสวิตช์จากนั้นวงจรหลังสวิตช์จะเป็นการต่อวงจรแสงสว่างกับหลอดไฟมาตรฐาน



รูปที่ 4 หลอดไฟมาตรฐาน

หลอดมาตรฐานมีคุณสมบัติ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ กระแส 2 แอปแปร์ อุณหภูมิสี 2,856 เคลวิน ฟลักซ์การส่องสว่าง 846.5 ลูเมน นำหลอดไฟมาตรฐานมาสอบเทียบจะได้

ค่าการปรับตั้ง เท่ากับ 0.61

2.3 มาตรฐาน LM-80

LM-80 เป็นมาตรฐานที่ถูกพัฒนาโดย สมาคมวิศวกรรมส่องสว่าง (Illuminating Engineering Society, IES) สำหรับการวัดการบำรุงรักษาลูเมนของแหล่งกำเนิดแสง ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อวัดอายุการใช้งานของหลอดไฟ รักษาเอาต์พุตแสงได้ดีเพียงใดเมื่อเวลาผ่านไป แม้ว่า LM-80 จะมุ่งเน้นไปที่การบำรุงรักษาลูเมน แต่ขั้นตอนการทดสอบก็สามารถนำไปใช้ทรงกลมรวมแสงเพื่อวัดฟลักซ์การส่องสว่างของหลอดไฟหลายชนิดในช่วงเริ่มต้นและการทดสอบอายุการใช้งาน

3. ผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของหลอดไฟด้วยเครื่องทรงกลมรวมแสงรัศมี 0.75 เมตร ทำการเปรียบเทียบหลอดไฟแต่ละชนิดคือ หลอดไส้ หลอดคอมแพกต์ฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี โดยที่จะมีค่าความสว่างของแสงที่ออกมาจากหลอดไฟใกล้เคียงกัน โดยทำการทดสอบชนิดละสิบหลอด ทดสอบทีละหลอดและอ่านค่าที่จากการมิเตอร์กำลัง และ ลักซ์มิเตอร์ และนำค่าที่วัดได้ไปคำนวนหาค่าลูเมน เพื่อหาประสิทธิภาพหลอดไฟแต่ละประเภท ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างการทดสอบหลอดไฟด้วยเครื่องทรงกลมรวมแสง

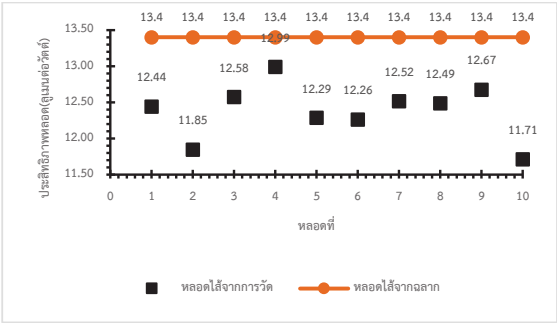
จากรูปที่ 5 สามารถวัดความส่องสว่างแนวตั้ง เท่ากับ 220 lx นำค่าไปแทนในสมการที่ 1

$$\phi_v = kE_v \times 4\pi r^2 = 0.61 \times 220 \times 4 \times 3.14 \times 0.75^2 = 948.12\ lm$$

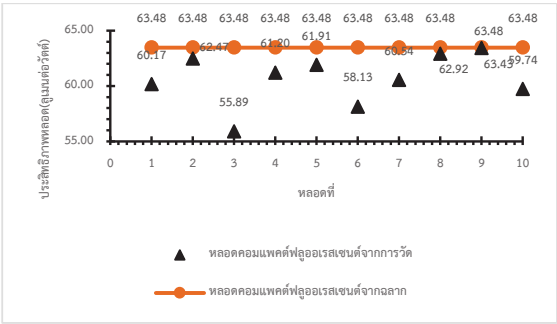
หลอดไฟมีฟลักซ์การส่องสว่างแนวตั้งเท่ากับ 948.12 ลูเมน

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติเฉลี่ยของหลอดไฟ 3 ชนิด

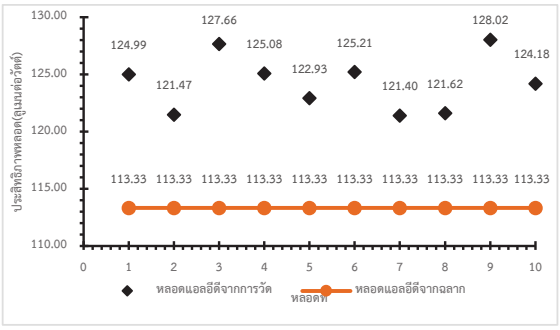
ชนิด	P (W)	E_v (lx)	ϕ_v (lm)	Luminous efficacy (lm/W)	Error (%)
หลอดไส้	100	262	1,240	12.4	7.6
หลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์	23	316.9	1,394	60.6	4.5
หลอดแอลอีดี	12	337	1,492	124.3	9.6



รูปที่ 6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของหลอดไส้



รูปที่ 7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของหลอดคอมแพกต์ฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของหลอดแอลอีดี

3. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการวัดปริมาณแสงของหลอดไฟโดยใช้เครื่องทรงกลมรวมแสง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถวัดค่าฟลักซ์การส่องสว่างได้อย่างแม่นยำ โดยการทดลองได้ทดสอบหลอดไฟทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ หลอดไส้ หลอดคอมแพคต์ฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแอลอีดี ผ่านการวัดค่าความส่องสว่างด้วยลักซ์มิเตอร์และนำไปคำนวณหาค่าลูเมนเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแต่ละหลอด การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องทรงกลมรวมแสงสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับวัดแสงจากทุกทิศทาง และสามารถใช้อ้างอิงตามมาตรฐาน LM-80 ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของหลอดไฟและตรวจสอบข้อมูลที่ผู้ผลิตให้มา ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อไป คือ ควรเพิ่มเติมความสามารถของเครื่องวัดให้รองรับการวัดคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิสีของแสง (CCT) และค่าความถูกต้องของสี (CRI) เพื่อให้การประเมินคุณภาพแสงมีความครบถ้วนและเหมาะสมกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่สามารถสนับสนุนการพัฒนาเครื่องมือวัดแสงที่มีความแม่นยำสูงในอนาคต

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่สนับสนุน งบประมาณ สถานที่ วัสดุฝึกและเครื่องมือวัดในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] R. Johnsen and H. Christensen, "Measurement of luminous flux using integrating spheres," *Journal of Light & Visual Environment*, vol. 28, no. 2, pp. 112–119, 2004.

[2] H. Ryu, J. Kim, and S. Lee, "Precision measurement techniques for LED luminous flux using an integrating sphere," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 5, pp. 1373–1380, May 2012.

[3] Illuminating Engineering Society, *IES LM-80-15: Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources*, IES, 2015.

[4] L. Chen and X. Zhang, "Comparative analysis of luminous efficacy between incandescent, fluorescent, and LED lamps," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 68–76, 2020.

[5] D. Smith and P. White, "Applications of integrating spheres in modern lighting performance testing," *Lighting Research & Technology*, vol. 46, no. 3, pp. 345–359, 2014.



ผศ.ดร.วิวัฒน์ ทิพจร
อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมส่องสว่าง และการหาค่าเหมาะที่สุดในระบบไฟฟ้ากำลัง



ผศ.ดร.วิฑูรย์ พรมมี
อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมส่องสว่าง



นายนพัตธร พิชัย
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมส่องสว่าง



นายสมเกียรติ ปันยา
นักศึกษาสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
งานวิจัยที่สนใจ วิศวกรรมส่องสว่าง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การใช้ระบบตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ศึกษาการขาดน้ำและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในน้อยหน่าเครือ

Electronic Sensing for Water Stress and Carbon Dioxide Sequestration Analysis in Kadsura Species

สุจิตรา จีนะวงษ์ สิทธิชัย จีนะวงษ์ สุวรรณี ปัญยศ และ นิวัติ นวลกัน

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

99 หมู่ 10 ตำบลทรายขาว อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย 57120 โทรศัพท์ 0 5372 3979 E-mail: phahongsa@rmutl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับเทคโนโลยี IoT เพื่อติดตามวิกฤตการขาดน้ำและการดูดซับ CO_2 ของต้นน้อยหน่าเครือ โดยทดลองศึกษาความต้องการน้ำในต้นน้อยหน่าเครือ 3 ต้น และการดูดซับ CO_2 ในโรงเรือนควบคุมที่มีต้นน้อยหน่าเครือ 20 ต้น ผลการศึกษาพบว่าต้นน้อยหน่าเครือเข้าสู่ภาวะวิกฤตเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่า 20% และสามารถฟื้นตัวได้ภายใน 21 วันหลังได้รับน้ำ พบความสัมพันธ์เชิงผกผันระหว่างอุณหภูมิและปริมาณ CO_2 ($r = -0.78$) โดยการดูดซับ CO_2 ในช่วงกลางวันและกลางคืนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ระบบเซ็นเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำและสภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะปลูกเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: วิกฤตการขาดน้ำ, การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์, น้อยหน่าเครือ, ระบบตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์

Abstract

This research applies electronic sensing systems with IoT technology to study water stress and CO_2 sequestration in Kadsura species, a Thai local economic plant. Experiments investigated water requirements in three plants and CO_2 absorption in a controlled greenhouse with 20 plants. Results showed that plants entered crisis when soil moisture fell below 20%, recovering within 21 days after rewatering. Analysis revealed an inverse relationship between temperature and CO_2 levels ($r = -0.78$), with significant differences between daytime and nighttime CO_2 absorption. The developed sensor system can be applied for environmental management in commercial cultivation to increase resource efficiency and productivity.

Keywords: Water Stress, Carbon Dioxide Sequestration, Kadsura Species, Electronic Sensing Systems

1. บทนำ

น้อยหน่าเครือ (Kadsura spp.) เป็นไม้เถาเลื้อยที่พบในป่าดิบชื้นทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นพืชสำคัญในโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี (อพ.สธ.) มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ โภชนาการ และสรรพคุณทางยา [1] ท่ามกลางการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการขาดแคลนน้ำในภาคเกษตร การศึกษาความต้องการน้ำและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชจึงมีความสำคัญ Lin และคณะ [2] พบว่าการใช้เทคโนโลยี IoT ในการติดตามความชื้นในดินสามารถลดปริมาณการใช้น้ำลงได้ถึง 30% ขณะที่ Wang และคณะ [3] ได้พัฒนาระบบเซ็นเซอร์ไร้สายที่วัดความเครียดจากการขาดน้ำของพืชได้อย่างแม่นยำ การศึกษาของ Kumar และคณะ [4] พบว่าพืชเถาหลายชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับ CO_2 สูง โดยมีอัตราการดูดซับเฉลี่ย 15-25 $\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ ในสภาพแสงที่เหมาะสม

งานวิจัยล่าสุดของ Srivastava และคณะ [5] ได้พัฒนาระบบ IoT เพื่อติดตามระดับ CO_2 ในโรงเรือนอัจฉริยะ ขณะที่ Nguyen และคณะ [6] ได้ประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับระบบ IoT ในการวิเคราะห์ความต้องการน้ำของพืช งานวิจัยนี้จึงมุ่งประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ร่วมกับระบบ IoT เพื่อศึกษาความต้องการน้ำและการดูดซับ CO_2 ของต้นน้อยหน่าเครือในสภาพแวดล้อมควบคุม โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน เซ็นเซอร์วัดความชื้นและอุณหภูมิที่ใบพืช เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ รวมถึงเซ็นเซอร์วัดระดับ CO_2 ข้อมูลที่ได้จะนำไปสู่การพัฒนาระบบการจัดการที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกน้อยหน่าเครือเชิงพาณิชย์และสนับสนุนวัตถุประสงค์ของโครงการ อพ.สธ. ในการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์จากพืชพันธุ์พื้นเมืองของไทยอย่างยั่งยืน

2. หลักการและทฤษฎี

การศึกษาความต้องการน้ำและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นน้อยหน่าเครือในงานวิจัยนี้อาศัยหลักการทางสรีรวิทยาพืชร่วมกับเทคโนโลยีเซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์และระบบ IoT โดยมีหลักการสำคัญดังนี้

2.1 หลักการวัดความชื้นในดินและความต้องการน้ำของพืช

การประเมินความต้องการน้ำของต้นน้อยหน่าเครืออาศัยการวัดความชื้นในดินที่เป็นประโยชน์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดินแบบ Capacitive Analog Soil Moisture Sensor เซ็นเซอร์นี้อาศัยหลักการแบบเดียวกับตัวเก็บประจุ โดยเมื่อได้รับความชื้นมาก น้ำหรือของเหลวจะทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า ยิ่งมีความชื้นมาก จะยิ่งทำให้ค่าประจุไฟฟ้ามากขึ้น

2.2 หลักการวัดอุณหภูมิใบและความชื้นใบ

การประเมินความเครียดจากการขาดน้ำในพืชสามารถวิเคราะห์จากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิใบและอุณหภูมิอากาศ

$$\Delta T = Tc - Ta \quad (1)$$

โดย:

Tc คือ อุณหภูมิของใบพืช (°C)

Ta คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (°C)

เมื่อพืชเกิดความเครียดจากการขาดน้ำ ปากใบจะปิดเพื่อลดการคายน้ำ ส่งผลให้อุณหภูมิใบสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอากาศโดยรอบ ในการทดลองนี้ได้ใช้เซ็นเซอร์ SHT21 ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์แบบดิจิทัลที่สามารถวัดทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้อย่างแม่นยำ

ระบบตรวจวัดทั้งหมดเชื่อมต่อกับเทคโนโลยี IoT ผ่านโมดูล ESP32 ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ และส่งข้อมูลผ่านโปรโตคอล MQTT ไปยังระบบคลาวด์ ข้อมูลจะถูกบันทึกทุก 5 นาที และส่งไปยังฐานข้อมูลที่มีการเข้ารหัสแบบ AES-256 bit

3.วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 การศึกษาความต้องการน้ำ

การศึกษาใช้ต้นน้อยหน่าเครือ 3 ต้นที่มีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน สูงประมาณ 80 cm โดยกำหนดให้:

ต้นที่ 1: ให้น้ำอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง รักษาความชื้นในดินที่ 80% (ต้นควบคุม)

ต้นที่ 2 และ 3: ได้รับน้ำเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการทดลอง

ทั้ง 3 ต้นให้น้ำเริ่มต้นจนความชื้นในดินเท่ากับ 80% จากนั้นหยุดให้น้ำต้นที่ 2 และ 3 และติดตามการเปลี่ยนแปลงทุก 7 วัน เป็นเวลา 35 วัน หลังจากนั้นให้น้ำอีกครั้งเพื่อศึกษาการฟื้นตัวเป็นเวลา 21 วัน อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย: เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (รุ่น SM-100, ความแม่นยำ ±3%, ช่วงการวัด 0-100%),เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นใบ (SHT21, ความแม่นยำ ±0.3°C, ±2% RH), ระบบควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติ (ความแม่นยำการจ่ายน้ำ ±5mL)



รูปที่ 1 ระบบการวัดค่า CO_2 ในโรงเรือนปลูกน้อยหน่า

จากรูปที่ 1 ระบบวัดค่า CO_2 ในโรงเรือนและบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลเป็นเวลา 1 เดือน (กันยายน 2567) พร้อมวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในเวลาเดียวกัน

3.2 การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาดำเนินการในโรงเรือนที่มีต้นน้อยหน่าเครือจำนวน 20 ต้น สูงประมาณ 100 cm โดยติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่า CO_2 เพื่อวัดปริมาณ CO_2 ภายในโรงเรือนอย่างต่อเนื่อง ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ด้วยระบบ Evaporator ที่มีอุปกรณ์ตรวจจับ SHT21 บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 1 เดือน (กันยายน 2567)

4. ผลการศึกษาและวิจารณ์

4.1 ความต้องการน้ำและการตอบสนองทางสรีรวิทยาของน้อยหน่าเครือต่อสภาวะขาดน้ำ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2 เมื่อต้นน้อยหน่าเครือขาดน้ำ ดังนี้:

ระยะเริ่มต้น (1-7 วัน, ความชื้นในดิน 78%): ใบเขียวสด หนาแน่น กิ่งก้านแผ่กระจายดี

ระยะเริ่มแสดงอาการ (8-14 วัน, ความชื้นในดิน 64%): ใบยังเขียวสด แต่ปลายใบเริ่มตก

ระยะแสดงอาการชัดเจน (15-21 วัน, ความชื้นในดิน 43%): ใบเริ่มเหี่ยว ใบลู่ลง ก้านใบอ่อนแอ

ระยะวิกฤตเริ่มต้น (22-28 วัน, ความชื้นในดิน 19%): ใบสีเหลือง เหี่ยว ใบเริ่มร่วง

ระยะวิกฤตรุนแรง (29-35 วัน, ความชื้นในดิน 8.7%): ใบแห้งเหี่ยวมาก ร่วงหล่น ม้วนห่อ

เมื่อให้น้ำอีกครั้ง พบการฟื้นตัวดังนี้:

หลังให้น้ำ 7 วัน: ใบเริ่มกลับมาเขียว ก้านใบเริ่มแข็งแรง

หลังให้น้ำ 14 วัน: ใบสีเขียวสด ก้านใบแข็งแรง

หลังให้น้ำ 21 วัน: ใบสีเขียวสด เริ่มแตกยอดอ่อน

สรุปได้ว่าหากความชื้นในดินต่ำกว่า 20% ต้นน้อยหน่าเครือจะเข้าสู่สภาวะวิกฤต และสามารถฟื้นตัวได้ภายใน 21 วันหลังได้รับน้ำ

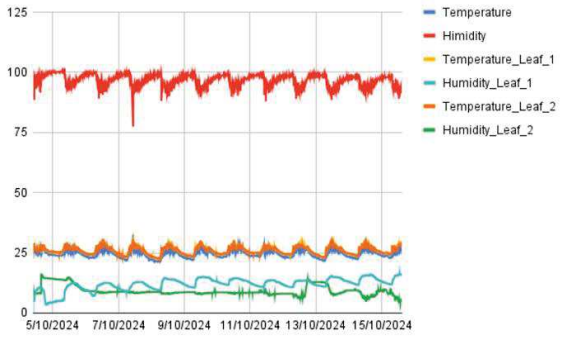


ต้นที่1(ควบคุม) ต้นที่ 2 ต้นที่ 3

รูปที่ 2 ต้นไม้ต้นที่1เทียบกับ ต้นที่2,3 เมื่องดให้น้ำ 21,28 และ35วัน

4.2 ผลการวัดความชื้นใบและอุณหภูมิใบ

การวัดอุณหภูมิใบและความชื้นใบของต้นน้อยหน่าเครือ โดยติดตั้งเซนเซอร์บนใบต้นน้อยหน่าเครือทั้งต้นที่ให้น้ำเป็นปกติและต้นที่งดให้น้ำเพื่อทดลองความต้องการน้ำของต้นน้อยหน่าเครือ สามารถแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใบและความชื้นใบของต้นน้อยหน่าเครือรวมถึงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาพแวดล้อม อุณหภูมิสภาพแวดล้อม Temperature (เส้นสีน้ำเงิน) อุณหภูมิแสดงค่าอยู่ในช่วง 25°C ค่อนข้างคงที่ และความชื้นสัมพัทธ์ สภาพแวดล้อม Humidity (เส้นสีแดง) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีความผันผวนเล็กน้อย อยู่ในช่วง 95% ตลอดการทดลอง



รูปที่ 2 การวิเคราะห์ความต้องการน้ำของต้นน้อยหน่าเครือ

จากรูปที่ 2 อุณหภูมิใบและความชื้นใบของต้นน้อยหน่าเครือที่ให้น้ำปกติ Temperature Leaf_1 และ Humidity Leaf_1 (เส้นสีเหลืองและเส้นสีฟ้า) อุณหภูมิใบอยู่ในช่วง 25°C และความชื้นใบอยู่ในช่วง 15% ส่วนอุณหภูมิใบและความชื้นใบของต้นน้อยหน่าเครือที่งดให้น้ำ Temperature Leaf_2 และ Humidity Leaf_2 (เส้นสีส้มและเส้นสีเขียว) อุณหภูมิใบอยู่ในช่วง 27°C และความชื้นใบอยู่ในช่วง 5% ผลการทดลองความต้องการน้ำของ ต้นน้อยหน่าเครือ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินและความชื้นใบของต้นน้อยหน่าเครือ เมื่อดินมีความชื้นลดลง ต้นน้อยหน่าเครือจะมีการคายน้ำที่ใบน้อยลง ส่งผลให้ความชื้นในใบลดลงและอุณหภูมิของใบสูงขึ้น การรักษาความชื้นในดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยรักษาสภาพใบให้มีความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นน้อยหน่าเครือ

4.3 ผลการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาการดูดซับ CO_2 ในโรงเรือนที่มีต้นน้อยหน่าเครือ 20 ต้น พบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนระหว่างช่วงเวลากลางวันและกลางคืน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลรายวันพบว่า:

การเปลี่ยนแปลงระดับ CO_2 รายวัน: ระดับ CO_2 ลดลงอย่างชัดเจนในช่วงกลางวัน (06:00-18:00 น.) โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงบ่าย (14:00-15:00 น.) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิสูง ในทางกลับกัน ระดับ CO_2 เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงกลางคืน (18:00-06:00 น.) โดยมีค่าสูงสุดในช่วงก่อนรุ่งสาง (04:00-05:00 น.)

ความสัมพันธ์ระหว่าง CO_2 กับอุณหภูมิ: พบความสัมพันธ์เชิงผกผันอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง CO_2 และอุณหภูมิ ($r = -0.78$, $p<0.01$) โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูง 30-33°C ระดับ CO_2 จะลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์เชิงผกผันระหว่าง CO_2 กับความชื้น ($r = -0.38$) แสดงว่าความชื้นสูงอาจสัมพันธ์กับการดูดซับ CO_2 ที่มากขึ้น

ความแตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืน: ค่าเฉลี่ยระดับ CO_2 ในช่วงกลางวัน (458.17 ppm, SD = 18.43) และกลางคืน (516.58 ppm, SD = 15.72) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.01$, $t = -8.45$) โดยค่าต่ำสุดในช่วงกลางวันอยู่ที่ 433 ppm และค่าสูงสุดในช่วงกลางคืนอยู่ที่ 512 ppm ความแตกต่างนี้สะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการสังเคราะห์แสงในช่วงกลางวันที่ช่วยดูดซับ CO_2 และการหายใจของพืชในช่วงกลางคืนที่ปล่อย CO_2 กลับสู่บรรยากาศ

ข้อมูลรายเดือน: ตลอดเดือนกันยายน 2567 พบค่า CO_2 เฉลี่ยอยู่ที่ 474.6 ppm (SD = 23.6 ppm) อุณหภูมิเฉลี่ย 27.8°C (SD = 0.87°C) และความชื้นเฉลี่ย 86.7% (SD = 2.55%) ค่ามาตรฐานเบี่ยงเบนต่ำของทั้งอุณหภูมิและความชื้นแสดงถึงการควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือนที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการดูดซับ CO_2 ของต้นน้อยหน่าเครือ

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้พบว่าต้นน้อยหน่าเครือจะเข้าสู่ภาวะวิกฤตเมื่อความชื้นในดินต่ำกว่า 20% โดยแสดงอาการใบเหลือง เหี่ยว และร่วง การรักษาความชื้นในดินที่ระดับประมาณ 80% เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต การดูดซับ CO_2 มีรูปแบบที่แตกต่างกันระหว่างกลางวันและกลางคืน สะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช

ระบบตรวจวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกน้อยหน่าเครือเชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต ได้แก่ การศึกษาผลของความเข้มแสงต่อการเจริญเติบโตและการดูดซับ CO_2 การพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถทำนายความต้องการน้ำล่วงหน้า และการขยายการศึกษาไปยังพืชชนิดอื่นที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจ

6.ข้อจำกัดของการวิจัย

การศึกษานี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ได้แก่ (1) ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลที่จำกัดเพียง 1 เดือน ทำให้ไม่สามารถประเมินผลกระทบของฤดูกาลได้ (2) จำนวนต้นน้อยหน่าเครือที่ใช้ในการทดลองวิกฤตการขาดน้ำมีเพียง 3 ต้น ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการสรุปผลเชิงสถิติที่แม่นยำ (3) การทดลองดำเนินการในโรงเรือนควบคุม ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพแวดล้อมจริงในการเพาะปลูกเชิงพาณิชย์

7. กิตติกรรมประกาศ

งานนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยการศึกษาการดูดซับคาร์บอนของต้นไม้ กรณีศึกษาต้นไม้ในโครงการอนุรักษ์พันธุ์พืชที่ได้รับทุนอุดหนุน จากสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ล้านนา ภายใต้แผนงานอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอัน เนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปีงบประมาณ 2567

8. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Vanichanugul et al., "Carbon Sequestration of Plant Communities in Planted Forest in Doi Bo National Forest Reserve, Chiang Rai Province," Journal of Forest Management, vol. 15, no. 29, pp. 1-15, 2022.
[2] X. Lin, Y. Wang, and Z. Zhang, "IoT-based water management system for precision agriculture: A comprehensive review and implementation strategy," IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 17, pp. 13434-13449, 2021.
[3] H. Wang, D. Liu, and L. Yang, "Low-cost wireless sensor network for continuous leaf temperature monitoring and water stress detection in plants," IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 3, pp. 3743-3752, 2021.
[4] R. Kumar, S. Singh, and P. Goyal, "Carbon sequestration potential of native plant species in Southeast Asia: A comparative analysis," Environmental Science and Pollution Research, vol. 28, no. 6, pp. 7211-7225, 2021.
[5] A. Srivastava, B. Kumar, and M. Singh, "IoT-based CO2 monitoring and control system for smart greenhouse environments," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 20, no. 1, pp. 521-533, 2023.
[6] T. Nguyen, H. Pham, and K. Lee, "AI-enabled irrigation control and water requirement prediction system for economic crops," Agriculture, vol. 13, no. 3, pp. 674-688, 2023.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การจำลองการทำงานของ RCD สนับเบอร์ที่ใช้ปรับปรุงบูสต์คอนเวอร์เตอร์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

Simulation of RCD Snubber Operation for Improving The Boost Converter of Solar Power System

อนุชา บุญชูโต* สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10800
E-mail: anucha-b@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการการจำลองการทำงานของ RCD สนับเบอร์ที่ใช้ปรับปรุงบูสต์คอนเวอร์เตอร์ของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถลดกระแสไฟกระชาก และสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยการใช้ RCD สนับเบอร์ จะช่วยดูดซับพลังงานส่วนเกินและลดแรงดันพุ่งสูงที่เกิดขึ้นในช่วงการสวิตช์ ทำให้การทำงานของวงจรมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การทดลองและจำลองการทำงานดำเนินการโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink (R2024b – academic use) เพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและแบบเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์ โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า วงจรบูสคอนเวอร์เตอร์ที่เพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีขึ้น ลดการสูญเสียพลังงาน และเพิ่มความเสถียรของระบบเมื่อเทียบกับวงจรแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: บูสต์คอนเวอร์เตอร์, วงจร RCD สนับเบอร์, กระแสไฟกระชาก

Abstract

This paper presents a simulation study of an RCD snubber circuit implemented to enhance the performance of a boost converter in a solar photovoltaic system. The RCD snubber is employed to mitigate current surges and electrical noise caused by the switching operations in the boost converter. By absorbing excess energy and reducing voltage spikes during switching transitions, the RCD snubber contributes to improving circuit efficiency and enhancing the overall stability of the photovoltaic system. The simulation was conducted using MATLAB/Simulink (R2024b – academic use) to compare the performance of a conventional boost converter with that of a boost converter integrated with an RCD snubber circuit. The results indicate that the modified converter provides better performance, reduced energy loss, and improved system stability compared to the conventional design.

Keywords: Boost Converter, RCD Snubber Circuit, Current Surge

บทนำ

ในยุคที่พลังงานหมุนเวียนมีความสำคัญอย่างยิ่งในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสร้างความยั่งยืนให้กับโลก พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับการยอมรับว่าเป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูง การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านแผงโซลาร์เซลล์นั้นมักต้องการอุปกรณ์แปลงพลังงานเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน หนึ่งในองค์ประกอบหลักที่ทำหน้าที่นี้คือ บูสต์คอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงโซลาร์เซลล์ให้สูงขึ้นเพียงพอสำหรับการใช้งานในระบบไฟฟ้าต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการปรับปรุงวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมด้วยการติดตั้งวงจร RCD สนับเบอร์ (Resistor-Capacitor-Diode Snubber Circuit) โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับบูสต์คอนเวอร์เตอร์ วงจร RCD สนับเบอร์ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานส่วนเกินและลดแรงดันพุ่งสูงที่เกิดขึ้นในระหว่างการสวิตช์ ช่วยให้การทำงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์มีความราบรื่นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้ ยังช่วยลดการสูญเสียพลังงานที่ไม่พึงประสงค์ และเพิ่มความเสถียรของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ทบทวนวรรณกรรม

งานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงแต่ประสบปัญหาแรงดันพุ่งและกระแสไฟกระชากระหว่างการสลับสวิตช์ ซึ่งส่งผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์ งานวิจัยของ El-Ghanam และคณะเสนอการใช้วงจร Snubber เพื่อดูดซับแรงดันส่วนเกินและลด EMI ขณะที่ Woothipatanapan และคณะได้ศึกษาเทคนิคการควบคุมที่ช่วยลดการสูญเสียพลังงานในคอนเวอร์เตอร์อย่างมี

ประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้วงจร RCD Snubber เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

1. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.1 ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นระบบที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ ซึ่งปัจจุบันไมโครอินเวอร์เตอร์ ได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากมีขนาดเล็กลงและสามารถติดตั้งร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์แต่ละแผงได้อย่างอิสระ การใช้ไมโครอินเวอร์เตอร์ส่งผลให้ บูสต์คอนเวอร์เตอร์ ที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบมีขนาดกำลังลดลง แต่มีจำนวนมากขึ้นในระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้โครงสร้างแบบกระจาย

1.1.1 การผลิตไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์

แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Panel) ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) ซึ่งทำจากวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบกับเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานจากโฟตอนจะทำให้เกิดการสร้างอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า และเกิดพลังงานไฟฟ้าในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งเรียกว่า พลังงานไฟฟ้าโฟโต้โวลตาอิก

1.1.2 การแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อให้สามารถใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปได้ โดยเฉพาะในระบบที่ต้องเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์มักมีค่าไม่คงที่และต่ำเกินไป การใช้ บูสต์คอนเวอร์เตอร์ จึงจำเป็นสำหรับการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้สูงพอสำหรับการใช้งานหรือการส่งผ่านไปยังอินเวอร์เตอร์

1.2 บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter)

บูสต์คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เพิ่มแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากค่าแรงดันต่ำไปยังค่าแรงดันที่สูงขึ้น โดยใช้หลักการสะสมพลังงานในตัวเหนี่ยวนำ และปล่อยพลังงานที่สะสมออกไปในรูปของแรงดันที่สูงขึ้นผ่านตัวเก็บประจุ
สมการพื้นฐานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์:

$$V_{Out} = \frac{V_{In}}{1-D} \quad (1)$$

1.2.1 การทำงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์

1.2.1.1 การสลับเปิด-ปิดของสวิตช์:

บูสต์คอนเวอร์เตอร์มักใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น IGBT หรือ MOSFET เพื่อควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้า ในที่นี้จะใช้ IGBT เป็นตัวอย่างของอุปกรณ์สวิตช์

1.2.1.2 การชาร์จตัวเหนี่ยวนำ:

เมื่อสวิตช์ทำงานในสถานะเปิด กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดการสะสมพลังงานในรูปของพลังงานแม่เหล็ก

1.2.1.3 การปล่อยพลังงานจากตัวเหนี่ยวนำ:

เมื่อสวิตช์ปิด กระแสไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยังตัวเก็บประจุ และโหลดซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

1.2.1.4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้า:

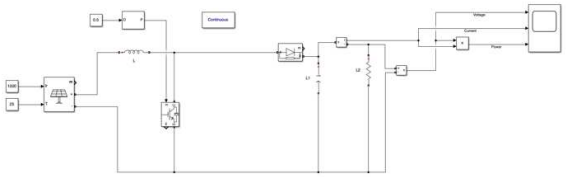
การปรับ Duty Cycle ของสวิตช์ผ่านการควบคุมแบบ Pulse Width Modulation (PWM) ช่วยให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ตามต้องการ

1.3 วงจร RCD สนับเบอร์ (RCD Snubber Circuit)

วงจร RCD สนับเบอร์ เป็นวงจรที่ใช้ในการลดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่พุ่งสูงซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการสลับสถานะของสวิตช์ในบูสต์คอนเวอร์เตอร์ โดยวงจรนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) ใช้ในการดูดซับพลังงานส่วนเกิน ตัวเก็บประจุ (C) ทำหน้าที่สะสมพลังงานที่เกิดขึ้นจากแรงดันพุ่งสูง และไดโอด (D) ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

2. การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สร้างวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมขึ้นมาเพื่อเป็นต้นแบบในการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (R2024b – academic use) ใช้โมดูลแผงโซล่าร์เซลล์เป็นอินพุตทดแทนแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงพร้อมกำหนดค่าแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์/ตารางเมตรซึ่งเป็นค่าสูงสุดของแสงแดดที่ใช้ในการคำนวณ และกำหนดอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วไปในการทดลอง ซึ่งจะได้เอาต์พุตของระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามรูปที่ 1 เพื่อนำไปเป็นค่าอินพุตสำหรับโมดูลโซลาร์เซลล์สำหรับสร้างโมเดลจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 1 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมโดยใช้ระบบไฟฟ้าพลังแสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิด

การทดลองหาค่า Duty Cycle โดยคำนวณจากสมการที่(1) โดยกำหนดอินพุต 250V เอาต์พุต 500V สามารถหาค่า D ได้ 0.5

ทำการคำนวณค่าตัวเหนี่ยวนำ L การคำนวณค่า L ควรพิจารณาจาก Ripple Current ที่ยอมรับได้ในตัวเหนี่ยวนำ (ΔI_L) โดยทั่วไปกำหนดให้ไม่เกิน 30% ของ I_{in} คือ 1.2A

$$L = \frac{V_{in} \times D}{f \times \Delta I_L} \quad (2)$$

กำหนดความถี่ f = 20 kHz สำหรับทำการทดสอบและทำการคำนวณหาค่า L จากสมการที่ (2) ได้ค่า L = 5.2 mH

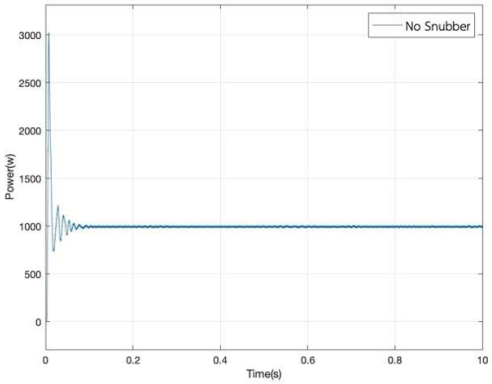
ทำการคำนวณค่าตัวเก็บประจุ C โดย ΔVout = 5% ของ Vout คือ 25 V

$$C = \frac{I_{out} \times D}{f \times \Delta V_{out}} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) สามารถหาค่า C ได้คือ 2μF

ทำการแทนค่าอุปกรณ์ในวงจรที่สร้างขึ้นและทดสอบการทำงานโดยวัดค่ากำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตตามสมการที่ (4)

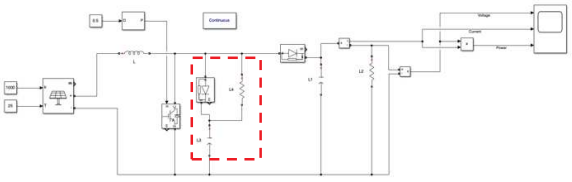
$$P = I \times V \quad (4)$$



รูปที่ 2 กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรที่ไม่มี RCD สนับเบอร์

กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจร ที่ไม่มี RCD สนับเบอร์ จะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นการทำงานจะมีกำลังไฟฟ้าพุ่งสูงขึ้นไปถึง 3000 วัตต์ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน

ทำการปรับปรุงวงจรสนับเบอร์แบบดั้งเดิมโดยการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังไฟฟ้าทางด้านขาออก



รูปที่3 วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์

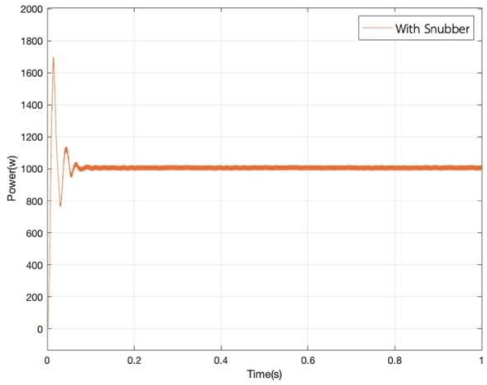
การคำนวณค่า RCD Snubber

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{snubber}} \quad (5)$$

$$C = \frac{P_{snubber}}{f \times V_{out}^2} \quad (6)$$

จากสมการที่ (5) สามารถหาค่า R สนับเบอร์ได้ 2500Ω และคำนวณหาค่า C สนับเบอร์จากสมการที่ (6) ได้ค่า C สนับเบอร์ 20μF

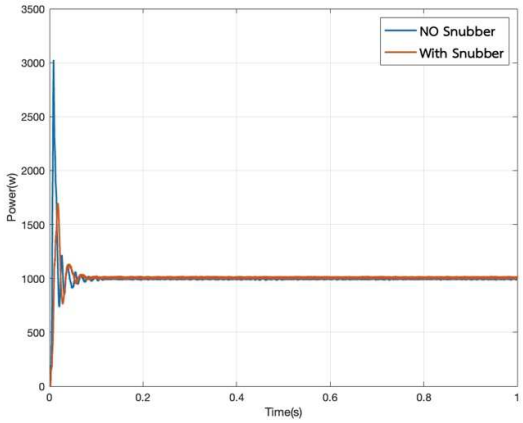
แทนค่าอุปกรณ์ในวงจรที่สร้างขึ้นและทำการทดสอบการทำงานโดยเทียบจากประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต



รูปที่ 3 กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรที่ปรับปรุงด้วย RCD สนับเบอร์

กำลังไฟทางด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ ที่ปรับปรุงเพิ่มเติมใส่วงจร RCD สนับเบอร์แล้วกำลังไฟทางด้านเอาต์พุตมีกระแสพุ่งสูงในช่วงเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 1700 วัตต์ซึ่งลดต่ำกว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมเกือบครึ่งหนึ่ง

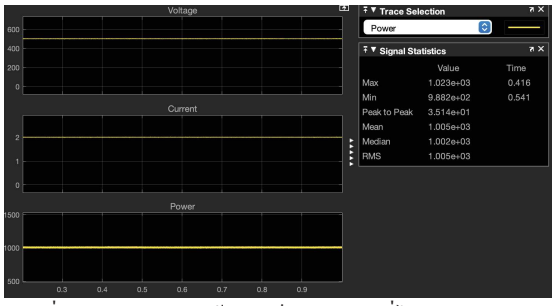
3. การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงาน



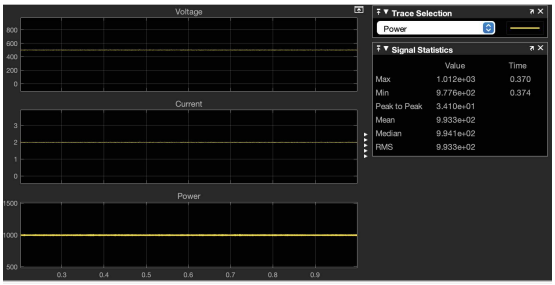
รูปที่ 4 กำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและ แบบที่ปรับปรุงด้วย RCD สนับเบอร์

เมื่อนำกราฟเอาต์พุตของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงด้วยวงจร RCD สนับเบอร์มาทำการเปรียบเทียบทับ

ซ้อนกันจะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่พุ่งสูงในช่วงเริ่มต้นการทำงานของแบบที่มี RCD สนับเบอร์ต่ำกว่ามาก และยังให้กำลังไฟฟ้าในช่วงเสถียรดีกว่าวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมอีกด้วยโดยเปรียบเทียบได้จากค่าพลังงานด้านเอาต์พุต รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ในส่วน Signal Statistics



รูปที่ 5 Signal Statistics ด้านเอาต์พุตของวงจรที่ไม่มี RCD สนับเบอร์



รูปที่ 6 Signal Statistics ด้านเอาต์พุตของวงจรที่เพิ่ม RCD สนับเบอร์

เมื่อเปรียบเทียบ Signal Statistics ของทั้ง 2วงจรพบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุต(Mean) เทียบกับค่ากึ่งกลาง (Median) ของวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ที่มี RCD สนับเบอร์(รูปที่ 6) มีค่าตัวเลขต่างกันเพียง 0.8W แสดงถึงเอาต์พุตที่มีกำลังไฟที่กระเพื่อมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวงจรแบบดั้งเดิม (รูปที่ 5) ที่มีความต่างของค่า Mean กับ Median ถึง 3W ซึ่งแสดงถึงการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าด้านเอาต์พุตที่สูงกว่า

4. สรุป

จากการศึกษาพบว่า บูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดสำคัญในการใช้งานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะในด้านแรงดันพุ่งสูง (voltage spike) และกระแสไฟกระชากที่เกิดขึ้นในช่วงการสลับสถานะของสวิตช์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงาน ความไม่เสถียร และอาจส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์สวิตช์

ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงวงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์ด้วยการเพิ่มวงจร RCD Snubber ซึ่งทำหน้าที่ดูดซับพลังงานส่วนเกินและลดแรงดันพุ่งในช่วง switching ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองจากการจำลองใน MATLAB/Simulink แสดงให้เห็นว่าวงจรที่มี RCD Snubber มีแรงดันขาออกที่เสถียรมากขึ้น ลดระดับ EMI และลดพลังงานสูญเสียลงอย่างมีนัยสำคัญ จึงสามารถยกระดับประสิทธิภาพโดยรวมและความน่าเชื่อถือของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างชัดเจน

วงจรบูสต์คอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมมีกำลังไฟฟ้าพุ่งสูงถึง 3,000 วัตต์ในช่วงเริ่มต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่วงจรที่ปรับปรุงด้วย RCD Snubber สามารถลดกำลังพุ่งลงเหลือเพียง 1,700 วัตต์ ช่วยลดความเสี่ยงต่ออุปกรณ์ปลายทางอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ วงจรที่มี RCD Snubber ยังแสดงผลกำลังเอาต์พุตที่เสถียรกว่า โดยมีค่าความต่างระหว่าง Mean และ Median เพียง 0.8W เทียบกับวงจรเดิมที่มีความต่างถึง 3W แสดงให้เห็นถึงการควบคุมพลังงานที่นิ่งและมีประสิทธิภาพมากขึ้น RCD Snubber ทำหน้าที่ดูดซับพลังงานส่วนเกินและลดแรงดันกระชาก ส่งผลให้ระบบมีความเสถียรและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] S. Woothipatanapan, P. Chancharoensook, and A. Jangwanitlert, “Efficiency Improvement of Converter for Switched Reluctance Motor Drives at Low Speed Operation,” 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Taipei, Taiwan, 2009, pp. 488-493.

[2] S.M. El-Ghanam, W. Abdel Basit, M.Ismail, S.A.Kamh, H.A.Ashry, F.A.S.Soliman “Improvement of Switching Characteristics of Boost Converter Systems” in ARPN Journal of Science and Technology, vol. 3, no. 3, March 2013, PP.1-8., ISSN 2225-7217

[3] Sakhon Woothipatanapan, Anuwat Jangwanitlert, and Phop Chancharoensook, “Efficiency Improvement of Converter for Switched Reluctance Motor Drives by Mixed Parallel Operation of IGBT and MOSFET,” 2010 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2010), Fukuoka, Japan, 2010, pp. 1841-1846.

[4] Vishwas Acharya Nayampalli, Julian da Cunha, and Hans-Günter Eckel, “Turn-off strategies for low-saturation IGBTs to reduce turn-off losses,” European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2021), Ghent, Belgium, 2021, pp 1-10.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การลอยตัวของวัตถุแม่เหล็กโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์และตัวควบคุมพีไอดี

Magnetic Levitation by using Hall Effect Sensor and PID controller

ปราโมทย์ จางอิสระกุล และ ณหทัย ผ่องสายใจ
สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และอัตโนมัติ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
Email: pramote@dpu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการศึกษาการลอยตัวของวัตถุแม่เหล็ก ใช้ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์วางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก และค่าของสนามนี้แปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยสัดส่วนของสนามแม่เหล็กและแรงดันจะแปรผันตรง ค่าแรงดันนี้จะต่อเข้ากับระบบควบคุมพีไอดี (PID) โปรแกรมตามขั้นตอนต่างๆของ PID จะถูกเขียนขึ้น เชื่อมต่อระหว่างบอร์ดควบคุม Arduino และคอมพิวเตอร์ ส่วนสำคัญอีกส่วนคือ วงจรทรานซิเตอร์มอสเฟต ที่มีสัญญาณด้านขาเข้าเป็น PWM กระแสด้านขาออกของวงจรนี้ จะไหลผ่านเข้าขดลวดและมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ในส่วนของวัตถุแม่เหล็กที่ใช้ทดสอบ จะมีแม่เหล็กถาวรวางติดที่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะและแท่งนี้จะวางตัวในแนวตั้งระหว่างระหว่างฮอลล์เซนเซอร์ที่ด้านล่าง กับขดลวดที่เป็นแม่เหล็กชั่วคราวที่ด้านบน ผลการทดลองแสดงวัตถุสามารถลอยได้และมีเสถียรภาพ มีระดับแรงดันเซนเซอร์ที่ 2.3 V และเป็นแรงดันด้านขาเข้าของ PID น้ำหนักของวัตถุที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสและแรงดันที่ขดลวดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

คำสำคัญ: การลอยตัวแม่เหล็ก, ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

Abstract

In this paper, we presented the study of magnetic levitation. Hall effect sensor produced a voltage when it was placed in a magnetic field and gave output proportional to magnetic strength. The output voltage sent to PID control. The PID codes were conducted for controlling the connection between Arduino and computer. To drive the coil, it is used a method of duty-cycle of a PWM signal and MOSFET circuit. Two small permanent magnetic discs were attached on the top and bottom of metal rod and this rod was located between hall sensor and coil. The experimental results showed that when the magnetic object was in a stable or floating state, hall voltage was about 2.3 V and this voltage was input of PID. If the weight of a magnetic object was heavy, current and voltage in the coil were also high as well.

Keywords: magnetic levitation, hall effect sensor.

1. บทนำ

ความสมดุลของแรงกระทำบนวัตถุในแนวดิ่งที่มีทิศเวกเตอร์ดึงขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีทิศเวกเตอร์ดึงลง เพื่อให้วัตถุลอยในอากาศได้ เป็นงานวิจัยด้านไฟฟ้าและแม่เหล็ก มีการออกแบบในหลาย ๆ วิธีและหลายวัตถุทดสอบ เช่น รถไฟความเร็วสูง [1] Maglev ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปตามรางโดยใช้แม่เหล็กเพื่อสร้างแรงขับเคลื่อน ช่วยลดแรงเสียดทานและช่วยเพิ่มความเร็วได้มากขึ้น งานวิจัย [2]-[4] วิเคราะห์โมเดลและการออกแบบในเชิงคณิตศาสตร์ของการลอยตัววัตถุแม่เหล็กในหลายวิธี งานวิจัย [5] ใช้เซนเซอร์แสงในการตรวจจับตำแหน่งของลูกบอลเหล็กและเป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งของลูกบอลเหล็ก สร้างสนามแม่เหล็กโดยใช้ขดลวด งานวิจัย [6] แสดงการพิสูจน์กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 60 Hz เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าถึงระดับหนึ่ง สามารถทำให้ขดลวดลอยเหนือแผ่นโลหะและคงที่อยู่ได้ การออกแบบบนพื้นฐานสมการของแมกเวล์ล บทความนี้กล่าวถึง การลอยตัวของวัตถุแม่เหล็ก แนวทางหลักในการออกแบบใช้เซนเซอร์แรงดันไฟฟ้า-สนามแม่เหล็กในการวัดตำแหน่งของวัตถุ และมีสัญญาณป้อนกลับในการควบคุม พื้นฐานการสร้างชุดทดสอบการลอยตัวของวัตถุแม่เหล็ก ประกอบด้วย วงจรทรานซิสเตอร์มอสเฟต ขดลวดและแม่เหล็กถาวร บอร์ดควบคุม เป็นต้น ผลการทดลองแสดง กราฟและสัญญาณที่วัดได้ด้วยออสซิโลสโคป ยังประโยชน์ในการเข้าใจในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การโปรแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์

2. ความรู้พื้นฐานการออกแบบ

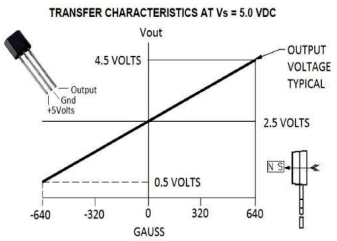
2.1 ขดลวดและสนามแม่เหล็ก

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปในขดลวดที่พันอยู่รอบแท่งเหล็กอ่อน แท่งเหล็กอ่อนก็จะมีสภาพเป็นแม่เหล็ก แต่เมื่อเราหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไป อำนาจแม่เหล็กก็จะหมดไป รู้จักกันใน ขดลวดโซนินอยด์ (solenoid) ทำหน้าที่เป็นแท่งแม่เหล็กชั่วคราว (electro-magnetic) ทิศของแท่งแม่เหล็กนี้หาจากกฎมือขวา เราสามารถหาสนามแม่เหล็กตรงบริเวณกลางของขดลวดโซนินอยด์ หมายถึง บริเวณกลางที่มีทิศขนานกับแกนและสนามแม่เหล็กนี้ มีขนาดเกือบคงที่ ด้วยสมการ $B = \mu_0 nI$ ใน

งานวิจัยนี้ ใช้การพันขดลวดเข้ากับแกนรูปตัวไอ (I sharp) มีจำนวนรอบ 200 และ 250 รอบ ขนาดลวดทองแดงมาตราฐาน SWG # 22 และ #23 ขดลวดพันบนแกนเหล็กทำหน้าที่แท่งแม่เหล็กชั่วคราว เพราะสามารถควบคุมสนามแม่เหล็กได้ด้วยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าไปในขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด หาด้วยสมการ $L=(N^2\mu A)/l$ เมื่อ L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H), N จำนวนรอบของขดลวด, A คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนที่พันขดลวด (m^2) μ คือ ค่าความซาบซึมได้ของแกนเหล็ก และ l คือ ความยาวของแกนที่พันขดลวด (m) แม่เหล็กถาวรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นชนิด นีโอไดเนียม N42 ขนาด 30mmx10mm แรงในการดูดและแรงผลักสูง นำมาติดที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งโลหะ ผลรวมของมวลทั้งหมดต้องได้ ตามที่กำหนด 50, 100, และ 200 กรัม ทิศที่ปลายทั้งสองแท่งนี้จะเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ เรียกว่า วัตถุแม่เหล็ก การทดสอบการลอยตัวภายใต้สนามแม่เหล็ก ถ้าการทดสอบการลอยตัวแท่งวัตถุนี้มีความเสถียรภาพ แท่งวัตถุจะวางตัวในแนวตั้งอยู่ระหว่างฮอลล์เซนเซอร์ที่ด้านล่าง กับขดลวดที่เป็นแม่เหล็กชั่วคราวที่ด้านบน

2.2 เซนเซอร์ แรงดันไฟฟ้า-สนามแม่เหล็ก

ปรากฏการณ์ฮอลล์ (hall effect) หรือฮอลล์เอฟเฟค เป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่ค้นพบโดย เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) ในปี พ.ศ. 2422 เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux) มากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ จะทำให้เกิดกระแสไหลในแผ่นตัวนำ และมีแรงดันที่เรียกว่า แรงดันฮอลล์ (hall voltage) ขึ้นที่ตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก ฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ (hall effect sensor) ทำให้เกิดประโยชน์ในการตรวจจับสนามแม่เหล็ก และมีการนำหลักการนี้ไปสร้างอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย ในงานวิจัยนี้ ใช้ฮอลล์เซนเซอร์ (hall sensor) ผลิตโดย Allegro 1302 มีข้อดี คือ มีสัญญาณรบกวนต่ำ มีช่วงแรงดันไฟฟ้าในการทำงาน 4-6 V มีความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตได้ดี มีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันแบบต่อเนื่องในอัตราส่วนที่สม่ำเสมอ ถ้าเรานำฮอลล์เซนเซอร์นี้วางอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กจะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น และแปรผันตรงกับสนามแม่เหล็ก ถ้าไม่มีสนามแม่เหล็ก ค่าแรงดันจะมีค่า 50% ของแรงดันแหล่งจ่าย (5V) การเพิ่มขึ้นของแรงดันจะเพิ่มในอัตรา 2.5 mV ตามเบอร์ A1301 และ 1.3mV/G ตามเบอร์ A1302 ดังตัวอย่างในรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 1 แรงดันและสนามแม่เหล็กในฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

2.3 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) หรือในความหมายที่แปรศัพท์ได้ว่า ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ ในที่นี้ใช้ตัวย่อว่า PID เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าความผิดพลาดที่มาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ มีสมการดังนี้ [7]

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e(\tau)d\tau+K_d\frac{d}{dt}e(t) \qquad (1)$$

การเขียนรหัส pseudo เพื่อใช้ในการควบคุมตามกระบวนการ PID มีดังนี้

```
previous_error=0
Integral=0
start:
      error=setpoint-actual_position
      integral=integral+(error*dt)
      derivative=(error-previous_error)/dt
      output=(Kp*error)+(Ki*integral)+(Kd*derivative)
      previous_error=error
      wait(dt)
go to start
```

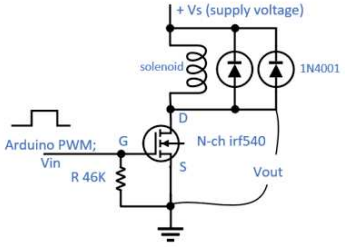
รหัสถูกเขียนขึ้นและโปรแกรมเข้าบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ที่มีความสะดวกสนับสนุนการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และกับอุปกรณ์รับเข้า/ส่งออก ต่างๆ ทั้งแบบดิจิตอลและอนาล็อก ทำหน้าที่ในกระบวนการของ PID โดยในงานวิจัยนี้ ตำแหน่ง A0 บนบอร์ด Arduino รับสัญญาณแรงดันด้านออกจากฮอลล์เซนเซอร์ ตำแหน่งนี้ทำหน้าที่เป็น actual_position และกำหนด setpoint ที่ 2.3 V เพื่อหา error=setpoint-actual_position การกำหนดอัตราขยาย Ki, Kp และ Kd จากการทดลองสุ่มค่า เพื่อหาเสถียรภาพของการทำงาน ได้ค่าที่ 30, 500, และ 15 ตามลำดับ ตำแหน่ง A5 ส่งสัญญาณ PWM มีค่า duty cycle สัมพันธ์กับน้ำหนักของวัตถุ และเป็นสัญญาณด้านเข้าให้กับวงจรทรานซิสเตอร์มอสเฟต

2.4 วงจรทรานซิสเตอร์มอสเฟต

วงจรมอสเฟตทำหน้าที่เสมือนสวิตซ์ที่มีโมดการทำงาน 2 ย่านดังรูปที่ 2

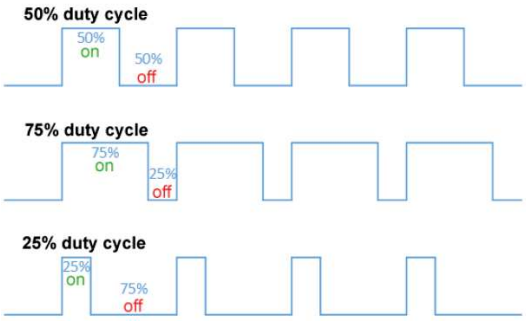
ย่าน cut off มีค่า $V_{in}=0$ V, $I_D=0$ A, $V_{out}=V_S$

ย่าน saturation มีค่า $V_{in}\approx V_S$, $I_D=V_S/R_l$, $V_{out}=0.2$ V.



รูปที่ 2 วงจรมอสเฟต

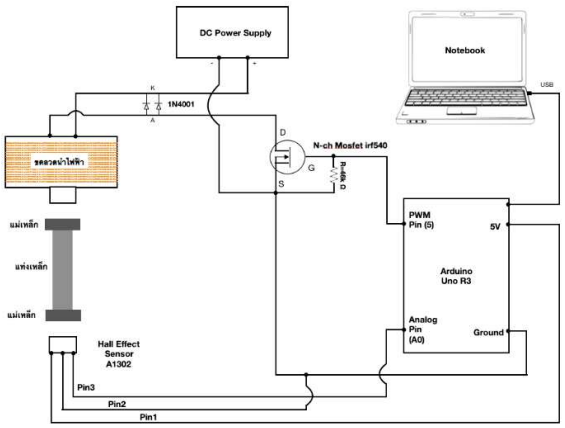
สัญญาณด้านเข้าเป็น PWM ที่มาจากบอร์ด Arduino (ขา 5 สัญญาณดิจิตอล) โหลดของวงจรมอสเฟต คือ ขดลวดโซลินอยด์ที่ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก เราจำเป็นต้องต่อไดโอด 1N4001 2 ตัวต่อขนานกับขดลวดทำหน้าที่ป้องกันแรงดันย้อนกลับ (back emf) ที่มาจากขดลวด เมื่อวงจรมอสเฟตในสภาวะ off ยังผลให้อุปกรณ์มอสเฟตเสียหายได้ รูปที่ 3 duty cycle หรือความกว้างของพัสล์ที่ 25%, 50% และ 75% วงจรมอสเฟตมีแรงดันด้านออกในสภาวะ on/off ตามค่าของ duty cycle และกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับ duty cycle เช่นกัน



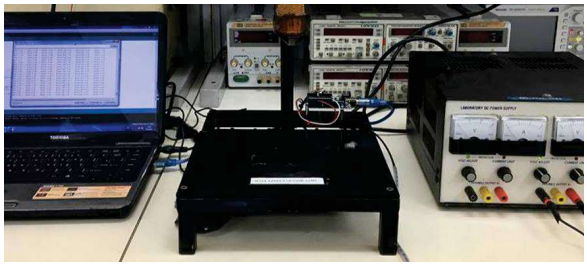
รูปที่ 3 ความกว้างของพัสล์ที่ 25%, 50% และ 75%

3. ไดอะแกรมการต่อวงจร

วงจรในแต่ละส่วนและการต่อสายในตำแหน่ง ๆ ต่าง ที่ได้สร้างขึ้นมา ดังในรูปที่ 4 ประกอบด้วย ขดลวดพันรอบแกนเหล็ก แท่งวัตถุแม่เหล็กที่ทดสอบ (แท่งเหล็กรูปทรงสี่เหลี่ยมปลายทั้งสอง จะติดด้วยแม่เหล็กนีโอไดเนียม) ฮอลล์เซนเซอร์ วงจรมอสเฟต ระบบควบคุมแบบพีไอดี แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และ การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทดสอบในห้องปฏิบัติภาควิชา มีอุณหภูมิปกติประมาณ 25 องศาเซลเซียส



ก) ส่วนประกอบของอุปกรณ์และการต่อวงจร

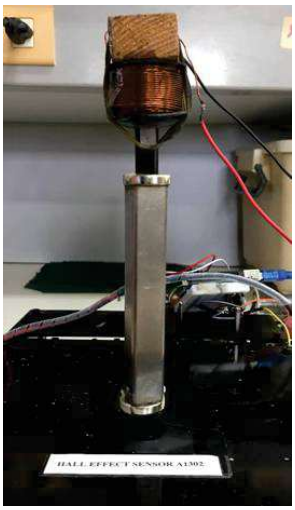


ข) การทดสอบภายในห้องปฏิบัติของภาควิชา

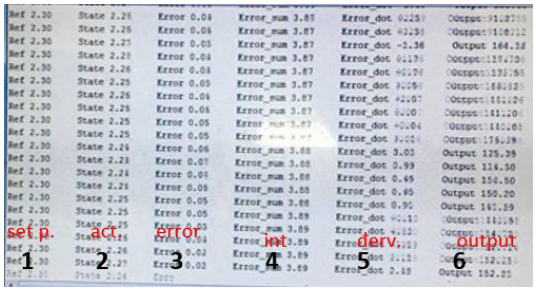
รูปที่ 4 วงจรและการทดสอบการลอยตัวของวัตถุแม่เหล็ก

4. การทดสอบและผลการทดลอง

รูปที่ 5 วัตถุแม่เหล็กมวล 100 กรัม สามารถลอยตัวในอากาศได้ โดยมีระยะห่างระหว่างฮอลล์เซนเซอร์กับด้านล่างของวัตถุแม่เหล็กประมาณ 6 mm ซึ่งเป็นผลความสมดุลกันระหว่างแรงดูดของแม่เหล็กถาวรนีโอไดเนียมและแรงผลักของแม่เหล็กชั่วคราวจากขดลวดและแกนเหล็ก เสถียรภาพการลอยตัวจะถูกเสียไป ถ้ามีความเร็วลมมากเกิดขึ้นในบริเวณนั้น และการสูญเสียสภาพการเป็นแม่เหล็กของขดลวด ทำให้แท่งวัตถุแม่เหล็กจะดูดติดกับแกนเหล็กในขดลวด เมื่อตรวจสอบค่าต่าง ๆ ในโปรแกรมควบคุม PID บนบอร์ด Arduino และเขียนโปรแกรมให้แสดงค่าต่าง ๆ บนคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 6 คือ ผลของระบบเสถียรภาพ อธิบายได้ว่า สามคอลัมภ์แรก ค่าของ setpoint และ ค่า actual position ที่มาจากการป้อนกลับ ทำให้ค่า error เข้าใกล้ศูนย์ ระบบจึงเกิดเสถียรภาพ และสองคอลัมภ์ถัดมา คือค่า ของปริพันธ์ และ อนุพันธ์ ตามสมการ [7] และคอลัมภ์สุดท้าย คือ ค่าแรงดัน output ป้อนกลับให้วงจรมอสเฟต

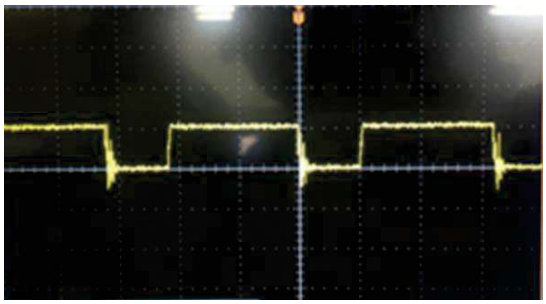


รูปที่ 5 วัตถุแม่เหล็กสามารถลอยตัวในอากาศ

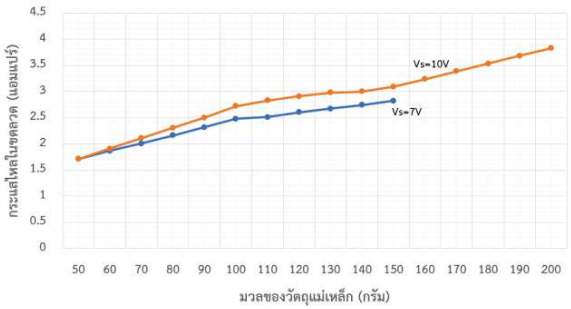


รูปที่ 6 ค่าต่าง ๆ ในระบบควบคุม PID บนบอร์ด Arduino

เมื่อวัดสัญญาณ PWM ที่ตำแหน่งขาเกตของมอสเฟตเทียบกับกราวด์ที่มวลของวัตถุ 200 กรัม ได้สัญญาณตามรูปที่ 7 ความกว้างของพัลส์แสดงถึงช่วงเวลาในการ on/off ของวงจรมอสเฟต ช่วงเวลาบนความกว้างของพัลส์ คือ ช่วงเวลา on ของวงจร ถ้ามวลของวัตถุน้อยลง จะมีความกว้างของพัลส์แคบลง



รูปที่ 7 สัญญาณ PWM เมื่อมวลของวัตถุแม่เหล็ก 200 กรัม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสในขดลวดกับมวลของวัตถุแม่เหล็ก

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าขดลวดกับมวลของวัตถุแม่เหล็ก เมื่อกำหนดแรงดันของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง Vs= 7 และ 10 V ค่ามวลกับค่ากระแสจะแปรผันตรง ค่ามวลมากขึ้นมีค่ากระแสในขดลวดมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น นอกจากนี้ เมื่อมวลของวัตถุคงที่ ถ้าปรับ Vs ให้ต่ำลง กระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดต่ำลงเช่นกัน กระแสนี้สร้างสนามแม่เหล็ก

5. สรุป

งานวิจัยนี้สร้างการทดสอบการลอยตัวของวัตถุแม่เหล็กที่มีมวล 200 กรัม วัตถุสามารถลอยอยู่ได้ การทดสอบได้สรุป 1) ระยะระหว่างแม่เหล็กถาวรและฮอลล์เซนเซอร์อยู่ในช่วง 5-10 mm มีแรงดันประมาณ 2.3 V มีความเสถียรภาพในการทรงตัวดี ตำแหน่งของวัตถุแม่เหล็กและน้ำหนักเป็นตัวแปรสำคัญ 2) กระแสไฟฟ้าในขดลวดแปรผันตรงกับมวลของวัตถุแม่เหล็ก เป็นหลักการทั่วไป ต้องการพลังงานมากขึ้น เมื่อมวลมากขึ้น 3) อัตราขยายใน PID ใช้วิธีสุ่มค่าและหาค่าที่ดีที่สุดใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น สิ่งที่ไม่ได้กล่าวถึง คือ การคำนวณความสัมพันธ์ของแรงดูดและแรงผลัก ระหว่างแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กชั่วคราวที่สามารถจำลองด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ทำให้เราสามารถเห็นฟลักซ์แม่เหล็กตลอดจน ความเกี่ยวข้องของน้ำหนัก W=mg และแรงที่ทำให้น้ำหนักนี้ลอยอยู่ได้.

อ้างอิง

[1] Wang Z, Zhiqiang L, Xiaolong Li., “Levitation control of permanent magnet electromagnetic hybrid suspension maglev train”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part I Journal of Systems and Control Engineering. Jan., 2018.

[2] Weh H., May H., Hupe H., “High Performance Magnetic Levitation with Controlled Magnets and Magnets with Stable Characteristics”, in 10th International Conference on Magnetically Levitated Systems (MagLev) 1988, pp. 401-409.

[3] HS Han, DS Kim., “Magnetic levitation”, Springer Tracts on Transportation and Traffic. Springer, 2016.

[4] Alaxandru A., George M., “Position Control of a Bidirectional Moving Magnet Actuator Based on Contactless Hall-Effect Transducer”, in the 9th International Symposium on Advanced topics in Electrical Engineering, Romania, May 7-9, 2015.

[5] William G. Hurley., Werner H. W., “Electromagnetic Design of a Magnetic Suspension System”, IEEE Transactions on Education Vol. 40. No 2, May 1997.

[6] M. T. Thornpson., “Eddy Current Magnetic Levitation”, IEEE POTENTIALS, 2000.

[7] T. Hagglund และ KJ Astrom. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd edition, Instrument Society of America, 1995.

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17

17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ระบบตรวจวัดและบันทึกข้อมูลสำหรับจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นระบบไฟฟ้า

Monitoring and Data Logging System for Electrically Converted Motorcycles

พีรธัช มากปรี* ณัฐวัตร รุ่งเรืองพินิจ ญายนันท์ สุขนพกิจ จักรี แซ่ซิ้ม ประภวิษณุ์ ปานมี และวราห์ สาตะระ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

E-mail: s6303041622056@email.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบเก็บข้อมูลสำหรับติดตามค่าพารามิเตอร์ของจักรยานยนต์ที่ดัดแปลงเป็นระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า โดยใช้ Arduino UNO R4 WiFi ควบคุมการวัดแรงดัน กระแส อุณหภูมิ ความเร็วรอบล้อ ความเร็วรถ และระยะทาง พร้อมส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านแอป Blynk และบันทึกลง Micro SD Card จากการทดสอบจริง รถสามารถวิ่งได้ 68.82 กิโลเมตร ภายใน 150 นาที แรงดันแบตเตอรี่ลดจาก 80V เหลือ 67V อุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มจาก 31°C เป็น 46°C ระบบสามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างแม่นยำและเสถียร เหมาะสำหรับการวิเคราะห์เพื่อพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบบันทึกข้อมูล, จักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า

Abstract

This paper presents the development of a data acquisition system for monitoring key parameters of a motorcycle converted to an electric propulsion system. The system uses an Arduino UNO R4 WiFi to measure voltage, current, temperature, wheel RPM, speed, and distance, with real-time data sent via the Blynk application and recorded on a Micro SD card. In testing, the motorcycle traveled 68.82 kilometers in 150 minutes. Battery voltage dropped from 80V to 67V, and battery temperature increased from 31°C to 46°C. The system operated reliably and accurately, supporting future electric vehicle development.

Keywords: Data Logging System, Electrically Converted Motorcycles

1. บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อม และต้นทุนพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้เกิดแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานของยานพาหนะจากเชื้อเพลิงฟอสซิลไปสู่พลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะในประเทศไทยที่รถจักรยานยนต์ยังคงเป็นยานพาหนะหลัก การใช้รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นทางเลือกที่ตอบโจทย์ด้านความประหยัด โครงงานนี้จึงได้พัฒนาระบบตรวจวัดและบันทึกข้อมูล เพื่อใช้ตรวจวัดค่าพารามิเตอร์สำคัญทางไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแส ความเร็วรอบมอเตอร์ ความเร็วรถ ระยะทาง และอุณหภูมิแบตเตอรี่ โดยระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่สามารถเชื่อมต่อแบบไร้สาย พร้อมส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ไปยังแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะของรถผ่านสมาร์ตโฟน อีกทั้งยังสามารถบันทึกข้อมูลลง Micro SD เพื่อนำไปวิเคราะห์และปรับปรุงสมรรถนะ

การผสานเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เข้ากับระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าจึงเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาระบบการจัดการพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพของยานพาหนะไฟฟ้า และเปิดโอกาสในการต่อยอดสู่นวัตกรรมการคมนาคมอัจฉริยะในอนาคต

2. รถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า

การดัดแปลงรถจักรยานยนต์ให้เป็นระบบขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงและติดตั้งอุปกรณ์หลายส่วนให้สามารถทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เริ่มจาก มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) ซึ่งติดตั้งแทนดุมล้อหลัง ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนรถ ทำงานผ่านชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Speed Controller; EM100) ที่รับสัญญาณจากคันเร่งไฟฟ้า และควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ โดยมีแหล่งพลังงานคือ แบตเตอรี่ลิเธียม NMC (72V 50Ah) ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้ทั้งระบบ นอกจากนี้ยังติดตั้ง DC-DC Converter สำหรับแปลงแรงดัน 72V เป็น 12V เพื่อจ่ายไฟให้ระบบ ส่องสว่าง และระบบควบคุมอื่นๆ พร้อมกับ เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ระบบเบรกและสวิงอาร์มถูกปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการติดตั้งมอเตอร์ใหม่ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 จักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า

3. ระบบตรวจวัด และบันทึกข้อมูล

ประกอบด้วยเซนเซอร์ต่างๆ ได้แก่ เซนเซอร์วัดแรงดันกระแสไฟฟ้า ความเร็วรถ ความเร็วรอบมอเตอร์ และอุณหภูมิ โดยจากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2 รถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้านี้ใช้แบตเตอรี่แรงดัน 72V เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก โดยจ่ายไฟให้กับ BLDC Motor ผ่านชุดควบคุมความเร็ว EM100 มี DC-DC Converter ลดแรงดันจาก 72V เป็น 12V สำหรับจ่ายให้กับระบบส่องสว่างของรถ และใช้ DC-DC Converter ลดแรงดัน 12V เป็น 5V สำหรับจ่ายให้เซนเซอร์ และบอร์ด Arduino R4 ใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า เซนเซอร์วัดรอบมอเตอร์ และใช้วงจร Differential Amplifier เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้า 72V และลดทอนให้เหมาะสมเข้าสู่ Arduino R4 มีหน้าที่ประมวลผลและส่งข้อมูลไปยังระบบแสดงผลแบบไร้สายผ่านเครือข่าย WiFi โดยข้อมูลถูกบันทึกลง Data Logger Shield เพื่อการวิเคราะห์ย้อนหลัง และระบบสามารถติดตามสมรรถนะของรถได้แบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์ม IoT เช่น Blynk ได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

รูปที่ 3 เป็นชุดวงจรสำหรับเก็บข้อมูลของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง โดยใช้ Arduino R4 WiFi ร่วมกับ Data Logger Shield ทำหน้าที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ต่าง ๆ บันทึกข้อมูลลง SD Card พร้อมส่งข้อมูลผ่าน WiFi สู่ระบบแสดงผลแบบ IoT ในวงจรมี โมดูลวัดอุณหภูมิ MAX6675 วัดอุณหภูมิของแบตเตอร์รี่ด้วยเทอร์โมคัปเปิล โมดูลวัดกระแสไฟฟ้า ACS758LCB-100B โมดูลลดแรงดัน LM2596HVS ใช้ลดแรงดันไฟฟ้าจาก 12V เป็น 5V เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์กับบอร์ด Arduino วงจรขยายสัญญาณผลต่างเพื่อใช้วัดแรงดันแบตเตอรี่เทอร์มินอลสำหรับเชื่อมต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายหรือเซนเซอร์ภายนอก

4. ผลการทดสอบของระบบเก็บข้อมูล

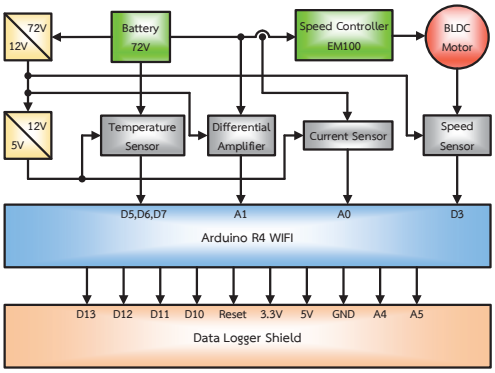
ระบบบันทึกข้อมูลวัด กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า ความเร็วรถ ความเร็วล้อ และอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เพื่อนำมาวิเคราะห์การทำงานของระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้า ผ่านการทดสอบการขับขี่ตามเส้นทางจริง กำหนดเส้นทางรถวิ่งดังรูปที่ 4 ใน 1 รอบมีระยะทางประมาณ 0.9 km ทำการทดสอบตั้งแต่แบตเตอรี่เต็มพิกัด จนแบตเตอรี่คายประจุหมด พร้อมทั้งบันทึกผลการทดสอบทุกๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 150 นาที ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังนี้

รูปที่ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า ความเร็วรถ และความเร็วรอบมอเตอร์ ในช่วงเวลา T1 ถึง T2 เป็นช่วงที่มีการใช้ความเร็วสูงขณะขับขี่ทำให้รูปกราฟในช่วงนี้มีค่ากระแสไฟฟ้า ความเร็วรถ และความเร็วรอบมอเตอร์ที่มากกว่าช่วงอื่น ช่วงเวลา T3 ถึง T4 และ T5 ถึง T6 เป็นช่วงเวลาของการพักการทดสอบ และตรวจเช็กระบบเก็บข้อมูล ช่วงเวลา T7 เป็นต้นไป เป็นช่วงที่แบตเตอรี่คายประจุใกล้หมด ส่งผลทำให้แบตเตอรี่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงส่งผลให้รูปกราฟความเร็วรถ และความเร็วรอบมอเตอร์ลดลง

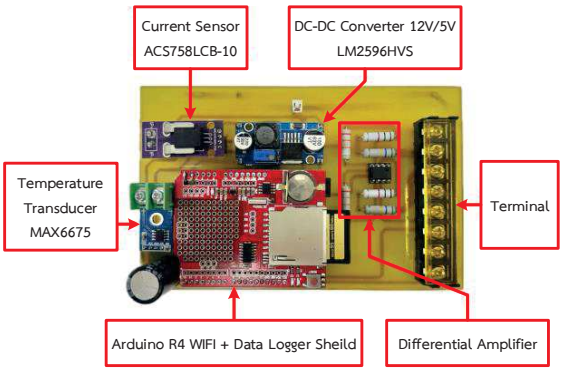
รูปที่ 6 นำกราฟของรูปที่ 5 มาขยายช่วงระยะเวลาหนึ่งเป็นระยะเวลา 90 วินาที สังเกตเห็นว่าเมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ทำให้เกิดความเร่งความเร็วรอบมอเตอร์ในการสร้างแรงขับเคลื่อนทางกล ทำให้ความเร็วรถเพิ่มขึ้น

รูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ช่วงแรกของการเก็บผลทดสอบพบว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่า 80V อุณหภูมิของแบตเตอรี่เริ่มต้น 31°C สังเกตุที่ช่วงเวลา T1 อุณหภูมิของแบตเตอรี่จะสูงถึง 38°C ก่อนที่จะคงที่ไประยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากช่วงแรกของการทดสอบจะมีการใช้ความเร็วสูง ทำให้มอเตอร์มีการดึงกระแสไฟฟ้าในปริมาณมากจากแบตเตอรี่ ช่วงเวลา T2 เป็นช่วงที่กระแสไฟฟ้าลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นช่วงที่รถมีความเร็วลดลง จากแบตเตอรี่คายประจุไฟฟ้าจนใกล้หมดมี ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้า 70.33V ส่วนในช่วงเวลา T3 อุณหภูมิจะสูงขึ้นมาในชั่วขณะหนึ่งก่อนจะลดต่ำลงไป ซึ่งจะสูงขึ้นไปถึง 44°C และในช่วงเวลา T4 เป็นช่วงที่อุณหภูมิมีค่าสูงที่สุด 48.25°C ในช่วงนั้นแบตเตอรี่มีแรงดันขนาด 68.5V โดยแบตเตอรี่จะหยุดการคายประจุไฟฟ้า หรือหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้าเมื่อแบตเตอรี่มีแรงดันขนาด 67V

รูปที่ 8 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และระยะทาง ซึ่งหลังผ่านการทดสอบพบว่ามีระยะทางทั้งสิ้น 68.82 กิโลเมตร โดยเป็นการทดสอบตามเส้นทางที่กำหนดตามรูปที่ 5 เป็นจำนวนทั้งหมด ประมาณ 76 รอบ



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมวงจรตรวจวัด และบันทึกข้อมูล

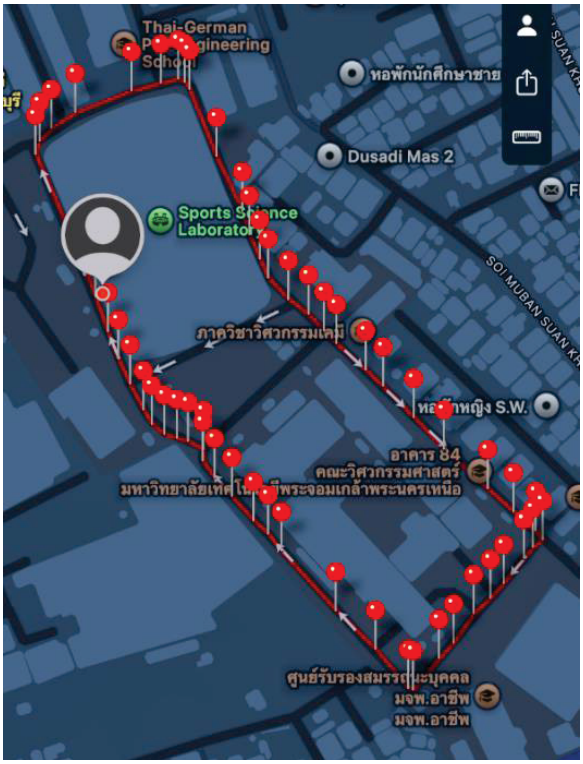


รูปที่ 3 วงจรระบบตรวจวัด และบันทึกข้อมูล

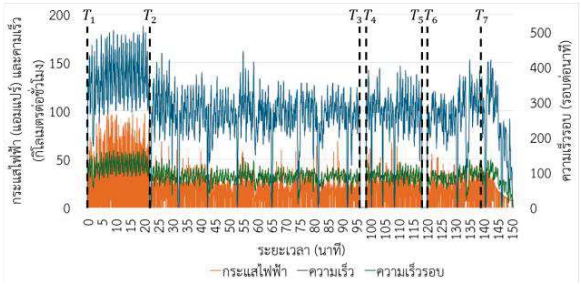
ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 การขับขี่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ได้ติดตั้งระบบตรวจวัดและเก็บข้อมูล พบว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลดลงจาก 80V เหลือ 67V หลังจากวิ่งไปเป็นระยะทางรวม 68.82km ภายในระยะเวลา 150 นาที ที่อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นจาก 31˚C เป็น 46 ˚C เห็นได้ว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพตลอดการใช้งานจริง โดยข้อมูลที่บันทึกได้ช่วยสะท้อนถึงสมรรถนะของระบบขับเคลื่อน และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้งานของรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิผล

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบการขับขี่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า

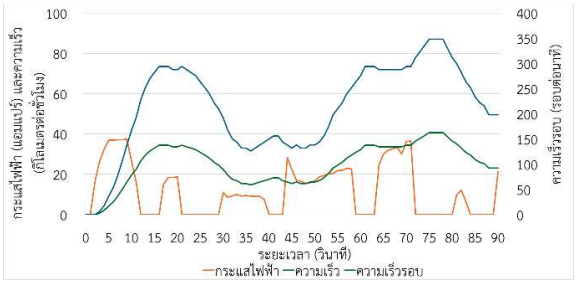
ค่าพารามิเตอร์	เริ่มต้น	สิ้นสุด
แรงดันไฟฟ้า (V)	80	67
อุณหภูมิ (°C)	31	46
ระยะทาง (km)	0	68.82
ระยะเวลา (min)	0	150



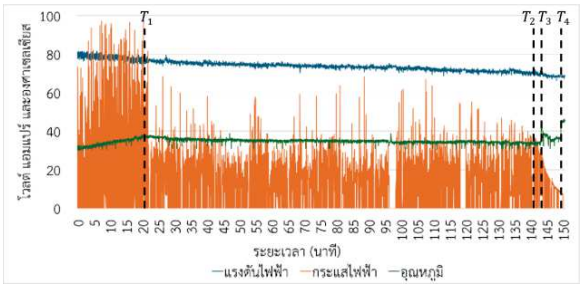
รูปที่ 4 เส้นทางการทดสอบการขับขี่



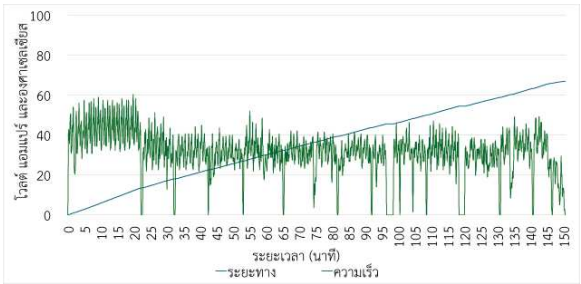
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบ



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเร็วรอบ (ขยาย)



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและระยะทาง



รูปที่ 9 หน้าการแสดงผลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ทโฟน

เพื่อให้สามารถดูผลแบบเรียลไทม์ จึงใช้แอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความเร็วรอบ ความเร็วและระยะทาง ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ทโฟน เมื่อการทดสอบเกิดปัญหาสามารถแก้ไขได้ทันที ซึ่งแสดงตัวอย่างการแสดงผลค่าพารามิเตอร์ผ่านแอปพลิเคชันบลิงค์ดังรูปที่ 9

5. สรุป

ผลการทดสอบการขับขี่รถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบตรวจวัด และเก็บข้อมูลแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำงานของระบบที่พัฒนาไว้ โดยระบบสามารถบันทึกค่าพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจาก 80V เหลือ 67V อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 31°C เป็น 46 °C ตลอดระยะเวลาการขับขี่ 150 นาที และระยะทางรวม 68.82 km. ข้อมูลทั้งหมดถูกรวบรวมผ่านบอร์ด Arduino UNO R4 WiFi และส่งแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแอป Blynk พร้อมบันทึกลง Micro SD Card เพื่อใช้วิเคราะห์การทำงานของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบตรวจวัดสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้งานกับระบบอื่น ๆ ที่คล้ายกันในอนาคตได้

เอกสารอ้างอิง

[1] Malthe Thingvad, Lisa Calearo, Andreas Thingvad, Rasmus Viskinde and Mattia Marinelli, “Characterization of NMC Lithium-ion Battery Degradation for Improved Online State Estimation,” Department of Electrical Engineering Technical University of Denmark (DTU), Risø campus, Roskilde, Denmark, September, 2020.

[2] ชนัญญา บัวใหญ่ ธรรมศนภนต์ ทุ่งคาใน และเม็ดทราย สมบุญ. (2560). ชุดทดลองควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

[3] M.Jaya lakshmi, C.Sadia Sameen, D.Maneesha, G.Dharani and K.Farhat Mubeena “Smart Home using Blynk App Based On IOT,” Department of ECE, Ravindra College of Engineering for Women, Kurnool, Andhra Pradesh, India, April, 2023.

[4] Achcha Vaishnavi, “Aduino Based Data Logger For Environment Monitoring,” Department of ECE, Kakatiya Institute of Technology and Science, Waraangal, India.



พีรธัช มากปรี กำลังศึกษาระดับ วศ.บ. (ไฟฟ้า)
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า



ณัฐวัตร รุ่งเรืองพินิจ กำลังศึกษาระดับ วศ.บ. (ไฟฟ้า)
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า



ญายนันท์ สุขนพกิจ กำลังศึกษาระดับ วศ.บ. (ไฟฟ้า)
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า



จักรี แซ่ซิ้ม กำลังศึกษาระดับ วศ.บ. (ไฟฟ้า) ภาควิชา
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า



ประภาวิษณุ์ ปานมี กำลังศึกษาระดับ วศ.บ. (ไฟฟ้า)
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และรถจักรยานยนต์ดัดแปลงระบบขับเคลื่อนเป็นไฟฟ้า



วราห์ สาตะระ อาจารย์ประจาภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า
งานวิจัยที่สนใจ : อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบไฟฟ้า 1-เฟส สำหรับที่พักอาศัยทั่วไป ตามประเภทผู้ใช้งานของการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

Design and development of a 1-phase electrical system design program for typical residential via using types of consumers of the Metropolitan Electricity Authority and the Provincial Electricity Authority

พสิษฐ์ สุวรรณกิงคาร[1*] สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ[1] มนัญญา อำนวย[1] ชินวัตร อมรรัตนานุเคราะห์[1] และ ขวัญชนก ศรีวัลลภ[2]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์: 02–836-3000 ต่อ 4150, 4151 E-mail: pasist.s@rmutp.ac.th*
[2]3 Green KP Co., Ltd.
123 ซอยเทศบาลรังรักษ์เหนือ ถนนประชาชื่น แขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์: 080-044-1915 E-mail: 3greenkp@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบไฟฟ้าพื้นฐานที่สอดคล้องกับมาตรฐานและกฎกระทรวง เพื่อให้มั่นใจว่าการออกแบบระบบไฟฟ้าในที่พักอาศัยทั่วไปมีความปลอดภัย โปรแกรมนี้รองรับการออกแบบระบบไฟฟ้า 1-เฟส สำหรับบ้านพักอาศัยที่ใช้บริการจากการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าและเลือกชนิดขนาดอุปกรณ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน รองรับประเภทผู้ใช้งานและขนาดมิเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงตู้โหลดไฟฟ้าและสายไฟฟ้าหลากหลายประเภท โปรแกรมนี้ใช้งานง่าย ไม่ต้องดาวน์โหลดหรือติดตั้ง และสามารถใช้งานได้ทุกที่ มีการแสดงผลและการจัดเก็บข้อมูลที่เข้าใจง่าย รองรับการคำนวณแบบออนไลน์และส่งผลลัพธ์ไปยังอีเมล ขอบเขตการวิจัยรวมถึงการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับที่พักอาศัยทั่วไปตั้งแต่ 1-7 ชั้น มีความสูงอาคารไม่เกิน 23 เมตร และพื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร โปรแกรมพัฒนาบนแพลตฟอร์ม Google Workspace และ Microsoft Office ผลการวิจัยพบว่าโปรแกรมนี้สามารถเพิ่มความปลอดภัยและประสิทธิภาพในการออกแบบระบบไฟฟ้า เพิ่มความสะดวกในการใช้งาน และพัฒนาทักษะและความรู้ในด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

คำสำคัญ: ระบบไฟฟ้า 1-เฟส, ที่พักอาศัยทั่วไป, มาตรฐานระบบไฟฟ้า, Google Workspace, Microsoft Office

Abstract

This research aims to design and develop a basic electrical system design program that complies with relevant standards and ministerial regulations to ensure electrical system design safety in general residential buildings. The program supports the design of single-phase electrical systems for residences serviced by the Metropolitan Electricity Authority and the Provincial Electricity Authority. It can calculate electrical power and select appropriate equipment types and sizes according to standards. It accommodates various user types and meter sizes, including electrical load centres and wiring installations. The program is user-friendly, requiring no download or installation, and can be used anywhere. It features easy-to-understand data display and storage, supports online calculations, and can send results via email. According to relevant ministerial regulations, the research scope includes designing and developing a program for general residential buildings ranging from 1 to 7 floors, with a building height not exceeding 23 meters and a total usable area of all floors not exceeding 10,000 square meters. The program will be developed on Google Workspace and Microsoft Office platforms to support online calculations and email result delivery. The research findings indicate that the proposed program can enhance the safety and efficiency of electrical system design, improve user convenience, and develop skills and knowledge in electrical engineering. This program will be a valuable tool for electrical system designers and home inspectors, ensuring more efficient and safer electrical system design and inspection.

Keywords: 1 -phase electrical system, Typical residential, Electrical system standards, Google Workspace, Microsoft Office

1. บทนำ

บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบไฟฟ้า 1-เฟส สำหรับที่พักอาศัยทั่วไป โดยมีเป้าหมายเพื่อสนับสนุนวิศวกร ผู้รับเหมา และเจ้าของที่พักอาศัยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ โปรแกรมนี้ช่วยให้สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานก่อนนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ยังสามารถประเมินประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าให้สอดคล้องกับมาตรฐานการติดตั้ง ทำให้มั่นใจได้ถึงความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของระบบ การพัฒนาโปรแกรมนี้ยังช่วยลดเวลาในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ปรับปรุงกระบวนการออกแบบ และลดความเสียหายจากการสั่งอุปกรณ์ที่ไม่สอดคล้องตามมาตรฐาน ซึ่งช่วยลดความผิดพลาดและประหยัดทรัพยากรในการติดตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ บทความนี้จึงมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพ ความน่าเชื่อถือ และความปลอดภัยของระบบไฟฟ้าในที่พักอาศัยทั่วไป โดยเฉพาะในบริบทของการไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

2. วัตถุประสงค์

2.1 การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมที่สนับสนุนวิศวกรและผู้รับเหมา โดยสามารถวิเคราะห์การออกแบบระบบไฟฟ้าให้สอดคล้องกับมาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้า

2.2 โปรแกรมที่นำเสนอสามารถตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบก่อนนำไปใช้งานจริงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดความผิดพลาด และเพิ่มความมั่นใจทางด้านความปลอดภัยให้กับเจ้าของบ้าน วิศวกร และผู้รับเหมาได้

2.3 โปรแกรมที่นำเสนอสามารถลดเวลาและทรัพยากรในการออกแบบ ตลอดจนลดความเสียหายจากการสั่งอุปกรณ์ไม่สอดคล้องตามมาตรฐาน

3. ขอบเขต

3.1 โปรแกรมที่นำเสนอสามารถออกแบบระบบไฟฟ้า 1-เฟส สำหรับที่พักอาศัยทั่วไป ตั้งแต่ 1-7 ชั้น อาคารสูงไม่เกิน 23 เมตร และรวมพื้นที่ใช้สอยรวมไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร โดยคำนึงถึงมาตรฐานและกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้อง เพื่อมั่นใจของความปลอดภัย

3.2 โปรแกรมที่นำเสนอสามารถคำนวณและเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เหมาะสมตามมาตรฐาน รองรับประเภทผู้ใช้งานและขนาดมิเตอร์ไฟฟ้าต่างๆ รวมถึงตู้โหลดไฟฟ้าและสายไฟฟ้าหลากหลายประเภทและรูปแบบการติดตั้งสายไฟฟ้าต่างๆ

3.3. โปรแกรมที่นำเสนอมีการแสดงผลและการจัดเก็บข้อมูลที่เข้าใจง่าย รองรับการคำนวณแบบออนไลน์สามารถใช้งานได้ทุกที่ และสามารถส่งผลลัพธ์ไปยังอีเมลได้ ไม่ต้องดาวน์โหลดหรือติดตั้ง

4. Platform Google Workspace และ Microsoft Office

4.1 การพัฒนาโปรแกรมจาก Platform Google Workspace

4.1.1 รองรับการทำงานร่วมกันแบบเรียลไทม์ เนื่องจากมีเครื่องมือเช่น Google Sheets และ Docs ที่สามารถกรอกข้อมูลพร้อมกันได้แบบเรียลไทม์ ลดปัญหาการกรอกข้อมูลหลายครั้ง [1]

4.1.2 รองรับการเข้าถึงแบบฟอร์มหรือข้อมูลได้จากทุกที่ ทำให้การทำงานมีความยืดหยุ่นและสะดวกสบายมากขึ้นเนื่องจากเป็นระบบคลาวด์ ผู้ใช้สามารถเข้าถึงไฟล์และแอปพลิเคชันได้จากทุกอุปกรณ์ เช่น Windows, Mac, Linux, Android, iOS ฯลฯ [1]

4.1.3 สามารถทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันภายนอกอื่นๆ ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพและเป็นระบบมากขึ้น เช่น PDF ฯลฯ [1]

4.1.4 มีมาตรการด้านความปลอดภัยและการควบคุมข้อมูลสูง เช่น การเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบสิทธิ์การเข้าถึง ตลอดจนสามารถควบคุมและปรับแต่งข้อมูลได้ตามความต้องการ [1]

4.2 การพัฒนาโปรแกรมจาก Platform Microsoft Office

4.2.1 มีโปรแกรมที่มีฟังก์ชันหลากหลาย เช่น Word, Excel, PowerPoint, Outlook, OneNote, Access และ Publisher ซึ่งช่วยในการสร้างเอกสาร วิเคราะห์ข้อมูล และนำเสนอได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2]

4.2.2 โปรแกรมใน Microsoft Office สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างลงตัว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การแทรกตาราง Excel ลงในเอกสาร Word หรือการนำข้อมูลจาก Excel ไปสร้างแผนภูมิใน PowerPoint [2]

4.2.3 Microsoft Office สามารถใช้งานแบบออฟไลน์ได้เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับ Google Workspace ช่วยให้การทำงานไม่หยุดชะงักเมื่อไม่มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต [2]

4.2.4 ความปลอดภัยและการควบคุมข้อมูล: Microsoft Office มีระบบรักษาความปลอดภัยที่แข็งแกร่ง เช่น การเข้ารหัสข้อมูลและการตรวจสอบสิทธิ์การเข้าถึง นอกจากนี้ยังมีการสำรองข้อมูลอัตโนมัติและการอัปเดตซอฟต์แวร์จากส่วนกลาง [2]

5. อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ของ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

ในแต่ละเดือน ค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้าเรียกเก็บจากผู้ใช้ไฟฟ้าประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ ค่าไฟฟ้าฐาน ค่าไฟฟ้าผันแปร (ค่า Ft) และภาษีมูลค่าเพิ่ม [3] และ [4]

5.1 ค่าไฟฟ้าฐาน คำนวณจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างโรงไฟฟ้า ระบบสายส่ง ค่าเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และการซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนและประเทศเพื่อนบ้าน โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รวมถึงค่าใช้จ่ายระบบสายจำหน่ายและการค้าปลีกของการไฟฟ้าฝ่ายจาก กฟน. และ กฟภ. ภายใต้สมมติฐาน

ความต้องการใช้ไฟฟ้า ราคาเชื้อเพลิง อัตราแลกเปลี่ยน อัตราเงินเฟ้อ และการปรับปรุงประสิทธิภาพของกิจการไฟฟ้า

5.2 ค่า Ft ถูกกำหนดขึ้นเพื่อสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนที่อยู่เหนือการควบคุมของการไฟฟ้า เช่น ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง ค่าซื้อไฟฟ้า และผลกระทบจากนโยบายของรัฐบาลที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าไฟฟ้าฐาน การปรับค่า Ft อยู่ภายใต้การพิจารณาของคณะกรรมการการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) โดยมีการพิจารณาปรับค่า Ft ทุก 4 เดือน

5.3 ภาษีมูลค่าเพิ่ม เป็นภาษีที่เรียกเก็บจากการใช้ไฟฟ้า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่าไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องชำระในแต่ละเดือน

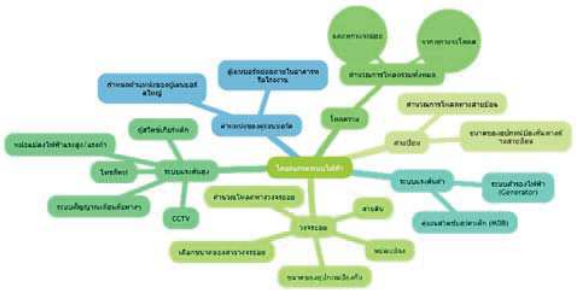
ทั้งนี้การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเลือกการพัฒนาการออกแบบระบบไฟฟ้าสำหรับที่พักอาศัยทั่วไปตั้งแต่ 1-7 ชั้น มีความสูงอาคารไม่เกิน 23 เมตร และพื้นที่ใช้สอยไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร เนื่องจากปริมาณของที่พักอาศัยมีอัตราการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับอัตราค่าไฟฟ้าของ กฟน. และ กฟภ. ปี พ.ศ. 2568 ประเภทบ้านอยู่อาศัย ดังแสดงในตารางที่ 1 [3] และ [4]

ตารางที่ 1 อัตราค่าไฟฟ้าของ กฟน. และ กฟภ. ปี พ.ศ. 2568

ประเภทลูกค้า (กฟน.) และ (กฟภ.)	รายละเอียด
บ้านอยู่อาศัย (3.2484 บาท/หน่วย)	ลูกค้าที่ใช้ไฟฟ้าในที่พักอาศัยทั่วไป
กิจการขนาดเล็ก (4.2218 บาท/หน่วย)	ธุรกิจขนาดเล็กที่ใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่ไม่มาก
กิจการขนาดกลาง (4.4217 บาท/หน่วย)	ธุรกิจขนาดกลางที่มีการใช้ไฟฟ้าในปริมาณปานกลาง
กิจการขนาดใหญ่ (4.4217 บาท/หน่วย)	ธุรกิจขนาดใหญ่ที่มีการใช้ไฟฟ้าในปริมาณมาก
กิจการเฉพาะอย่าง (4.4217 บาท/หน่วย)	ธุรกิจที่มีลักษณะเฉพาะและมีการใช้ไฟฟ้าในรูปแบบเฉพาะ
องค์กรไม่แสวงหากำไร (3.2484 บาท/หน่วย)	องค์กรที่ไม่มุ่งหวังผลกำไรและใช้ไฟฟ้าในปริมาณที่จำกัด
สูบน้ำเพื่อการเกษตร (2.8432 บาท/หน่วย)	การใช้ไฟฟ้าในการสูบน้ำเพื่อการเกษตร
ไฟฟ้าชั่วคราว (4.4217 บาท/หน่วย)	การใช้ไฟฟ้าชั่วคราวสำหรับกิจกรรมหรือโครงการเฉพาะ
สถานีอัดประจุไฟฟ้า (2.6369 บาท/หน่วย)	สถานีที่ให้บริการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานพาหนะไฟฟ้า

6. แนวทางการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

โปรแกรมที่นำเสนอมีนำมาตรฐานงานติดตั้งระบบไฟฟ้ามาพัฒนาในการออกแบบระบบ และให้สอดคล้องกับลักษณะของประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า โดยพิจารณามาตรฐานการติดตั้งระบบไฟฟ้าในประเทศไทยตามเทคโนโลยีและมาตรฐานใหม่ เน้นการใช้งานสายไฟฟ้าตามมาตรฐาน รวมถึงการติดตั้งและแบบงานระบบไฟฟ้าเบื้องต้น ให้มีความปลอดภัยอย่างมืออาชีพ [5-18]

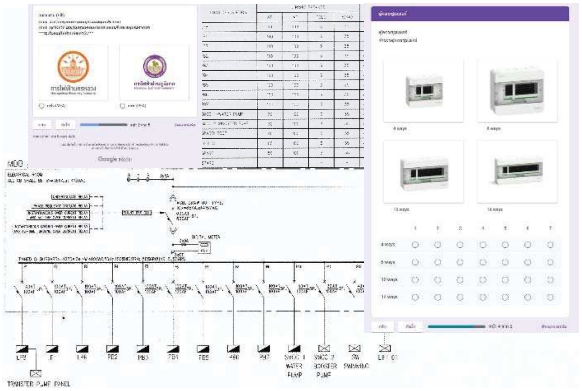


รูปที่ 1 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

โดยในรูปที่ 1 อธิบายขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า มีการเริ่มจากคำนวณโหลด จากนั้นกำหนดวงจรย่อย เลือกขนาดของสายวงจรย่อย, และมีการคำนวณการโหลดทางสายป้อน ขนาดของอุปกรณ์ป้องกันทางด้านสายป้อน และการกำหนดตำแหน่งของตู้เมนบอร์ดใหญ่และย่อยภายในที่พักอาศัย [5-18]

7. ผลการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนา

พบว่าโปรแกรมที่พัฒนานั้น มีขั้นตอนกรอกข้อมูลที่ง่ายโดยเพียงนำข้อมูลจากบิลค่าไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้า กรอกบน Google form จากนั้นข้อมูลจะเก็บบันทึกที่ Google sheet และ/หรือ Excel เพื่อทำการคำนวณออกแบบระบบไฟฟ้าตามมาตรฐานอัตโนมัติ และการคำนวณจะถูกส่งไป Google docs เพื่อแสดงผลและแจ้งผลลัพธ์ PDF พร้อมการแจ้งเตือนผ่านระบบ e-mail ดังแสดงในรูปที่ 2 อธิบายหน้าตัวอย่างฟอร์มการใช้งานระหว่างในเขตพื้นที่ กฟน. และ กฟภ. [5-18]



รูปที่ 2 แบบฟอร์มละผลการออกแบบระบบไฟฟ้า

8. สรุป

ในปัจจุบันที่ประชากรเพิ่มขึ้นและความต้องการในการสร้างที่อยู่อาศัยมีมากขึ้น ข้อมูลสถิติล่าสุดจาก กฟน. และ กฟภ. แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นประเภทบ้านอยู่อาศัย การออกแบบระบบไฟฟ้าของที่พักอาศัยจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับติดตั้งให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางไฟฟ้า เพื่อความปลอดภัยและการใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพอย่างยั่งยืน ซึ่งรองรับระบบไฟฟ้า 1-เฟส

สำหรับบ้านพักอาศัยตั้งแต่ 1-7 ชั้น มีความสูงอาคารไม่เกิน 23 เมตร และรวมพื้นที่ใช้สอยทุกชั้นไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร มีขนาดมิเตอร์ไฟฟ้าตั้งแต่ 5 (15)A, 15 (45)A และ 30 (100)A

โดยโปรแกรมสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าและเลือกชนิดขนาดอุปกรณ์ที่เหมาะสมตามมาตรฐาน ที่สามารถรองรับตู้โหลดไฟฟ้าของที่พักอาศัยทั่วไป ตั้งแต่ 4 ช่อง, 6 ช่อง, 10 ช่อง และ 14 ช่องได้ และรองรับสายไฟฟ้าประเภท VAF, VCT, THW, NYY และ CV โดยมีลักษณะรูปแบบการติดตั้งสายไฟฟ้าในลักษณะเดินลอย เดินท่อร้อยสาย และเดินในราง ซึ่งการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมบนแพลตฟอร์ม Google Workspace และ Microsoft Office เพื่อรองรับการคำนวณแบบออนไลน์และส่งผลเข้าอีเมล จากผลการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นพบว่าสามารถออกแบบระบบไฟฟ้าในที่พักอาศัยเป็นไปตามมาตรฐานและกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงจากอุบัติเหตุไฟฟ้าและปัญหาทางเทคนิคที่อาจเกิดขึ้น เพิ่มความสะดวกในการใช้งานโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ไม่ต้องดาวน์โหลดหรือติดตั้ง สามารถใช้งานได้ทุกที่ และรองรับการคำนวณแบบออนไลน์ ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถออกแบบและตรวจสอบระบบไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

9. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางด้านข้อมูล เครื่องมือ และการเข้าร่วมการประชุมวิชาการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งเป็นการสนับสนุนอันสำคัญในการดำเนินการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมฯ ทั้งนี้ขอขอบคุณบริษัท 3 Green KP ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลและทรัพยากรที่จำเป็นในการพัฒนาโปรแกรมนี้ ความร่วมมือและการสนับสนุนจากบริษัทเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในทุกขั้นตอนของการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] Google. (2025). Google Workspace: Secure Online Productivity & Collaboration Tools. Retrieved from Google Workspace.

[2] Microsoft. (2025). Microsoft Office: Productivity Tools for Home & Office. Retrieved from Microsoft Office.

[3] Metropolitan Electricity Authority. (n.d.). อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ. Retrieved January 11, 2025, from https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other

[4] Provincial Electricity Authority. (n.d.). Tariff. Retrieved January 11, 2025, from https://www.pea.co.th/our-services/tariff

[5] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2564). มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2564. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.

[6] ลือชัย ทองนิล. (2564). คู่มือการติดตั้งระบบไฟฟ้าอย่างมืออาชีพ ฉบับปรับปรุงตามมาตรฐานฯใหม่ 2564. กรุงเทพฯ: บริษัท สายไฟฟ้าไทย-ยาซากิ จำกัด.

[7] ลือชัย ทองนิล. (2564). คู่มือการติดตั้งระบบไฟฟ้า (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: บริษัท กิจเจริญ เอ็นจิเนียริ่ง อีเลคทริค จำกัด (มหาชน).

[8] ศุลี บรรจงจิตร. (2563). เฟิลปส์ ดอด์จ คู่มือการออกแบบระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: บริษัท เฟิลปส์ ดอด์จ อินเตอร์เนชั่นแนล (ไทยแลนด์) จำกัด.

[9] ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์. (2564). คู่มือการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด.

[10] พสิษฐ์ สุวรรณกิงคาร. (2566) 'เอกสารประกอบการสอนวิชาการออกแบบระบบไฟฟ้า'. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

[11] Momoh, J. A. (1995). Electrical Engineering Department Design Manual Handbook. Howard University.

[12] McConnell, R. L., Cooley, W. L., & Middleton, N. T. (1993). Electrical Engineering Design Compendium. Addison-Wesley Pub. Co.

[13] International Electrotechnical Commission. (2005). IEC 60364-1: Low-voltage electrical installations - Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. Geneva: IEC.

[14] International Electrotechnical Commission. (2001). IEC 60364-4: Low-voltage electrical installations - Part 4: Protection for safety. Geneva: IEC.

[15] International Electrotechnical Commission. (2001). IEC 60364-5: Low-voltage electrical installations - Part 5: Selection and erection of electrical equipment. Geneva: IEC.

[16] International Electrotechnical Commission. (2006). IEC 60364-7: Low-voltage electrical installations - Part 7: Requirements for special installations or locations. Geneva: IEC.

[17] British Standards Institution. (2022). BS 7671: Requirements for Electrical Installations (IET Wiring Regulations). London: BSI.

[18] National Fire Protection Association. (2020). NFPA 70: National Electrical Code. Quincy, MA: National Fire Protection Association.

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้น ตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

Design and development of a preliminary grounding system calculation program according to IEEE-80 standards via using Microsoft Excel

พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร[1*] ชินวัตร อมรรัตนานุเคราะห์[1] มนัญญา อำนวย[1] ชนาธิป ใจเฉื่อย[1] และ ขวัญชนก ศรีวัลลภ[2]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์: 02–836-3000 ต่อ 4150, 4151 E-mail: pasist.s@rmutp.ac.th*
[2]3 Green KP Co., Ltd.
123 ซอยเทศบาลรังรักษ์เหนือ ถนนประชาชื่น แขวงลาดยาว เขตจตุจักรกรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์: 080-044-1915 E-mail: 3greenkp@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายดินในงานวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้วิศวกรสามารถประเมินและออกแบบระบบสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามมาตรฐาน IEEE-80 วิธีการพัฒนาโปรแกรมนี้ประกอบด้วยการศึกษามาตรฐาน IEEE-80 อย่างละเอียดและนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาเป็นโปรแกรมคำนวณใน Microsoft Excel ผลลัพธ์ที่ได้คือโปรแกรมที่สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบระบบสายดินได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว เช่น ค่าความต้านทานของสายดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความปลอดภัยของระบบ นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การคำนวณ, ระบบสายดิน, มาตรฐาน IEEE-80, Microsoft Office

Abstract

This study involves designing and developing a tool to assist in the calculation and analysis of grounding systems in electrical engineering. The objective is to enable engineers to efficiently and accurately evaluate and design grounding systems by IEEE-80 standards, which are used to ensure the safety and performance of electrical systems. The development process includes a detailed study of IEEE-80 standards to understand the principles and calculation methods involved. The acquired information is then used to develop a calculation program in Microsoft Excel, utilising its functions and formulas to create a user-friendly tool. The resulting program can accurately and quickly calculate various necessary parameters for grounding system design, such as ground resistance, short-circuit current, and system safety. Additionally, the program can display calculation results in easy-to-understand graphical and tabular formats, allowing users to analyse and evaluate results effectively. This program aids electrical engineers in designing and assessing grounding systems efficiently and accurately according to IEEE-80 standards, thereby enhancing the safety and performance of electrical systems in various locations.

Keywords: Calculation, Grounding System, IEEE-80 Standards, Microsoft Office

1. บทนำ

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่สำคัญในงานวิศวกรรมไฟฟ้า ระบบสายดินมีบทบาทสำคัญในการทำให้ระบบไฟฟ้าทำงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ การออกแบบระบบสายดินที่ดีช่วยลดความเสี่ยงจากไฟฟ้าลัดวงจรและป้องกันความเสียหายต่ออุปกรณ์และผู้ใช้งาน

มาตรฐาน IEEE-80 กำหนดหลักการและวิธีการคำนวณที่จำเป็นในการออกแบบระบบสายดิน การใช้มาตรฐานนี้ช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินและออกแบบระบบสายดินได้อย่างถูกต้องและมี

ประสิทธิภาพ การพัฒนาโปรแกรมคำนวณใน Microsoft Excel ตามมาตรฐาน IEEE-80 ช่วยให้ผู้ใช้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายดินได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

โปรแกรมนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้วิศวกรไฟฟ้าใช้งานในการออกแบบและประเมินระบบสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องตามมาตรฐาน IEEE-80 โปรแกรมสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น เช่น ค่าความต้านทานของสายดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความปลอดภัยของระบบ นอกจากนี้ โปรแกรมยังแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานจากกระแสที่ไหลลงสู่ระบบสายดินหรือพื้นที่รอบ ๆ ทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดพร่อง ในสภาวะที่เกิดความผิดพร่อง กระแสที่ไหลลงสู่ระบบสายดินจะมีขนาดสูง ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันระหว่างเท้าทั้งสองข้าง (Step voltage) หรือระหว่างเท้าและแขน (Touch voltage) ซึ่งอาจทำให้เกิดช็อกหรือเสียชีวิตได้ การออกแบบระบบสายดินที่ดีจึงควรมีค่าความต้านทานอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การวิจัยนี้จะออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของดินชั้นเดียวตามมาตรฐาน IEEE-80

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ที่ช่วยให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถประเมินและออกแบบระบบสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง

2.2 เพื่อให้โปรแกรมสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบระบบสายดิน เช่น ค่าความต้านทานของสายดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความปลอดภัยของระบบ ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

2.3 เพื่อให้โปรแกรมสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ขอบเขต

3.1 การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จะครอบคลุมการศึกษามาตรฐาน IEEE-80 และการนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาเป็นโปรแกรมคำนวณที่ใช้งานได้ง่ายและสะดวกสำหรับวิศวกรไฟฟ้า

3.2 โปรแกรมจะสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการออกแบบระบบสายดิน เช่น ค่าความต้านทานของสายดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความปลอดภัยของระบบ โดยใช้ฟังก์ชันและสูตรคำนวณใน Microsoft Excel

3.3. โปรแกรมจะสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนำไปใช้ในการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานตามมาตรฐาน IEEE-80

4. Platform Microsoft Office สำหรับการพัฒนาโปรแกรมการออกแบบระบบดินของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE-80

การใช้โปรแกรมใน Microsoft Office เช่น Excel ในการสร้างเอกสาร วิเคราะห์ข้อมูล และนำเสนอได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการทำงานร่วมกันได้อย่างลงตัวและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินเบื้องต้นตามมาตรฐาน IEEE-80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้วิศวกรไฟฟ้าสามารถประเมินและออกแบบระบบสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้อง โดยมีรายละเอียดดังนี้

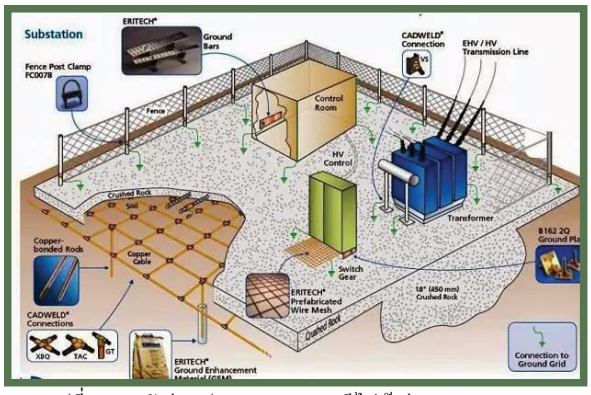
4.1 การคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายดินด้วย Microsoft Excel ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมคำนวณใน Microsoft Excel ตามมาตรฐาน IEEE-80 ช่วยให้ผู้ใช้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายดินได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยใช้ฟังก์ชันและสูตรคำนวณใน Excel เพื่อสร้างเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและสะดวก [1-6]

4.2 การใช้มาตรฐาน IEEE-80 ในการออกแบบระบบสายดิน ซึ่งกำหนดหลักการและวิธีการคำนวณที่จำเป็นในการออกแบบระบบสายดิน เพื่อให้วิศวกรสามารถประเมินและออกแบบระบบสายดินได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ [1-6]

4.3 เพื่อความปลอดภัยของระบบสายดินในสถานีไฟฟ้า เนื่องจากการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานจากกระแสที่ไหลลงสู่ระบบสายดินหรือพื้นที่รอบ ๆ ทั้งในสภาวะปกติและในสภาวะที่เกิดความผิดพร่อง เพื่อป้องกันการเกิดช็อกหรือเสียชีวิต [1-6]

5. มาตรฐาน IEEE-80

มาตรฐาน IEEE 80 เน้นความปลอดภัยในการลงดิน โดยมีเป้าหมายเพื่อให้สามารถนำกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินได้อย่างปลอดภัย และลดความเสี่ยงที่บุคคลจะได้รับอันตรายจากไฟฟ้าได้ โดยเมื่อเกิดกระแสลัดวงจรที่ไหลในกราวดกริดจะทำให้แรงดันที่กราวดกริดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งให้พื้นดินบริเวณระบบสายดินมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณผิวดินในสถานีไฟฟ้าได้ โดยรูปที่ 1 แสดงแผนผังส่วนประกอบของสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ เพื่อให้การทำงานของระบบไฟฟ้าเป็นไปอย่างปลอดภัยและมีเสถียรภาพ [2-6]



รูปที่ 1 แผนผังส่วนประกอบของสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation)

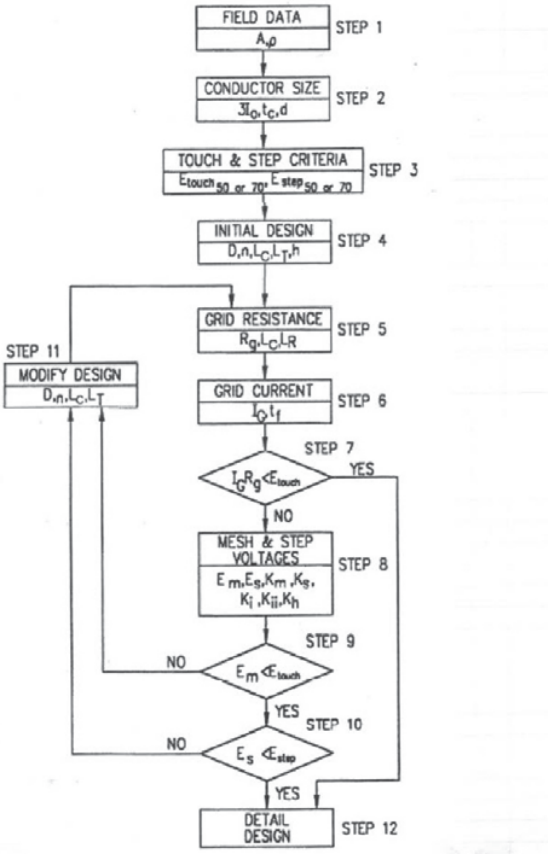
จากรูปที่ 1 พบว่าส่วนประกอบสำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อย ได้แก่ แคลมป์เสาไฟฟ้า (Fence post clamp), แท่งกราวด์ (Ground bars) ที่เชื่อมต่อกับรั้ว, ห้องควบคุม (Control room) ที่ตั้งอยู่ภายในพื้นที่รั้ว, สายไฟฟ้าแรงสูง (HV conductor) ที่นำไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) ที่เชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพิเศษ (EHV/HV transmission line), อุปกรณ์สวิตช์เกียร์ (Switch gear) ที่ตั้งอยู่ใกล้หม้อแปลงไฟฟ้า, หินบด (Crushed rock) ที่ปูพื้นในบางพื้นที่, แท่งทองแดงที่ฝังในดิน (Copper-bonded rods) สำหรับการกราวด์, วัสดุเสริมกราวด์ ที่ล้อมรอบแท่งทองแดงที่ฝังในดิน [2-6]

6. แนวทางการออกแบบและการพัฒนาโปรแกรม

การพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบดินของสถานีไฟฟ้าย่อยด้วยโปรแกรม Microsoft Excel สามารถใช้ในการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 80 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถสร้างสเปรดชีตที่มีฟังก์ชันการคำนวณต่าง ๆ เช่น การคำนวณแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าว การคำนวณความต้านทานของระบบกราวด์โดยใช้ข้อมูลความต้านทานของดินและการจัดวางระบบกราวด์ โดยแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2 [1-16]

ในรูปที่ 2 อธิบายขั้นตอนการออกแบบตามมาตรฐาน IEEE 80 โดยเริ่มจากการรวบรวมข้อมูลภาคสนาม ซึ่งมีการวัดความต้านทานของดินและการกำหนดขนาดของสถานีไฟฟ้า จากนั้นการกำหนดขนาดสายไฟฟ้าจากการคำนวณขนาดสายไฟฟ้าที่เหมาะสม ตามด้วยการคำนวณแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าวเพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้เพื่อป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า [2-16]

จากนั้น จะมีการวางผังระบบกราวด์ในสถานีไฟฟ้า เพื่อการคำนวณความต้านทานของกริดจากการคำนวณความต้านทานของระบบกราวด์ และคำนวณกระแสไฟฟ้าของกริดที่ระบบกราวด์ต้องรองรับ พร้อมทำการตรวจสอบแรงดันในกริด ตรวจสอบแรงดันสัมผัสและแรงดันก้าวในกริดเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ปลอดภัยและสอดคล้องกับมาตรฐาน [2-16]



รูปที่ 2 ขั้นตอนการออกแบบระบบดินสำหรับสถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) ตามมาตรฐาน IEEE 80

7. สรุป

การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบสายดินตามมาตรฐาน IEEE 80 ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ทั้งโปรแกรมพัฒนาสอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE 80 และเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดและการแสดงผลของระหว่างโปรแกรมที่พัฒนากับโปรแกรม ETAP Ground Grid Systems และโปรแกรม EATON CYMGRD ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบระบบสายดินเพื่อให้มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ พบว่าการพัฒนาโปรแกรมใน Microsoft Excel ตามมาตรฐาน IEEE 80 ช่วยให้ผู้ใช้สามารถคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายดินได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โปรแกรมนี้สามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น เช่น ค่าความต้านทานของสายดิน ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความปลอดภัยของระบบ นอกจากนี้ โปรแกรมยังแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตารางที่เข้าใจง่าย ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์และประเมินผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแตกต่างกับโปรแกรม ETAP Ground Grid Systems ที่ออกแบบและวิเคราะห์ระบบกราวด์แบบ

เทคโนโลยี 3D ที่สามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบกราฟิกและตาราง ในขณะที่โปรแกรม EATON CYMGRD รองรับการคำนวณในรูปแบบ 2D และ 3D ได้

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางด้านข้อมูล เครื่องมือ และการเข้าร่วมการประชุมวิชาการ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ซึ่งเป็นการสนับสนุนอันสำคัญในการดำเนินการวิจัยและพัฒนาโปรแกรมฯ ทั้งนี้ขอขอบคุณบริษัท 3 Green KP ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านข้อมูลและทรัพยากรที่จำเป็นในการพัฒนาโปรแกรมนี้ ความร่วมมือและการสนับสนุนจากบริษัทเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในทุกขั้นตอนของการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

[1] Microsoft. (2025). Microsoft Office: Productivity Tools for Home & Office. Retrieved from Microsoft Office.

[2] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding - Redline," in IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015) - Redline , vol., no., pp.1-426, 15 May 2015.

[3] "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System - Redline," in IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983) - Redline , vol., no., pp.1-192, 28 Dec. 2012.

[4] "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems - Redline," in IEEE Std 142-2007 (Revision of IEEE Std 142-1991) - Redline , vol., no., pp.1-215, 30 Nov. 2007.

[5] "IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault - Redline," in IEEE Std 367-2012 (Revision of IEEE Std 367-1996) - Redline , vol., no., pp.1-334, 21 May 2012.

[6] พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร. (2566) 'เอกสารประกอบสอนวิชาระบบดิน'. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.

[7] A. V. Machias, E. N. Dialynas and C. A. Protopapas, "An expert system approach to designing and testing substation grounding grids," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 234-240, Jan. 1989, doi: 10.1109/61.19209.

[8] S. A. Saleh, D. Jewett and S. A. R. Panetta, "The Analysis, Modeling, and Capabilities of Grounding System Designs," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 5, pp. 5908-5920, Sept.-Oct. 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3186290.

[9] J. Trifunovic and M. B. Kostic, "An Algorithm for Estimating the Grounding Resistance of Complex Grounding Systems Including Contact Resistance," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 5167-5174, Nov.-Dec. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2429644.

[10] H. B. Puttgen and J. F. Jansen, "An expert system for the design of a power plant electrical auxiliary system," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, no. 1, pp. 254-261, Feb. 1988, doi: 10.1109/59.43208.

[11] H. W. Clifton, "Design Your Grounding System," in IEEE Transactions on Aerospace, vol. 2, no. 2, pp. 589-596, April 1964, doi: 10.1109/TA.1964.4319642.

[12] J. Ma and F. P. Dawalibi, "Computerized Analysis of Grounding Plates in Multilayer Soils," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 2, pp. 650-655, April 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2008.2005887.

[13] M. U. Aslam, M. U. Cheema, M. B. Cheema and M. Samran, "Design analysis and optimization of ground grid mesh of extra high voltage substation using an intelligent software," 2014 The 1st International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering, Semarang, Indonesia, 2014, pp. 339-345, doi: 10.1109/ICITACEE.2014.7065768.

[14] S. Nandhini, S. S. Kumar and M. W. Iruthayarajan, "Design of Earthing Grid using ETAP," 2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, 2022, pp. 392-399, doi: 10.1109/ICOEI53556.2022.9777168.

[15] S. Ilenin, Z. Čonka, M. Ivančák, M. Kolcun and G. Morva, "New way in design of a power station earthing system," 2018 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), Budapest, Hungary, 2018, pp. 000163-000168, doi: 10.1109/CANDO-EPE.2018.8601127.

[16] A. Ghods, H. -h. Lee and A. Etemadi, "Optimal design of grounding systems for high voltage substations," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939372.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยใช้วงจรสะท้อนกระแส ของระบบไมโครกริดผ่านโปรแกรมจำลองการทำงาน

Improving Lead Acid Battery Charging Circuit Using Current Mirror Circuit of Microgrid System Through Simulation Program

ณัฐวุฒิ เนียมตะเคียน[1*] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

E-mail: nattawut-nia@rmutp.ac.th *

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเดิมที่ใช้กันทั่วไป โดยเลือกวงจร Boost Converter ที่รับพลังจากระบบผลิตพลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อร่วมกับระบบผลิตพลังงานจากกังหันลมที่ผ่านการ Rectifier และวงจร Buck Converter เพื่อให้ระบบมีการผลิตกระแสที่ต่อเนื่องอัดประจุเข้าแบตเตอรี่เพื่อทดสอบ และเพิ่มวงจรสะท้อนกระแสต่อเข้าในวงจรเพื่อปรับอัตราขยายกระแสของระบบที่ผลิตได้ให้มีกระแสเพิ่มขึ้นก่อนอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ผ่านโปรแกรมการจำลอง MATLAB/Simulink วิธีการจำลองเปลี่ยนวงจร Current Mirror Circuit เป็นชนิดต่างๆ คือ ชนิด BJT Current Mirror หรือ IGBT Current Mirror หรือ MOSFET Current Mirror โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆเหมือนกันทั้ง 3 วงจร วัดค่ากระแส แรงดัน และวัดค่า % SOC ที่แบตเตอรี่ตะกั่วกรด เปรียบเทียบเพื่อหาวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสของระบบไมโครกริดชนิดใดที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

คำสำคัญ: แบตเตอรี่ตะกั่วกรด, วงจรสะท้อนกระแส, ไมโครกริด, โปรแกรมจำลองการทำงาน

Abstract

This research improves the charging circuit of commonly used lead-acid batteries. By selecting a Boost Converter circuit that receives power from a solar cell power generation system, connected to a wind turbine power generation system that has passed a Rectifier and a Buck Converter circuit to allow the system to produce continuous current to charge the battery for testing. And add a current reflection circuit into the circuit to adjust the current gain of the produced system to increase the current before charging the battery through the MATLAB/Simulink simulation program. How to simulate changing Current Mirror Circuit to different types, namely BJT Current Mirror or IGBT Current Mirror or MOSFET Current Mirror. While keeping other parameters the same for all 3 circuits. Measure the current, voltage and % SOC values at the lead-acid battery and compare them to find out which type of microgrid system current reflection circuit has the highest efficiency.

Keywords: Lead Acid Battery, Current Mirror Circuit, Microgrid System, Simulation Program

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มีแรงบันดาลใจมาจากงานวิจัยวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดสำหรับระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำ โดยใช้วงจรสะท้อนกระแส ชนิด BJT Current Mirror โดยออกแบบให้เหมาะสำหรับครัวเรือนในพื้นที่ชนบท โดยอุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย แผงโซล่าเซลล์ขนาด 500 วัตต์ แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 12 V 100 Ah ซึ่งแต่ละวันใช้เวลาอัดประจุเฉลี่ย 8 ชั่วโมง (ช่วงเวลาที่มีแสงแดด) ระบบนี้จึงสามารถประจุแบตเตอรี่จากความจุ 10% ถึง 90% ด้วยเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง [1] จึงมีแนวคิดว่าหากเปลี่ยนชนิดของวงจรสะท้อนเป็นชนิดอื่นที่มีคุณลักษณะและคุณสมบัติที่ดีกว่าน่าจะอัดประจุและมีประสิทธิภาพได้ดีกว่า แต่เนื่องด้วยระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีความไม่สม่ำเสมอในการจ่ายกระแส จึงต้องหาแหล่งพลังงานเสริมเพื่อให้ระบบมีการผลิตกระแสอัดประจุเข้าแบตเตอรี่อย่างต่อเนื่องและลดเวลาในการทดสอบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงออกแบบเพื่อการปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสของระบบไมโครกริดผ่านโปรแกรมจำลองการทำงาน MATLAB/Simulink โดยเปลี่ยนวงจร Current Mirror Circuit เป็นชนิดต่างๆ คือ ชนิด BJT Current Mirror หรือ IGBT Current Mirror หรือ MOSFET Current Mirror เหตุผลที่เลือก BJT

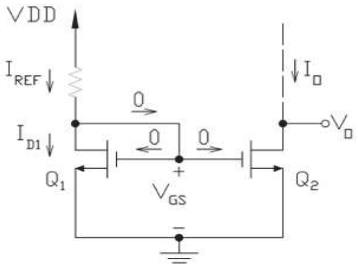
และ MOSFET มาใช้ในวงจรเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองมีลักษณะการควบคุมวงจรขับเกต/เบสที่ต่างกัน อีกทั้ง MOSFET มีคุณสมบัติหลายอย่างที่ดีกกว่า BJT จึงมีแนวคิดว่าน่าจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสำหรับวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ส่วน IGBT ถือเป็นเรื่องใหม่ในการนำมาทำวงจรสะท้อนกระแส อีกทั้งยังข้อดีข้อด้อยและคุณสมบัติที่ต่างจากไป BJT และ MOSFET จึงอยากทราบว่าประสิทธิภาพดีกว่าหรือด้อยกว่า BJT และ MOSFET ซึ่งงานวิจัยนี้มีข้อแตกต่างจากวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยทั่วไป โดยมีการต่อวงจรสะท้อนกระแสเพิ่มเข้าในวงจรก่อนอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ โดยระบบจะรับกระแสที่ผลิตได้จากระบบไมโครกริดค่าหนึ่งเมื่อผ่านวงจรสะท้อนกระแสจะขยายกระแสให้มีค่ามากขึ้นทำให้สามารถอัดประจุได้เร็วขึ้น ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในงานวิจัยนี้หวังว่าค้นพบว่า Current Mirror Circuit ชนิดใดมีประสิทธิภาพดีที่สุดและนำไปต่อยอดต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror Circuit)

วงจรสะท้อนกระแสเป็นวงจรแอนะล็อกที่ตรวจจับกระแสอ้างอิงและสร้างสำเนาหรือสร้างได้หลายสำเนาที่มีลักษณะเดียวกันกับกระแสอ้างอิง กระแสที่จำลองนั้นมีเสถียรภาพเท่ากับแหล่งกระแสอ้างอิง กระแสที่จำลองเหมือนกับกระแสอ้างอิง $I_{COPY} = I_{REF}$ หรือขยายเป็นจำนวนเท่ากระแสอ้างอิง $I_{COPY} = N*I_{REF}$ หรือลดขนาดของกระแสอ้างอิง $I_{COPY} = (1/N)*I_{REF}$

2.1.1 MOSFET Current Mirror Circuit



รูปที่ 1 วงจรสะท้อนกระแสโดยใช้มอสเฟต

มอสเฟตจะทำงานในโหมดความอิ่มตัวเสมอ เมื่อขาเดรนเชื่อมต่อกับขาเกท นั่นคือ $V_{DS} = V_{GS} > V_{GS} - V_{TH}$ กระแสเดรนของ Q_1 สามารถหาได้จากสมการ

$$I_{D1} = \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)_1(V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1)$$

กระแสเดรนจะถูกจ่ายมาจากแหล่งจ่าย VDD มายังตัวต้านทาน (R) ดังแสดงในรูปที่ 1 กระแสเกทเป็นศูนย์ โดยพิจารณาตามกฎของ Kirchoff's Voltage Law (KVL) จะได้

$$I_{D1} = I_{REF} = \frac{V_{DD} - V_{GS}}{R} \quad (2)$$

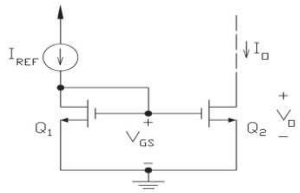
I_{D1} มีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิง I_{REF} จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าตัวต้านทาน (R) Q_2 ยังถูกสร้างให้ทำงานด้วยความอิ่มตัวด้วย แรงดันตกคร่อมที่ Q_2 ตั้งชื่อเป็น V_O กระแสเดรนของ Q_2 สามารถหาได้จากสมการ

$$I_O = I_{D2} = \frac{1}{2}k'_n\left(\frac{W}{L}\right)_2(V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (3)$$

ดังนั้น สมมติว่ามอสเฟตมีแรงดันไฟฟ้า V_{th} เท่ากัน จะได้

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \quad (4)$$

เราสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของวงจรสะท้อนกระแสโดยใช้มอสเฟต

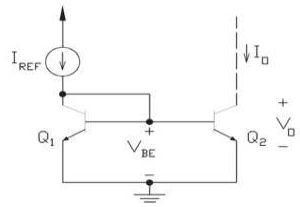
ดังนั้น สมการ (4) เป็นจริงได้หากเป็นตามเงื่อนไข $V_{GS} > V_{GS} - V_{TH}$ หรือ $V_{GD} < V_{TH}$ เราสามารถนำสมการนี้ไปใช้ได้ $I_o = I_{REF}\frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$ เราสามารถเปลี่ยนค่า Width of Chanel (W) และ Length of Chanel (L) ของมอสเฟตเพื่อให้ได้อัตราส่วนของกระแส I_o ที่ต้องการ ดังนั้น อัตราส่วนนี้เรียกว่า Current transfer ratio [2]

2.1.2 BJT Current Mirror Circuit

BJT Current Mirror มีความแตกต่างจาก MOSFET Current Mirror ที่สำคัญสองประการ คือ ประการแรก กระแสเบสของ BJT ไม่เป็นศูนย์ ประการที่สอง เมื่อทรานซิสเตอร์สองตัวมี V_{BE} เท่ากัน กระแสสะสมจะแตกต่างกัน เนื่องจากพื้นที่ของจุดเชื่อมต่ออิมิเตอร์กับเบสอาจแตกต่างกัน ฉะนั้น สมมติว่ากระแสเบสให้เป็นศูนย์ หรือ β นั้นมีขนาดใหญ่มาก สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{I_{S2}}{I_{S1}} = \frac{\text{Area of EBJ of } Q_2}{\text{Area of EBJ of } Q_1} \quad (5)$$

โดยที่ I_{S1} คือกระแสอิ่มตัวหรือกระแสสเกลของทรานซิสเตอร์ i-th



รูปที่ 3 วงจรสมมูลของวงจรสะท้อนกระแสโดยใช้บีเจที

หากต้องการดูผลกระทบของค่าจำกัด β บน วงจรสะท้อนกระแส เราสามารถสรุปได้ว่า BJT สองตัวตรงกัน จากรูปที่ 3 จะได้

$$I_{REF} = I_C + \frac{2I_C}{\beta} = I_C\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \quad (6)$$

และสามารถคำนวนหา กระแสขาออกได้ดังนี้

$$I_O = \frac{I_{REF}}{1+2/\beta}\left(1+\frac{V_O-V_{BE}}{V_A}\right) \quad (7)$$

ความต้านทานเอาท์พุตของแหล่งกระแสโดยประมาณนี้ คือ $\Delta V_O/\Delta I_O$ ซึ่งเป็น

$$R_o \approx V_A/I_{REF} \approx V_A/I_O = r_o$$

ซึ่งค่า R_Oนี่อาจเป็นมีค่าที่มาก จึงทำให้สามารถประมาณค่ากระแสได้ดี

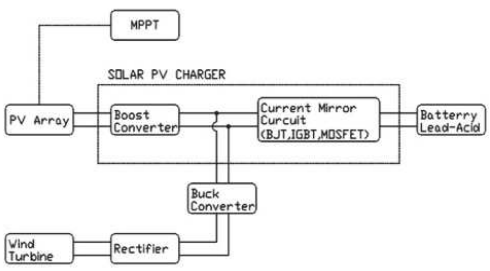
ดังนั้นเราสามารถนำสมการ (7) $I_O = \frac{I_{REF}}{1+2/\beta}\left(1+\frac{V_O-V_{BE}}{V_A}\right)$ ไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_O , I_{REF} และ β ได้ เราสามารถเปลี่ยนค่าของบีเจที เพื่อให้ได้อัตราส่วนของกระแส I_o ที่ต้องการ

2.1.3 IGBT Current Mirror Circuit

IGBT Current Mirror Circuit ถือเป็นเรื่องใหม่ ยังอยู่ในขั้นตอนการทดลองและทดสอบ และพิสูจน์สมการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง I_O กับ I_{REF} ในอนาคตต่อไป

3. วิธีการดำเนินงานวิจัยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

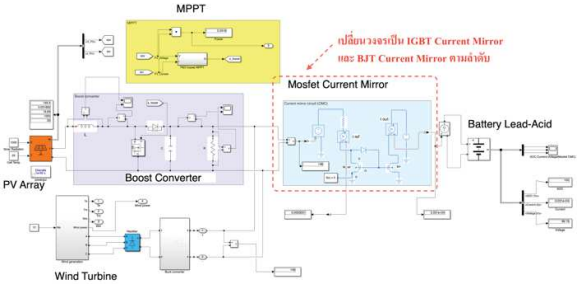
นำวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ Boost Converter ที่รับพลังจากระบบผลิตพลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Array) กำหนดให้แผงมีขนาด 250.29 W เชื่อมต่ออนุกรมกันจำนวน 4 แผง และต่อขนานจำนวน 2 String ควบคุมการอัดประจุโดย MPPT (Solar PV Charger) แบตเตอรี่ตะกั่วกรดมีขนาด 48 V 200Ah % SOC 50 และนำระบบผลิตพลังงานจากกังหันลม ขนาด 1.5 x10^6 W Base Wind Speed 12 m/s ผ่านวงจร Rectifier และผ่านวงจร Buck Converter มาเชื่อมต่อวงจร Solar PV Charger และเชื่อมต่อวงจร Current Mirror Curcuit (CMC) ชนิด BJT Current Mirror หรือ IGBT Current Mirror หรือ MOSFET Current Mirror เชื่อมต่อเข้ากับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยการจำลองเปลี่ยนวงจร Current Mirror Circuit เป็นชนิดต่างๆ โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆเหมือนกันทั้ง 3 วงจร วัดค่า % SOC ,Current(A), Voltage(V) ที่แบตเตอรี่ตะกั่วกรด บันทึกและเปรียบเทียบค่า% SOC ที่ได้จากโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบการเชื่อมต่อวงจรอัดประจุแบตเตอรี่โดยใช้วงจรสะท้อนกระแสของระบบไมโครกริด

3.1 ต่อวงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทดลอง

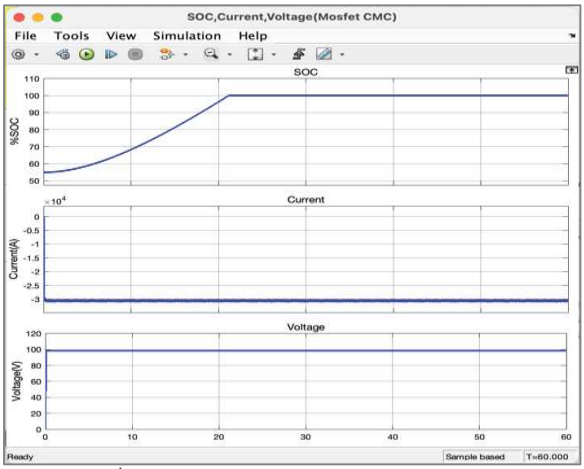
ทดลองต่อวงจร Current Mirror Circuit เป็นแบบ Current Mirror Circuit โดยใช้ MOSFET Current Mirror Circuit ที่ Q_1 ทดลองปรับค่า W มีค่าเป็น 1x10^{-8} m และ ปรับค่า L มีค่าเป็น 1x10^{-8} m และที่ Q_2 ทดลองปรับค่า W มีค่าเป็น 1x10^{-8} m และ ปรับค่า L มีค่าเป็น1m ต่อมาเปลี่ยนเป็นแบบ BJT Current Mirror Circuit ที่ Q_1 ทดลองปรับค่า Output admittance ,h_oe มีค่าเป็น 50x10^{-6} 1/ohm และ ที่ Q_2 ทดลองปรับค่า Output admittance ,h_oe มีค่าเป็น 200x10^{-6} 1/ohm และเปลี่ยนเป็นแบบ IGBT Current Mirror Circuit ที่ IGBT ตัวที่1ตัวที่2 ทุกค่ามีค่าเท่ากัน โดยคงค่าพารามิเตอร์อื่นๆให้เหมือนกันทั้ง 3 วงจร โดยคาดหวังว่ากระแสขาออกจากวงจร Current Mirror Circuit มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระแสก่อนเข้าวงจรCMC แล้ววัดค่า % SOC ,Current(A), Voltage(V) ที่แบตเตอรี่ตะกั่วกรด บันทึกและเปรียบเทียบค่า % SOC เพื่อเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของแต่ละวงจร และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 5 การต่อวงจรในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการทดลอง

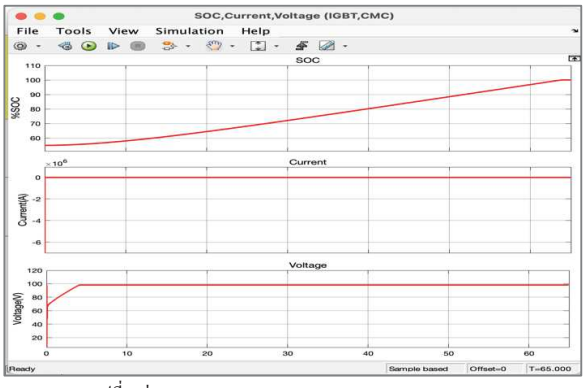
3.2 ผลการทดลองและอภิปรายผล

วัดค่าจากทดลองของวงจร Current Mirror Circuit โดยใช้ MOSFET ได้ดังรูปที่ 6



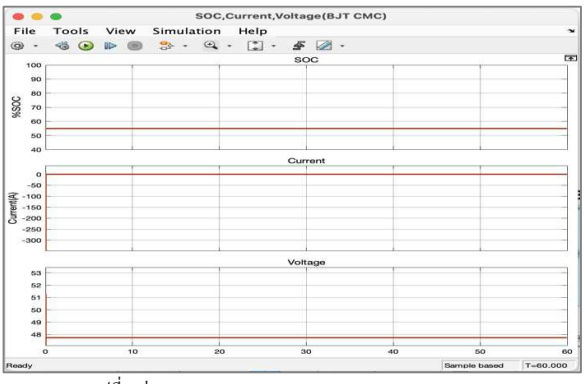
รูปที่ 6 ค่า % SOC, Current, Voltage ของ Lead Acid Battery โดยใช้ MOSFET Current Mirror Circuit

วัดค่าจากทดลองของวงจร Current Mirror Circuit โดยใช้ IGBT ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่า % SOC, Current, Voltage ของ Lead Acid Battery โดยใช้ IGBT Current Mirror Circuit

วัดค่าจากทดลองของวงจร Current Mirror Circuit โดยใช้ BJT ได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ค่า % SOC, Current, Voltage ของ Lead Acid Battery โดยใช้ BJT Current Mirror Circuit

นำค่า % SOC ที่วัดได้ในเวลาต่างๆมาใส่ในตารางเพื่อเปรียบเทียบค่า % SOC ที่เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของแต่ละวงจร ได้ดังนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่า % SOC ของ Current Mirror Circuit ชนิดต่างๆ

ชนิด CMC ค่า %SOCที่วัดได้ /เวลา (SEC)	0	10	20	30	40	50	60
MOSFET	54.9	68	96	100	100	100	100
IGBT	54.9	58	65	72	80	89	97
BJT	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9	54.9

ผลที่ได้ ที่เวลา 10 นาที วงจรที่ใช้ MOSFET Current Mirror Circuit มีค่า SOC 68% วงจรที่ใช้ IGBT Current Mirror Circuit มีค่า SOC 58% และวงจรที่ใช้ BJT Current Mirror Circuit มีค่า SOC 54.9% และที่เวลา 30 นาที วงจรที่ใช้ MOSFET Current Mirror Circuit มีค่า SOC 100% วงจรที่ใช้ IGBT Current Mirror Circuit มีค่า SOC 72% และวงจรที่ใช้ BJT Current Mirror Circuit มีค่า SOC 54.9% ซึ่งค่า SOC คือค่าระดับพลังงานในแบตเตอรี่เทียบกับความจุพลังงานสูงสุด SOC 100% คือค่าสถานะแบตเตอรี่เต็ม แสดงว่า วงจรที่ใช้ MOSFET Current Mirror Circuit มีประสิทธิภาพในการอัดประจุดีที่สุด รองลงมาคือวงจรที่ใช้ IGBT Current Mirror Circuit และวงจรที่ใช้ BJT Current Mirror Circuit มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

3. สรุป

งานวิจัยนี้ สรุปได้ว่าการต่อวงจรสะท้อนกระแสเพิ่มเข้าในวงจรก่อนอัดประจุเข้าแบตเตอรี่โดยระบบจะรับกระแสที่ผลิตได้จากระบบไมโครกริดค่าหนึ่งเมื่อผ่านวงจรสะท้อนกระแสจะขยายกระแสให้มีค่ามากขึ้นทำให้สามารถอัดประจุได้เร็วขึ้นจริง และวงจรที่ใช้ MOSFET Current Mirror Circuit มีประสิทธิภาพในการอัดประจุดีที่สุด รองลงมาคือวงจรที่ใช้ IGBT Current Mirror Circuit และวงจรที่ใช้ BJT Current Mirror Circuit มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด สรุปได้ว่า MOSFET จึงมีความเหมาะสมที่สุดในการนำไปพัฒนาต่อยอด ต่อไป

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรมจำลองลิขสิทธิ์และสนับสนุนการทำวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] Parvez, N., Das, A., & Santra, S. B. (2018). Current Mirror Circuit Based Low Cost Lead Acid Battery Charger for Solar PV. 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)

[2] Baker, R. Jacob, 1964 - Baker, R. Jacob, 1964-CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation / Jake Baker. — 3rd ed. Chapter 20 Current Mirrors (pages 613–656)



นายณัฐวุฒิ เนียมตะเคียน กำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งานวิจัยที่สนใจการปรับปรุงวงจรอัดประจุแบตเตอรี่ตะกั่วกรดโดยใช้วงจรสะท้อนกระแสของระบบไมโครกริดผ่านโปรแกรมจำลองการทำงาน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาตู้เพาะเชื้อควบคุมด้วยแสง และอุณหภูมิ

Study of light and temperature controlled incubator

กิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์[1*] เอกรัฐ ชอุ่มเอียด[1] ธนายุทธ ไพศาลอัศวเสนี[1] สิทธิชัย วิบูลย์กลาง[1] ณัฐนัย พวงเขียว[1] และ วรัญญู เมฑทา[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันโคเซ็นแห่งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: kittisakd_s@rmutl.ac.th[*]

บทคัดย่อ

การศึกษาเรื่องตู้เพาะเชื้อควบคุมด้วยแสง และอุณหภูมิจัดทำขึ้น เพื่อมุ่งหวังในการควบคุมปริมาณแสงให้เพียงพอและเหมาะสมต่อการบ่มเพาะในการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียอย่างสม่ำเสมอ โดยเชื้อที่เลือกนำมาศึกษาคือเชื้อในกลุ่มไรแดง (การเจริญเติบโตของเชื้อจะอยู่ที่ 5-7 วัน) คณะผู้ศึกษาได้ทำการออกแบบโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิดหลอดแอลอีดีสำหรับการปลูกต้นไม้ขนาด 150 วัตต์ที่เน้นสเปกตรัมสีแดง และสีน้ำเงินสำหรับเชื้อที่นำมาใช้ศึกษา ในส่วนอุณหภูมิถูกควบคุมจำกัดไม่ให้เกินค่า 35 องศาเซลเซียส ด้วยพัดลมระบายอากาศ และควบคุมประสานการทำงานและปรับตั้งค่าด้วยอาดูโน่ ทำการสอบความคาดเคลื่อนเฉลี่ยทั้ง 2 ส่วน อยู่ที่ 13.2 % และ 7.4 % ตามลำดับ ในการประเมินผลพิจารณาจากระดับการเปลี่ยนแปลงของเชื้อในหลอดทดลองที่ผ่านการรับแสงสว่างจากตู้ที่สร้างขึ้น ผลการทดสอบที่ได้พบว่าระดับแสงที่ดีที่สุดจากการทดลองที่มีต่อการเจริญเติบโตเปลี่ยนเป็นสีแดงที่ 3,500 Lux ซึ่งใกล้เคียงกับค่าแสงที่อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ใช้ที่ประมาณ 3,300 Lux แต่ในทางกลับกันหากเพิ่มปริมาณแสงที่จะมีผลทำให้เชื้อในหลอดเจริญช้าลงจนกลายเป็นสีขุ่นแทน ในด้านการใช้พลังงานมีค่าแปรผันเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการปรับระดับความเข้มแสงตลอดจนการเสียพลังงานไปกับการระบายความร้อนของพัดลม

คำสำคัญ: ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, เชื้อไรแดง

Abstract

The study on the light and temperature controlled incubator was conducted to control the amount of light to be sufficient and suitable for the consistent growth of microorganisms and bacteria. in a consistent manner. The selected organisms for study were red mite organisms (the growth of the organisms will take 5-7 days). The researchers designed a 150-watt LED grow light source that focused on the red and blue spectrums for the studied pathogens. The temperature is controlled to not exceed 35 degrees Celsius with a ventilation fan and is controlled and adjusted using Arduino. The average error rates of both sections were 13.2% and 7.4%, respectively. In the evaluation, the level of change of microorganisms in the test tubes exposed to light from the constructed cabinet was considered. The results of the test found that the best light level from the experiment that affected the growth changed to red at 3,500 Lux, which is close to the light value that the Faculty of Science lecturers use at approximately 3,300 Lux. However, on the other hand, if the amount of light is increased, it will cause the bacteria in the tube to grow slowly until it becomes cloudy instead. In terms of energy consumption, there is an increase in the variation when adjusting the light intensity level, as well as energy loss for cooling the fan.

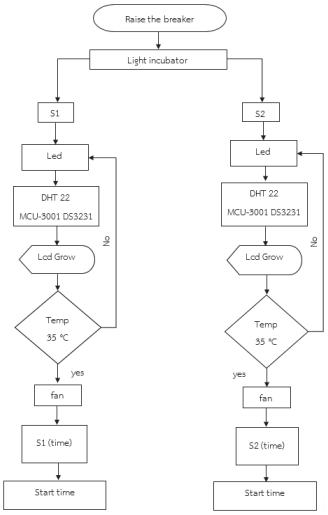
Keywords: Exposure, Temperature, Germs

1. บทนำ

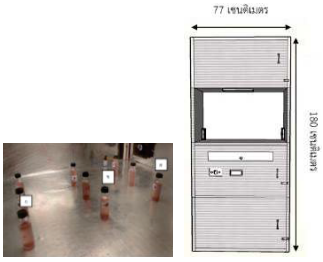
การศึกษาเรื่องตู้เพาะเชื้อควบคุมด้วยแสง และอุณหภูมิเป็นโครงงานที่จัดทำขึ้นเพื่อบ่มเพาะเชื้อที่มีการเจริญเติบโตด้วยแสง และทดสอบหาสมรรถนะของตู้เพราะเชื้อด้วยแสงเพื่อให้ได้ตู้เพาะเชื้อที่สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเพาะเชื้อแบบปกติ โดยการเพาะเชื้อแบบปกติ คือการนำเชื้อมาตากแดด และไม่ได้ทำการควบคุมแสงและอุณหภูมิ ซึ่งอาจเป็นส่วนนึ่งที่ทำให้เชื้อเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ หากว่าเราสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เชื้อมีอุณหภูมิที่คงที่ได้ อาจจะสามารถทำให้เชื้อมีการเจริญเติบโตได้ดี

โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างตู้เพาะเชื้อด้วยแสง เพื่อนำมาใช้ทำการทดลองเชื้อ โดยการใส่เชื้อในตู้เพาะเชื้อควบคุมแสงและอุณหภูมิ การทดสอบภายในตู้จะมีระบบควบคุมอุณหภูมิภายในให้อยู่ที่ประมาณ 35 °C หากอุณหภูมิเพิ่มสูงเกิน 35 °C พัดลมระบายอากาศทำงานเพื่อลดอุณหภูมิภายใน เพื่อที่จะให้เชื้อมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเพาะเชื้อแบบปกติ ผลการทดลองจะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการที่นำเชื้อตู้มาเพาะด้วยตู้ควบคุมด้วยแสง และอุณหภูมิ กับการเพาะแบบปกติ รวมถึงสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้า

2. วิธีการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของตู้เพาะเชื้อ [4]



รูปที่ 2 ภายในห้องทดลองเพาะเชื้อและโครงสร้างตู้ [4]

ส่วนประกอบของตู้เพาะเชื้อด้วยแสง

1. สวิตช์เบรกเกอร์ ทำหน้าที่ เป็นตัวควบคุมการทำงานของไฟฟ้า
2. บอร์ด Arduino ทำหน้าที่ เป็นบอร์ดควบคุมการทำงานของเครื่อง
3. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น DHT22 ทำหน้าที่ ตรวจอุณหภูมิและความชื้น
4. เซ็นเซอร์บอกวัดความเข้มแสง MCU-3001 ทำหน้าที่ วัดความเข็มของแสงที่ต้องการ
5. โมดูลจอแสดงผล LED ทำหน้าที่ แสดงค่าของเซ็นเซอร์และแสดงเวลาเพาะเชื้อ
6. Module รีเลย์ ทำหน้าที่ การเปิด-ปิดวงจรด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำมีกระแสไหลผ่านจะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก สามารถส่งแรงผลักหรือดูดเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งสวิตช์ได้
7. โมดูลนาฬิกา DS3231 ทำหน้าที่ จับเวลาในการเพาะเชื้อ
8. Power Supply ทำหน้าที่ จ่ายไฟเลี้ยงบอร์ด Arduino

สมการที่ใช้ในการประเมินผลการศึกษา [4]

ค่าเปอร์เซ็นต์ %

$$\% = (N/S) \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ

% คือค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

N คือวันที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง

S คือปริมาณการเติบโตของเชื้อในการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อน

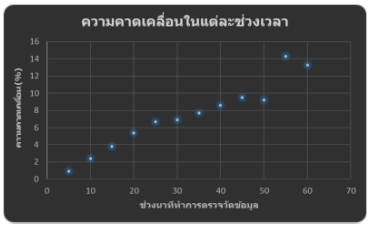
$$\%Error = [(ค่าจริง - ค่าประมาณ)/ค่าจริง] \times 100\% \quad (2)$$

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการวัดค่า อุณหภูมิ ความชื้น ค่าของแสง (lux) และค่ากระแส



รูปที่ 3 ค่าอุณหภูมิจากเซ็นเซอร์ DHT22 กับ Humidity Meter [4]

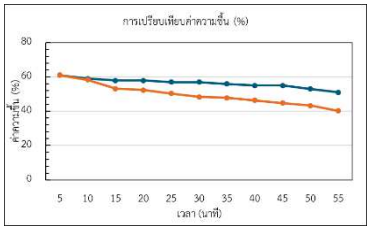


รูปที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนจากเซ็นเซอร์ และ Humidity Meter



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงและกระแสไฟฟ้า [4]

ข้อมูลเปรียบเทียบค่าเซ็นเซอร์ MCU-3001 โดยใช้ลักซ์มิเตอร์เป็นตัวเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน %error ค่าความเข้มแสง (lux) ที่น้อยที่สุดค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ที่ 11.69 % ค่าความเข้มแสง (lux) ที่มากที่สุดค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ที่ 14.83 % โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรวม 13.26 %



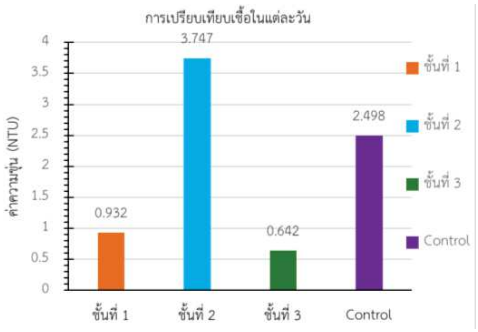
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความชื้น DHT 22 กับ Humidity Meter [4]

การวัดค่ากระแสของหลอดไฟเมื่อปรับค่าลักซ์กระแสจะเปลี่ยนตามค่าของแสง ค่าของแสงที่อยู่น้อยที่กระแสจะอยู่ที่ 0.131 A ค่าของแสงที่มากที่สุดกระแสจะอยู่ที่ 0.7 A เมื่อนำมาแปลงเป็นวัตต์ (W) ค่าแสงที่น้อยที่สุดจะอยู่ที่ 30.13 W ค่าแสงที่มากที่สุดจะอยู่ที่ 160.77 W นั่นคือเมื่อเราปรับค่าแสงมากขึ้นจะใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย พลังงานที่ใช้ใน 1 ตู้เฉลี่ยอยู่ที่ 52.67 W โดยค่าความเข้มแสง (lux) จะอยู่ที่ 5,000 – 22,700 lux

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบเชื้อระหว่างค่าแสงที่สูงสุดและต่ำที่สุดกับค่าที่เชื้อต้องการได้รับกับการเจริญเติบโต [4]

ลำดับตู้ (ชั้นที่)	ตำแหน่งการวางขวดเชื่อทดลอง			เฉลี่ย
	ก	ข	ค	
1	0.884	0.22	1.692	0.932
2	3.294	3.838	4.11	3.747
3	0.544	0.772	0.612	0.642
control	0.11	3.396	3.988	2.498

จากตารางที่ 1 นำเชื้อมาเพาะโดยการทดลองกับค่าแสงที่มากที่สุด(ที่เครื่องทำได้) และค่าแสงที่ต่ำสุดค่าเพื่อศึกษาความแตกต่างการเจริญเติบโตของเชื้อไรแดงที่ได้ จะเห็นได้ว่าผลการตรวจสอบความเจริญเติบโตโดยเครื่องของคณะวิทยาศาสตร์พบว่าเชื้อภายในตู้เจริญเติบโตได้ในปริมาณที่ดีขึ้นกว่าเดิม ในการทดลองเครื่องให้แสงครอบคลุมในปริมาณที่ตอบสนองการเจริญเติบโตของเชื้อ โดยเชื้อมีการเจริญเติบโตได้ดีกว่าค่าแสงที่สูงเกินไปและค่าแสงที่ต่ำเกินไป



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบเชื้อในแต่ละวัน [4]

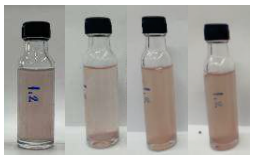
การเปรียบเทียบเชื้อของแต่ละชั้นตู้

ตู้ที่ 1 (เครื่องที่สร้าง) คือเชื้อที่ใช้แสงความเข้มแสงสูงสุดที่ตู้เพาะเชื้อด้วยแสงที่ทำได้คือ 22,700 Lux และค่าความขุ่นของเชื้อที่ได้เฉลี่ย 0.932

ตู้ที่ 2 (เครื่องที่สร้าง) คือเชื้อที่ใช้แสงความเข้มแสงต่ำที่ตู้เพาะเชื้อด้วยแสงที่ทำได้คือ 3,500 Lux และค่าความขุ่นของเชื้อที่ได้เฉลี่ย 3.747

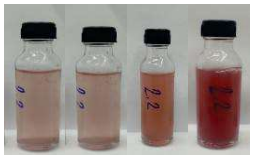
ตู้ที่ 3 (เทียบเคียงเครื่องเดิม) คือเชื้อที่ใช้ความเข้มแสงแบบของอาจารย์คณะวิทย์ที่ใช้คือ 3,300 Lux และค่าความขุ่นของเชื้อที่ได้เฉลี่ย 0.642

ตู้ Control (เครื่องเดิม) ใช้แสงความเข้มแสงที่ 3,500 Lux และค่าความขุ่นของเชื้อที่ได้เฉลี่ย 2.498



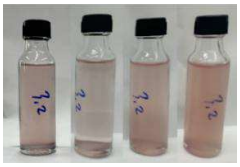
รูปที่ 8 เชื้อตู้ที่ 1 (เครื่องที่สร้าง) จากการทดลอง 4 วัน [4]

เชื้อตู้ที่ 1 (เครื่องที่สร้าง) จะเป็นการให้ความเข้มแสงสูงสุดของตู้เพาะเชื้อที่ 22,700 Lux ผลที่ได้พบว่าเชื้อจะเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีเริ่มขุ่น เพราะแสงมากเกินไป ทำให้เชื้อเจริญเติบโตได้ช้า และชั้นมีความร้อนมากกว่าชั้นอื่น



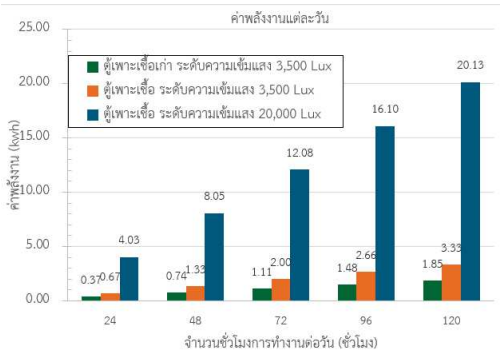
รูปที่ 9 เชื้อชั้นที่ 2 (เครื่องที่สร้าง) จากการทดลอง 4 วัน [4]

เชื้อชั้นที่ 2 (เครื่องที่สร้าง) จะเป็นการให้ความเข้มแสงต่ำสุดของตู้เพาะเชื้อด้วยแสงอยู่ที่ 3,500 Lux ผลที่ได้คือเชื้อจะเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีแดงเพราะความเข้มแสงที่ให้เป็นความเข้มที่เชื้อต้องการเชื้อเลยมีการเจริญเติบโตได้ดี



รูปที่ 10 เชื้อตู้ที่ 3 (เทียบเคียงเครื่องเดิม) จากการทดลอง 4 วัน [4]

เชื้อตู้ที่ 3 (เทียบเคียงเครื่องเดิม) เป็นแบบจำลองของตู้เพาะเชื้อที่อาจารย์คณะวิทยาสตร์ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีความเข้มแสง 3,300 Lux ผลที่ได้คือเชื้อจะเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีออกแดงอ่อน ๆ เพราะอาจจะมีปัจจัยอื่นที่ไม่เหมือนของอาจารย์คณะวิทยาสตร์



รูปที่ 11 ปริมาณการใช้พลังงาน [4]

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงานกับเวลา โดยค่าพลังงานถูกแสดงเป็นหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) และเวลาถูกแสดงเป็นหน่วยชั่วโมง ตู้เพาะเชื้อเก่าที่มีความเข้มแสงที่ 3,500 Lux เฉลี่ยพลังงานไฟฟ้า 5 วันอยู่ที่ 1.11 kwh ตู้เพาะเชื้อระดับความเข้มแสงอยู่ที่ที่ 3,500 Lux เฉลี่ยพลังงานไฟฟ้า 5 วันอยู่ที่ 1.88 kWh และตู้เพาะเชื้อระดับความเข้มแสงอยู่ที่ 20,000 Lux เฉลี่ยกำลังไฟฟ้า 5 วันอยู่ที่ 12.08 kWh

4. สรุปผล และอภิปรายผลการศึกษา

ตู้เพาะเชื้อที่มีอยู่จะพบว่าตู้แบบเก่าจะเป็นระบบเปิดโดยใช้จะไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้และหลอดที่ใช้งานจะเป็นหลอด LED T8 ทำให้แสงไม่สามารถกระจายได้ทั่วถึงภายในตู้ทำให้มีขีดจำกัดในการวางหลอดแก้วที่จะเพาะเชื้อ ดังนั้นเราจึงได้มีแนวคิดต่อยอดจากเดิม จากการทำออกแบบและสร้าง การติดตั้งอุปกรณ์ภายในตู้ การติดตั้งหลอดไฟโดยใช้หลอดปลูก (Bloom) เพราะเชื้อมีความต้องการที่จะเจริญเติบโตได้ดีโดยใช้สเปกตรัมสีแดงและสีน้ำเงินและจะมีตัวปรับตั้งค่า (Volume) ปรับค่าแสงเพื่อที่จะปรับให้เชื้อเจริญเติบโตได้ดีในค่าของแสงที่เชื้อต้องการ ภายในตู้จะมีหลักการสะท้อนของแสงของแผ่นฟอยล์เพื่อให้แสงสามารถตกกระทบได้ทั่วถึงบริเวณภายในตู้ มีพัดลมระบายความร้อนภายในตู้ เมื่ออุณหภูมิถึง 35 °C เพื่อระบายความร้อนภายในตู้ เมื่อเริ่มเพาะเชื้อตู้จะมีการนับเวลาโดยจะเริ่มนับไปจนถึงเมื่อเราเพาะสำเร็จจะมีปุ่มรีเซ็ตเวลาเพื่อที่จะนำเชื้อใหม่ ในการเริ่มเพาะเชื้อชุดใหม่ ในการใช้พลังงานของตู้จะขึ้นอยู่กับการปรับค่าของแสง (Lux) เมื่อปรับค่าของแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสเพิ่มขึ้นตามด้วยในการเพาะเชื้อแสงที่ต้องการใช้จะอยู่ที่ 3500-4000 Lux กระแสไฟฟ้าที่ใช้จะอยู่ที่ 0.184 Amp พลังงานที่ใช้ 2 ตู้จะอยู่ที่ 40.48 Watt

ผลการทดลองของการเพาะเชื้อโดยใช้ตู้เพาะเชื้อด้วยแสง ในระยะเวลา 5-7 วัน แล้วนำเชื้อที่เพาะได้ของตู้ที่ออกแบบใหม่นำไปเปรียบเทียบกับตู้ของเดิมผลที่จะได้เพื่อเอามาเทียบกันว่าใช้เวลาในการเพาะเชื้อนานแค่ไหน จากผลของตู้เก่า และตู้ใหม่ที่ได้มีการทดลองเปรียบเทียบกันได้ว่าเชื้อที่เพาะในตู้โดยการทดลองนำเชื้อมาวางตามจุดแต่ละจุดเพื่อหาค่าความเจริญเติบโต ของเชื้อพบว่าเชื้อมีการเจริญเติบโตในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุน ทรัพยากรและงบประมาณ เครื่องมือทดสอบและห้องปฏิบัติการ และอื่นๆ โดยเจ้าหน้าที่ และคณาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เป็นผลให้การดำเนินการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

6. บรรณานุกรม

[1] แบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสงคืออะไร (Online),สืบค้นเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2560 ที่มา: http://www.saowangwa.go.th/news/doc_download/20181018094053_2.pdf

[2] จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทำเกษตร โดย Adisak สืบค้นเมื่อ 30 พฤศจิกายน 2560 ที่มา : https://www.organicfarmthailand.com/microorganisms-for-plant/

[3] บอร์ด Arduino Mega2560 r3 (Online),สืบค้นเมื่อ 12 ธันวาคม 2566 ที่มา: http://www.genlogic.co.th/product/13/arduino-mega-2560-r3

[4] นายสิทธิชัย วิบูลย์กลาง, นายณัฐนัย พวงเขียว และนายวรัญญู เมฆทา. ตู้เพาะเชื้อด้วยแสง. ปริญญานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาพิษณุโลก; 2567.



ประวัติผู้เขียนบทความ
นายกิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์
ค.อ.บ วิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
งานวิจัยด้าน: วิศวกรรมไฟฟ้า การอนุรักษ์พลังงาน

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

เทคนิคการลดกำลังสูญเสียในบั๊กคอนเวอร์เตอร์ด้วยวงจร RCD สนับเบอร์ผ่านการจำลองการทำงาน

Power Loss Reduction Technique in Buck Converter with RCD Snubber Circuits through Simulation

ชาริทัศน์ นาคประทุม[1*] สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์[1] และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ[1]
[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: charitus-n@rmutp.ac.th[*]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converters) แบบดั้งเดิมด้วยวงจร RCD สนับเบอร์ (RCD Snubber) เพื่อลดกำลังสูญเสีย ที่เกิดจากการทำงานของวงจรสวิตช์ในบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ให้ได้การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และเพิ่มความเสถียรของจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่รับพลังงานไฟฟ้า โดยใช้การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (R2023b – academic use) โดยทำการทดสอบกับบั๊กคอนเวอร์เตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกำลังสูญเสียทั้งก่อนและหลังปรับปรุง โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวงจรที่ปรับปรุงมีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: บั๊กคอนเวอร์เตอร์, กำลังสูญเสีย, วงจร RCD สนับเบอร์

Abstract

This paper presents the enhancement of traditional Buck converters in solar power systems using RCD snubber circuits to reduce power loss caused by the switching operations within the Buck converter. The aim is to achieve maximum efficiency and increase the stability of power supply to loads that receive electrical energy. The performance is analyzed through simulation using MATLAB/Simulink (R2023b - academic use). Tests were conducted on Buck converters with two different power ratings to compare power losses before and after improvement. The results demonstrate that the enhanced circuit performs better than the traditional design.

Keywords: Buck converters, power loss, RCD snubber circuits

1. บทนำ

ประสิทธิภาพของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converters) ขึ้นอยู่กับสองส่วนที่สำคัญ โดยส่วนที่หนึ่งคือสายไฟที่เชื่อมต่อระบบและสายไฟที่เชื่อมต่อแบตเตอรี่กับโหลด ประสิทธิภาพของส่วนนี้ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของสายไฟดังกล่าว ส่วนที่สองคือวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบซึ่งก็คือวงจร Rectifier และวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ โดยกำลังสูญเสียที่บั๊กคอนเวอร์เตอร์นั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของส่วนที่สอง และประสิทธิภาพของโดยรวมของระบบฯ นั่นคือหากลดกำลังสูญเสียของบั๊กคอนเวอร์เตอร์ได้ ประสิทธิภาพของระบบฯ ก็จะเพิ่มขึ้นนั่นเอง

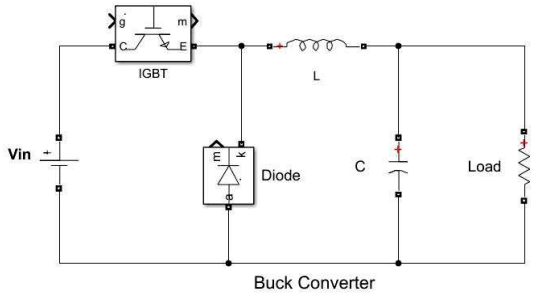
วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์อาศัยหลักการให้อุปกรณ์สวิตช์ทำงานสองสถานะ นั่นคือสถานะนำกระแส (On) และหยุดนำกระแส (Off) ให้สัมพันธ์กับการเก็บและคายพลังงานของตัวเหนี่ยวนำในวงจรเพื่อให้แรงดันเอาต์พุตต่ำกว่าแรงดันอินพุต โดยแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับสมการอัตราลดแรงดันของบั๊กคอนเวอร์เตอร์ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญคือวัฏจักรงาน (Duty Cycle: D) หรือช่วงที่อุปกรณ์สวิตช์นำกระแสในแต่ละคาบการสวิตช์ (Switching Period) และดังที่ทราบกันว่ากำลังสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์มาจากสองส่วน คือ กำลังสูญเสียขณะนำกระแส (Conduction Loss) และกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ (Switching Loss) ซึ่งเกิดขึ้นทั้งในช่วงเริ่มนำกระแส (Turn-On Loss) และช่วงเริ่มหยุดนำกระแส (Turn-Off Loss) โดยกำลังสูญเสียขณะสวิตช์จะแปรตามความถี่การสวิตช์ (Switching Frequency) ดังนั้นบทความนี้จึงเสนอเทคนิคการลดกำลังสูญเสียในบั๊กคอนเวอร์เตอร์โดยใช้การจำลองการทำงานผ่านโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) โดยเน้นเฉพาะการลดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ เมื่อใช้ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมในอุตสาหกรรม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter)

วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) เป็นวงจรที่ใช้สำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต (Output) ให้มีค่าต่ำกว่าแรงดันทางด้านอินพุต (Input) ที่ป้อนเข้ามาในวงจร หรือเรียกว่าวงจรลด

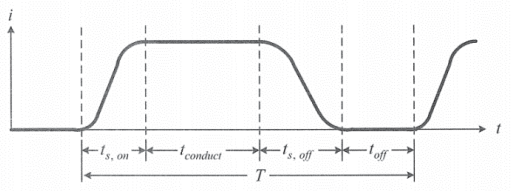
ระดับแรงดัน (Step-down Converter) โดยในบทความนี้เลือกใช้ ไอจีบีที (IGBT) เป็นสวิตช์หลักในวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม

2.2 กำลังสูญเสียของอุปกรณ์สวิตช์

การสูญเสียที่ตัวสวิตช์นับว่าเป็นประเด็นสำคัญของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การสูญเสียหรืออีกนัยหนึ่งหมายถึงประสิทธิภาพของระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความสูญเสียหลัก อันเกิดจากอุปกรณ์สวิตช์ ซึ่ง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจการสูญเสียอันเนื่องมาจากการทำงานของสวิตช์ ซึ่งจะมีสองลักษณะ การทำงานด้วยกัน คือ สถานะนำกระแส และสถานะไม่นำกระแส มีช่วงเปลี่ยนสถานะการทำงานของสวิตช์จากนำกระแสไปเป็นไม่นำกระแส และจากไม่นำกระแสเป็นนำกระแสซึ่งจะนิยามชื่อเรียกช่วงเวลาในการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ช่วงเวลาของกระแส ณ ช่วงเวลาต่างๆ

2.3 วงจร RCD สนับเบอร์ (RCD Snubber Circuit)

วงจร RCD สนับเบอร์ (Resistor-Capacitor-Diode Snubber) เป็นวงจรที่ใช้ลด แรงดันและกระแสพุ่งสูง (Voltage/Current Spikes) รวมถึงลดการรบกวนทางไฟฟ้า (Switching Noise) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลับสถานะของสวิตช์กำลัง (Power Switch) ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ เช่น บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Boost Converter), บั๊กคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) และอื่นๆ วงจรนี้ช่วยปกป้องอุปกรณ์กึ่งตัวนำกำลัง (เช่น MOSFET, IGBT) จากความเสียหายเนื่องจากแรงดันเกิน (Overvoltage) และเพิ่มเสถียรภาพการทำงานของระบบ

ในบทความนี้เลือกใช้วงจรสนับเบอร์ชนิด RCD Snubber ที่เชื่อมต่อกันแบบผสมขนานกับไดโอดเมื่อมีการสลับสวิตช์ ตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่สะสมพลังงานชั่วคราวจากแรงดันพุ่งสูง และตัวต้านทานจะช่วยดูดซับพลังงานส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากแรงดันหรือกระแสพุ่งสูง และกระจายพลังงานเป็นความร้อน ส่วนไดโอดจะนำพลังงานส่วนเกินจากสวิตช์ไปเก็บในตัวเก็บประจุ

การทำงานร่วมกันขององค์ประกอบเหล่านี้ช่วยลดการสูญเสียพลังงานและป้องกันอุปกรณ์ไม่ให้เสียหายจากแรงดันและกระแสที่สูงเกินไป

การเลือกค่าของตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวต้านทาน (Resistor) สามารถคำนวณได้จากสมการ

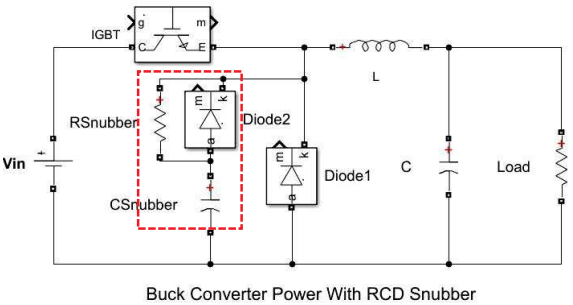
$$C = \frac{L \cdot I_{peak}^2}{V_{snubber}^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{2 \cdot f_{sw} \cdot C} \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ C คือ ค่าของตัวเก็บประจุที่เลือกใช้ในวงจร RC Snubber, L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance), $V_{snubber}$ คือ แรงดันที่ตกคร่อมสนับเบอร์, I_{peak} คือ กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านสวิตช์, R คือ ค่าความต้านทานที่เลือกใช้ในวงจร RC Snubber และ f_{sw} คือ ความถี่ของสวิตช์ที่ใช้ในวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์

3. การดำเนินงานวิจัยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

นำวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ (ดั้งเดิม)ในรูปที่ 1 มาเป็นต้นแบบเพื่อปรับปรุงด้วยการใช้ไอจีบีทีเป็นสวิตช์หลัก โดยจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการเพิ่มวงจรสนับเบอร์แบบ RCD Snubber ขนานกับไดโอดของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3



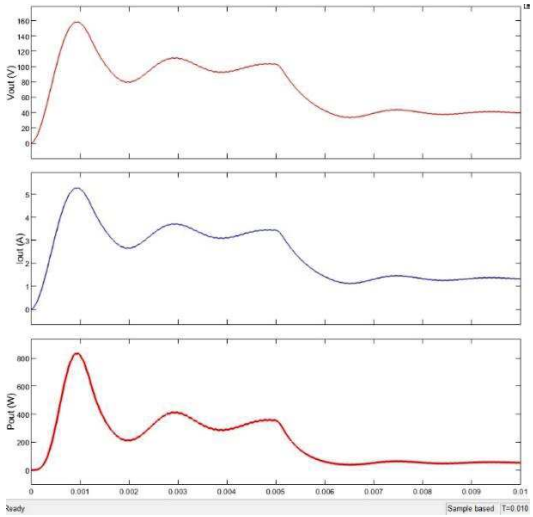
รูปที่ 3 วงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบปรับปรุงด้วยวงจรสนับเบอร์

โดยวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบปรับปรุงด้วยวงจรสนับเบอร์มีการกำหนดค่าของอุปกรณ์ต่างๆที่คำนวณได้จากสมการดังนี้

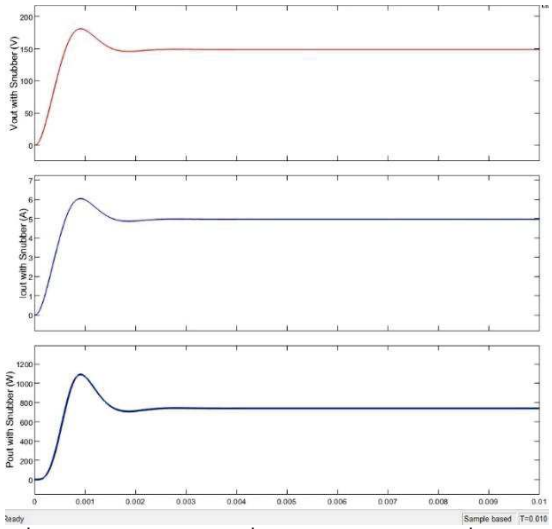
f_{sw} =100 กิโลเฮิรตซ์, L=3 มิลลิเฮนรี, C=30 ไมโครฟารัด
Load=30 โอห์ม, $C_{snubber}$=800 นาโนฟารัด, $R_{snubber}$=20 โอห์ม

3.1 การจำลองการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์

การจำลองการทำงานของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์ โดยวัดค่าแรงดันตกคร่อมโหลด ค่ากระแสที่ผ่านโหลด และกำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ตามลำดับ



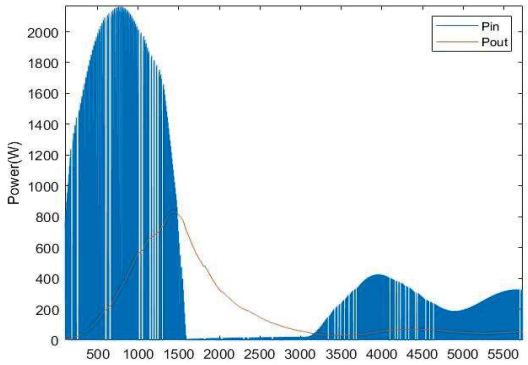
รูปที่ 4 แรงดันตกคร่อม กระแสที่ผ่านโหลดและกำลังไฟฟ้าที่โหลดของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม



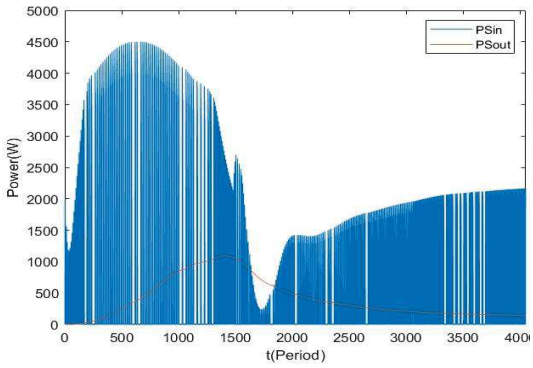
รูปที่ 5 แรงดันตกคร่อม กระแสที่ผ่านโหลดและกำลังไฟฟ้าที่โหลดของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยวงจร RCD สนับเบอร์

4.เปรียบเทียบผล

เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่อินพุตและเอาต์พุตของทั้งสองวงจรโดยใช้โปรแกรม MATLAB



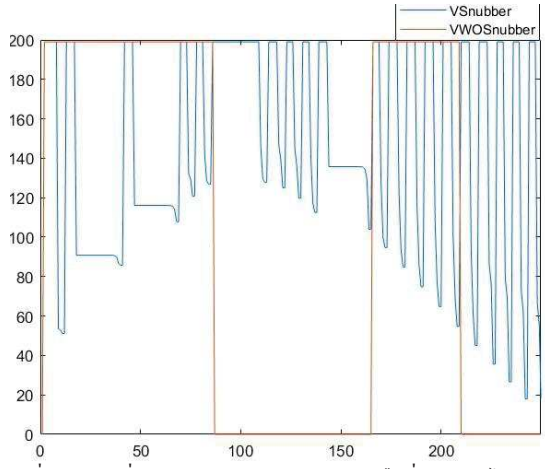
รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่อินพุตและค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม



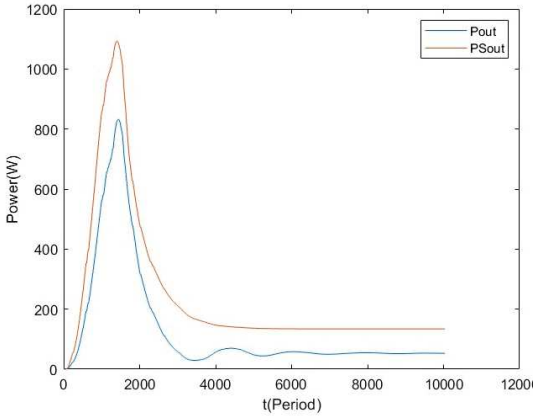
รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่อินพุตและเอาต์พุตของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์

จากรูปที่ 6 และ รูปที่ 7 ค่ากำลังไฟฟ้าของอินพุตและเอาต์พุตที่วัดได้จากทั้งสองวงจรมีลักษณะแตกต่างกัน โดยที่อัตราส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่ออินพุตจากวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจรสนับเบอร์มีค่ามากกว่าค่ากำลังของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิม แสดงให้เห็นว่าวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์ที่ปรับปรุงแล้วมีประสิทธิภาพมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเกิดจากการลดกำลังสูญเสีย

จากการทดลองวัดค่าแรงดันที่วงจร RCD Snubber หรือแรงดันตกคร่อมไดโอด จะสังเกตเห็นรูปคลื่นสัญญาณลักษณะเฉพาะ ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยในช่วงสวิตช์ปิด (OFF) จะเกิด Voltage Spike ขึ้น เนื่องจากพลังงานที่เก็บไว้จากการเหนี่ยวนำ (Inductance) ของขดลวดวงจร RCD Snubber จะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานส่วนนี้ ทำให้แรงดันไม่พุ่งสูงเกินไป



รูปที่ 8 แรงดันที่ตกคร่อมวงจร RCD Snubber หรือที่ตกคร่อมไดโอด



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์แบบดั้งเดิมและที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์

5. สรุป

วงจร RCD Snubber เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพโดยสามารถลดแรงดันพุ่งสูง ได้ 30-50% และลด Switching Loss ลง 20-40% การออกแบบที่เหมาะสมต้องคำนึงถึงการเลือกค่าองค์ประกอบและความถี่การทำงานของระบบ เพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดและลดการสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด

บทความนี้เป็นการปรับปรุงวงจรบั๊กคอนเวอร์เตอร์จากการเพิ่มวงจร RCD สนับเบอร์เข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ โดยจำลองการทำงานผ่านโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการใช้วงจรสนับเบอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานในอุปกรณ์สวิตช์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากวงจรสนับเบอร์ช่วยให้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นและเป็นการลดกำลังสูญเสียจากวงจรเดิม ซึ่งวงจรสนับเบอร์ช่วยลดช่วงเวลาในแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต ช่วยลดการปล่อยพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ ทำให้ไม่เสียพลังงานที่ไม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลที่ตามมาคือ บั๊กคอนเวอร์เตอร์จะทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพมากขึ้น และยังช่วยป้องกันสวิตช์และอุปกรณ์อื่นจาก High Voltage transients ได้ด้วย นำมาซึ่งการเพิ่มอายุการใช้งานของสวิตช์และอุปกรณ์อื่นๆ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนบทความวิจัยนี้จนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] Sakhon Woothipatanapan, Anuwat Jangwanitlert, and Phop Chancharoensook, “Efficiency Improvement of Converter for Switched Reluctance Motor Drives by Mixed Parallel Operation of IGBT and MOSFET,” 2010 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2010), Fukuoka, Japan, 2010, pp. 1841-1846.

[2] William McMurray, “SELECTION OF SNUBBERS AND CLAMPS TO OPTIMIZE THE DESIGN OF TRANSISTOR SWITCHING CONVERTERS”, IEEE IAS transactions, Vol. IA-16, No. 4, July/ August 1980, pp. 513-523.

[3] William McMurray, “OPTIMUM SNUBBERS FOR POWER SEMICONDUCTORS”, IEEE IAS transactions, Vol. IA-8, No. 5, Sept/Oct 1972, pp. 593-600.

[4] Seedarala Likhith, Setlem Bhargavi, Manitha P.V, Lekshmi S, “DC-DC Converter for EV Charger with Controlling Unit”, 2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT) Goa, India. Jan 21-22, 2022, pp. 1-4.

[5] A. R. Vaz and F. L. Tofoli, "Practical design of a DC-DC buck converter using an RCD snubber", 14th Brazilian Power Electronics Conference COBEP 2017, Jul. 2017, pp. 1-6.

Special session on Electrical Engineering (SS1)

หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมไฟฟ้า

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษามาตรฐาน และการทดสอบแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงในประเทศไทย: บทวิเคราะห์และแนวโน้มในอนาคต

The Study on standards and testing of batteries for Electric Vehicle Conversion in Thailand: Analysis and future trends

ณัฐพันธ์ ฉนอมสัตย์[1]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โทรศัพท์ 0-3810-222-2 ต่อ 3380 E-mail: nattapan@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษามาตรฐานและการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงในประเทศไทย โดยวิเคราะห์กรอบการกำกับดูแลในปัจจุบันที่ครอบคลุมมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) สำหรับรถยนต์และรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงมาตรฐานบริการสำหรับการดัดแปลง (มอก. เอส 221/222) นอกจากนี้ยังพิจารณาบทบาทของกรมการขนส่งทางบก (ขบ.) และหน่วยงานภาครัฐอื่น ๆ รวมถึงความเป็นไปได้ในการนำ UN Regulations และมาตรฐานสากลอื่น ๆ มาปรับใช้ ผลการวิเคราะห์พบว่าแม้ว่ากรอบนโยบาย และมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าของผู้ผลิตจากต่างประเทศ จะมีความแข็งแกร่ง แต่ยังขาดเกณฑ์เฉพาะที่เหมาะสมสำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ดัดแปลงโดยตรงที่ผู้ผลิตรายย่อยในประเทศ รวมถึงเกณฑ์การทดสอบ ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพในภาคส่วนนี้ ในที่สุด เพื่อรองรับการเติบโตอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง โดยเฉพาะในส่วนของแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนามาตรฐานเฉพาะ รวมถึงการทดสอบที่เหมาะสม และเสริมสร้างกระบวนการตรวจสอบที่เข้มงวดโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ: แบตเตอรี่, ยานยนต์ไฟฟ้า, การดัดแปลง, มาตรฐาน, การทดสอบ

Abstract

This article aims to study the standards and testing processes related to batteries for modified electric vehicles in Thailand. It analyzes the current regulatory framework, including industrial product standards (TIS) for electric cars and motorcycles, as well as service standards for modifications (TIS S 221/222). The article also looks at the role of the Department of Land Transport (DLT) and other government agencies, along with the possibility of applying UN Regulations and other international standards. The analysis shows that while policies and standards for electric vehicle batteries from foreign manufacturers are strong, there are no specific criteria or testing standards for batteries in locally modified vehicles by small domestic manufacturers. This creates uncertainty about safety and performance in this sector. To support the sustainable growth of the modified electric vehicle industry, especially in terms of batteries, it is important to develop specific standards, proper testing procedures, and stronger inspection processes by the responsible authorities.

Keywords: Battery, Electric Vehicle, Conversion, Standards, Testing

1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ประเทศไทยได้เห็นการเติบโตอย่างรวดเร็วของตลาดยานยนต์ไฟฟ้า ไม่เพียงแต่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตดั้งเดิม (OEM) แต่ยังรวมถึงการดัดแปลงยานยนต์ที่มีเครื่องยนต์สันดาปภายในให้กลายเป็นยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ต้นทุนการดำเนินงานที่ลดลง และความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี แนวโน้มนี้ทำให้เกิดความต้องการกรอบการกำกับดูแลและมาตรฐานที่ชัดเจน เพื่อรับรองความปลอดภัยและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า [1,2] โดยเฉพาะในยานยนต์ที่ดัดแปลงโดยไม่ได้มาจากโรงงานผลิตโดยตรง ขั้นตอนการทดสอบแบตเตอรี่ที่เป็นมาตรฐาน จึงมีบทบาทสำคัญในการบรรลุเป้าหมาย และสร้างความมั่นใจให้กับผู้บริโภคในยานยนต์ที่ได้รับการดัดแปลง รวมถึงอำนวยความสะดวกในแนวทางการปฏิบัติตามกฎระเบียบที่ชัดเจนต่อไป

2. มาตรฐาน การทดสอบ และกรอบกฎหมายในปัจจุบันในประเทศไทย

2.1 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งรวมถึง

- **มอก. 3026-2563 (UN R100):** ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสำหรับระบบส่งกำลังด้วยไฟฟ้าของรถยนต์ (ประเภท M และ N) [3]
- **มอก. 2952-2561 (UN R136):** ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสำหรับระบบส่งกำลังด้วยไฟฟ้าของรถจักรยานยนต์ (ประเภท L) [4]

แม้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อใช้กับผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตโดยตรง แต่เกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่กำหนดสามารถทำหน้าที่เป็นข้ออ้างอิงในการประเมินแบตเตอรี่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงได้

2.2 มาตรฐานบริการสำหรับการดัดแปลง

เพื่อรองรับการดัดแปลงยานยนต์ให้เปลี่ยนเป็นยานยนต์ไฟฟ้าในอู่ผู้ประกอบการ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้กำหนดมาตรฐานแบบสมัครใจไว้ดังนี้

- **มอก. เอส 221-2565:** สำหรับการดัดแปลงรถยนต์ให้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า [5]
- **มอก. เอส 222-2566:** สำหรับการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า (หรือฉบับปรับปรุงจาก มอก. เอส 222-2565) [6]

มาตรฐานเหล่านี้เน้นเรื่องการบันทึกข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ (เช่น ชื่อผู้ผลิต รุ่น ชนิดเซลล์ และความจุ) ซึ่งช่วยยืนยันความสามารถในการตรวจสอบและบำรุงรักษาในอนาคต แต่ไม่ได้ระบุขั้นตอนการทดสอบด้านความปลอดภัยในเชิงเทคนิคที่ละเอียดเหมือนกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์สำหรับรถจากโรงงานผลิตโดยตรง

2.3 การทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีศูนย์ทดสอบแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล ดังนี้

- **TÜV SÜD Thailand:** ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมอมตะนคร ให้บริการทดสอบแบตเตอรี่และชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า รวมถึงการรับรองมาตรฐานแบตเตอรี่ตามข้อกำหนดสากล เช่น UNECE R100
- **สถาบันยานยนต์:** ตั้งอยู่ที่ศูนย์ทดสอบยานยนต์และยางล้อแห่งชาติ (ATTRIC) อำเภอสนามชัยเขต จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นศูนย์ทดสอบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าครบวงจรแห่งแรกในอาเซียน
- **PTEC (ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์):** เป็นศูนย์ทดสอบที่มีความล้ำหน้าในด้านการทดสอบแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนและชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้มาตรฐานสากล เช่น UN R100 และ UN R136

2.4 กฎหมายและประกาศของกรมการขนส่งทางบก (ขบ.)

ภายใต้พระราชบัญญัติรถยนต์ พ.ศ. 2562 กฎระเบียบและประกาศจากกรมการขนส่งทางบกมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการดัดแปลงยานยนต์ โดยกำหนดให้มีการจัดทำเอกสารและการตรวจสภาพรถในกรณีดัดแปลง นอกจากนี้ ขบ. ได้ออกประกาศเพื่อให้นำมาตรฐานสากล (เช่น UN R100 และ UN R136) มาใช้ในการประเมินเบื้องต้นเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้า

3. การวิเคราะห์และอภิปรายผล

3.1 การกำกับดูแลและการรับรอง

จากการวิเคราะห์พบว่า

- **บทบาทของหน่วยงานรัฐ:**
  - **สำนักงานสมอ.** รับผิดชอบในการกำหนดและตรวจสอบมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่
  - **กรมการขนส่งทางบก (ขบ.)** ดูแลด้านการอนุญาตและตรวจสภาพการดัดแปลง เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดและมาตรฐานที่มีอยู่
  - **องค์กรภาคเอกชน (เช่น TÜV SÜD):** ทำการทดสอบและรับรองคุณภาพในระดับสากล
- **การนำมาตรฐานสากลมาใช้:**
  ประเทศไทยได้แสดงให้เห็นถึงความมุ่งมั่นในการรับรองมาตรฐานความปลอดภัยของแบตเตอรี่ ด้วยการอ้างอิง UN Regulations (R100 และ R136) นอกจากนี้ ยังมีการพิจารณานำมาตรฐาน ISO และ IEC และมาตรฐานอื่นที่เทียบเคียงจากผู้ผลิตแบตเตอรี่โดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จากประเทศจีน ที่เป็นผู้ผลิตรายใหญ่ที่สุดของโลก มาใช้เพื่อให้เกิดความเป็นสากลในแนวปฏิบัติ

3.2 มาตรฐานและข้อบังคับหลัก

มาตรฐาน/ข้อบังคับ	คำอธิบาย	ใช้กับ	หน่วยงานที่รับผิดชอบ
มอก. 3026-2563 (UN R100)	ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าผู้ใช้งานรถยนต์ รวมถึงการทดสอบแบตเตอรี่ครบวงจร	รถยนต์ไฟฟ้า (OEM/ดัดแปลง)	สมอ.
มอก. 2952-2561 (UN R136)	ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยสำหรับระบบส่งกำลังโดยเฉพาะรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า พร้อมการทดสอบแบตเตอรี่	รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า (OEM/ดัดแปลง)	สมอ.
มอก. เอส 221-2565	มาตรฐานบริการสำหรับการดัดแปลงรถยนต์ให้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า โดยเน้นการบันทึกข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่	ผู้ให้บริการดัดแปลงรถยนต์	สมอ.
มอก. เอส 222-2566	มาตรฐานบริการสำหรับการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า โดยเน้นการบันทึกข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่	ผู้ให้บริการดัดแปลงรถจักรยานยนต์	สมอ.
ข้อบังคับภายใต้พระราชบัญญัติรถยนต์	กำหนดหลักเกณฑ์การแก้ไขและดัดแปลงยานยนต์ รวมถึงการตรวจสภาพและอนุมัติจากกรมการขนส่งทางบก	รถดัดแปลงทุกประเภท	กรมการขนส่งทางบก
ประกาศของกรมการขนส่งทาง	นำมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับของแบตเตอรี่มาใช้ในการกำกับดูแลและกำหนด	รถยนต์และรถจักรยานยนต์	กรมการขนส่งทางบก
บก (UN R100, R136)	คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดพลังงานไฟฟ้าในรถยนต์และรถจักรยานยนต์	ไฟฟ้า (OEM/ดัดแปลง)	
(ร่าง) มาตรฐานสำหรับการดัดแปลง EV	แนวทางและข้อกำหนดทางเทคนิคที่คาดว่าจะพัฒนาเพื่อรองรับการดัดแปลงยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะในระบบแบตเตอรี่	รถยนต์ดัดแปลงทุกประเภท	สมอ./ขบ. (อยู่ระหว่างการพัฒนา)

3.3 ช่องว่างและความท้าทายในส่วนยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง

แม้ว่ากรอบกำกับดูแลสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าของผู้ผลิตจะมีความครบถ้วน แต่ในส่วนของยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงนั้น ยังขาดมาตรฐานเฉพาะสำหรับแบตเตอรี่โดยตรง ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในเรื่อง

- การปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัย
- การประกันคุณภาพและความเข้ากันได้ของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้
- กระบวนการอนุมัติที่อาจซับซ้อน เนื่องจากการอ้างอิงมาตรฐานที่ไม่เหมาะสมพร้อมกับการบันทึกข้อมูลจำเพาะเพียงอย่างเดียว

และจากการวิเคราะห์พบว่าหลักเกณฑ์และมาตรฐานที่ใช้สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าของผู้ผลิตรถยนต์ไฟฟ้าโดยตรง (เช่น มอก. 3026-2563 และ มอก. 2952-2561) ถือเป็นรากฐานความปลอดภัยและประสิทธิภาพที่สำคัญสำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้า แต่ยังคงมีช่องว่างในกรอบการกำกับดูแล และมาตรฐานเฉพาะสำหรับยานยนต์ที่ดัดแปลง ดังนั้น เพื่อลดช่องว่าง รวมถึงการสร้างความมั่นใจให้ผู้บริโภคในการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง จึงควรที่จะ

- **พัฒนามาตรฐานเฉพาะสำหรับการดัดแปลง:** ควรมีการพัฒนามาตรฐานที่เฉพาะเจาะจงในด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ดัดแปลง
- **เสริมสร้างกระบวนการตรวจสอบ:** ทั้งในด้านการรับรองและการทดสอบโดยหน่วยงานรัฐและองค์กรภาคเอกชน ควรทำงานร่วมกันอย่างใกล้ชิด
- **ติดตามแนวโน้มและการพัฒนา:** ด้วยความเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีและความต้องการในตลาดหลังการขาย ควรมีการทบทวนและปรับปรุงมาตรฐานอย่างต่อเนื่องเพื่อรองรับอนาคต

3.4 แนวโน้มในอนาคต และการพัฒนาต่อเนื่อง

ด้วยการจัดตั้งสมาคมยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงแห่งประเทศไทย (ECAT) และการริเริ่มจากคณะกรรมการยานยนต์ไฟฟ้า (EV Board) รวมถึงรายงานหารือประเด็นร่างมาตรฐานในอนาคต แนวโน้มการพัฒนากฎระเบียบที่เฉพาะเจาะจงสำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ดัดแปลงจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมุ่งเน้นด้านความปลอดภัย ประสิทธิภาพและการติดตามผลการใช้งานในระยะยาว ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีที่บ่งบอกว่าในอนาคตจะมีความพยายามในการพัฒนามาตรฐานเฉพาะสำหรับยานยนต์ดัดแปลงมากขึ้น ทั้งนี้ ความร่วมมือระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชน และนักวิจัยจะเป็นกุญแจสำคัญในการผลักดันให้เกิดแนวทางที่ชัดเจนและเป็นมาตรฐานภายในภาคส่วนนี้ให้เติบโตอย่างยั่งยืน

4. สรุป

จากการวิเคราะห์พบว่ากรอบการกำกับดูแลด้านกฎหมายและมาตรฐานสำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลงในประเทศไทยมีการวางรากฐานที่ดี อย่างไรก็ตาม ยังมีช่องว่างที่ต้องเติมเต็มในเรื่องของข้อกำหนดเฉพาะทางสำหรับแบตเตอรี่ในยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง การนำมาตรฐานสากลมาใช้ในบางส่วนช่วยส่งเสริมความปลอดภัย แต่ความท้าทายด้านการประกันคุณภาพ และมาตรฐานเฉพาะยังคงต้องได้รับการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง การผลักดันให้มีการพัฒนามาตรฐานเฉพาะสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง จะช่วยให้อุตสาหกรรมนี้เติบโตได้อย่างยั่งยืน สอดคล้องกับแนวปฏิบัติระดับสากลและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคในยุคที่ความปลอดภัย และประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] นิรันดร์ วสันติอุปโภคากร, ตระกูล จิตวัฒนากร, เกียรติ บุญยโพ. (2566). แนวโน้มและมาตรการทางกฎหมายเกี่ยวกับธุรกิจรถยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง ในประเทศไทย, วารสารสังคมศาสตร์และวัฒนธรรม, ปีที่ 7 ฉบับที่ 5 (พฤษภาคม 2566), 199-210.

[2] Fayez Alanazi, 2023, Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation, Appl. Sci. 2023, 13(10), 6016.

[3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2568), หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่ออนุญาต สำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยานยนต์ประเภท M และ N : คุณลักษณะเฉพาะสำหรับระบบส่งกำลังด้วยไฟฟ้า. มาตรฐานเลขที่ มอก. 3026-2563, เรียกใช้เมื่อ 7 เมษายน 2568 จาก https://appdb.tisi.go.th/tis_devs/p12/file_pr/pr-729.pdf

[4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2568), หลักเกณฑ์เฉพาะในการตรวจสอบเพื่อการอนุญาต สำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมยานยนต์ประเภท L : คุณลักษณะเฉพาะสำหรับระบบส่งกำลังด้วยไฟฟ้า มาตรฐานเลขที่ มอก. 2952-2561. เรียกใช้เมื่อ 7 เมษายน 2568 จาก http://law.industry.go.th/laws/file/61156

[5] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2568), การบริการดัดแปลงรถยนต์ไฟฟ้า มอก. เอส 221-2565. เรียกใช้เมื่อ 7 เมษายน 2568 จาก https://www.tisi.go.th/assets/website/pdf/tiss/s221-2565.pdf

[6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม (2568), การบริการดัดแปลงรถจักรยานยนต์ไฟฟ้า มอก. เอส 222-2565. เรียกใช้เมื่อ 7 เมษายน 2568 จาก https://www.tisi.go.th/assets/website/pdf/tiss/s222-2565.pdf



ดร. ณัฐพันธ์ ถนอมสัตย์ ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง อีอีซี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา หัวข้องานวิจัยที่สนใจ ยานยนต์ไฟฟ้าดัดแปลง และยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่

หัวข้องานวิจัยด้านการบริหาร การจัดการ ด้วยขบวนการร่วมกับเทคโนโลยี เพื่อเกิดการพัฒนา

(SS2)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การประเมินผลการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ

Evaluation of Technology Development for Enhancing Laboratory Management

ณัฏฐณิชา จันทร์ปัญญา[1*] นิติธร เคนโยธา[1] จริยา บัวเจริญ[1,2] และ นงลักษณ์ ตั้งไพศาลกุล[3]
[1*]ศูนย์การเปลี่ยนแปลงทางดิจิทัล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย
[2]ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย
[3]ฝ่ายมาตรวิทยาเคมีและชีวภาพ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ปทุมธานี ประเทศไทย
E-mail: nattanichaj@nimt.or.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของห้องปฏิบัติการในหลายด้าน อาทิเช่น ระบบคลาวด์สำหรับบริหารจัดการอุปกรณ์และการติดตามด้านมาตรวิทยา ระบบเทคโนโลยีการบันทึกผลการสอบเทียบอัตโนมัติด้วยระบบวิชั่น และระบบการวัดค่าโดยตรงในกระบวนการผลิต บทความนี้ ผู้วิจัยได้ทำการประเมินการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการโดยใช้แบบประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ วิธีการประเมินที่ 1 เน้นการประเมินประสิทธิภาพของการดำเนินงานและคุณภาพของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น พบว่า คะแนนประเมินอยู่ในระดับดี และวิธีการประเมินที่ 2 เน้นไปที่การวิเคราะห์เชิงกลยุทธ์และศักยภาพของเทคโนโลยีในระยะยาว พบว่า คะแนนประเมินอยู่ในระดับ A เมื่อนำผลการประเมินทั้งสองประเมินเป็นภาพรวม พบว่า อยู่ในระดับ A แสดงให้เห็นว่า การพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการได้จริง และมีศักยภาพในการนำไปใช้และพัฒนาต่อยอดในอนาคต

คำสำคัญ: เทคโนโลยีดิจิทัล, ระบบคลาวด์, การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ

Abstract

Currently, the National Institute of Metrology Thailand (NIMT) has developed digital technologies to support laboratory operations in various aspects. These include a cloud-based system for equipment management and metrology tracking, an automated calibration recording system utilizing vision technology, and a direct measurement system integrated into production processes. This study evaluates laboratory management through two assessment approaches. The first assessment method focuses on evaluating operational efficiency and the quality of outcomes, resulting in a 'Good' rating. The second assessment method emphasizes strategic analysis and the long-term potential of the technology, with the evaluation score rated as 'A.' Upon combining the results of both assessments, the overall evaluation score achieved an 'A' rating. These findings demonstrate that the development of these digital technologies can effectively enhance laboratory management efficiency and holds significant potential for future application and advancement.

Keywords: Digital Technologies, Cloud-based System, Laboratory Management,

1. บทนำ

ห้องปฏิบัติการมีบทบาทสำคัญในหลากหลายสาขาไม่ว่าจะเป็นการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ การแพทย์ หรืออุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการเหล่านี้จำเป็นต้องมีการบริหารจัดการที่ดี โดยในอดีต การดำเนินงานส่วนใหญ่ยังคงอาศัยกระบวนการแบบดั้งเดิมที่ใช้เอกสารและการบันทึกข้อมูลด้วยตนเอง ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาด ความล่าช้า และความซ้ำซ้อนของข้อมูล เนื่องจากกระบวนการดั้งเดิมที่ใช้เอกสารและการบันทึกข้อมูลด้วยตนเองมีข้อจำกัดในการจัดการข้อมูลที่มีปริมาณมากและซับซ้อน อีกทั้งการดำเนินงานที่อาศัยระบบการบันทึกด้วยตนเองยังใช้เวลาและทรัพยากรในการตรวจสอบและบันทึกข้อมูลซ้ำ ๆ ซึ่งทำให้การดำเนินงานไม่คล่องตัวและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในการจัดการกระบวนการต่าง ๆ นั้น เนื่องจากสามารถบันทึกข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ลดความซ้ำซ้อนในการทำงาน อีกทั้งยังช่วยลดเวลาในการตรวจสอบและจัดการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.) เป็นองค์กรที่มีส่วนสำคัญของกิจกรรมทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่รวมถึงทั้งภาครัฐและเอกชนที่ให้บริการเกี่ยวข้องกับการตรวจวัด สอบเทียบ และรับรองผลการสอบเทียบความถูกต้องแม่นยำของปริมาณทางกายภาพ ซึ่งปัจจุบัน มว. ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของห้องปฏิบัติการในหลายด้าน ได้แก่

- การพัฒนาระบบคลาวด์สำหรับบริหารจัดการอุปกรณ์และการติดตามด้านมาตรวิทยา เรียกว่า Equipment Management and Tracking System (EMTs) - Cloud Service for Calibration Certificate Management

- การพัฒนาต้นแบบเทคโนโลยี กระบวนการ หรือบริการใหม่ด้านมาตรวิทยาด้วยระบบเทคโนโลยีการบันทึกผลการสอบเทียบอัตโนมัติด้วยระบบวิชั่น

- การพัฒนาระบบการวัดค่าหรือข้อมูลทางมาตรวิทยาที่เกิดขึ้นโดยตรงในกระบวนการผลิต (In-line measurement)

ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับห้องปฏิบัติการจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยยกระดับมาตรฐานการดำเนินงาน ตลอดจนเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการด้านมาตรวิทยา ดังนั้น การวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินผลการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบ และหาแนวทางในการพัฒนาต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งผลการวิจัยที่ได้จะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม และนำไปสู่การพัฒนาห้องปฏิบัติการที่มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการในอนาคต

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

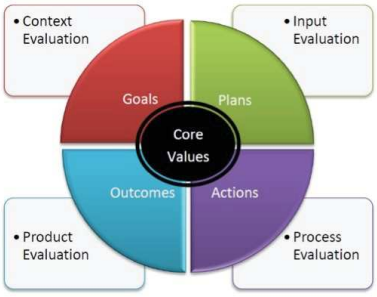
2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ [5]

การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการเป็นกระบวนการที่สำคัญในการรักษาประสิทธิภาพการดำเนินงานให้ถูกต้องตามมาตรฐานที่กำหนด โดยสามารถแบ่งออกเป็นหลายด้านเพื่อให้การทำงานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถตรวจสอบได้ การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากรทั้งหมดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ เช่น อุปกรณ์ เครื่องมือ บุคลากร และข้อมูล รวมไปถึงการบริหารงานที่เกี่ยวข้องกับเวิร์กโฟลว์ การควบคุมคุณภาพ และการรักษาความปลอดภัย

2.1.2 CIPP Model (Context, Input, Process, Product) [3]

เป็นแนวทางการประเมินที่พัฒนาโดย Daniel L. Stufflebeam ซึ่งใช้ในการประเมินโครงการหรือระบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจและปรับปรุงโครงการ โมเดลนี้แบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 องค์ประกอบของโมเดล CIPP

1. Context (บริบท) คือ การประเมินความเหมาะสมของโครงการในเชิงนโยบาย วัตถุประสงค์ และความต้องการของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เช่น การประเมินว่าโครงการนั้นมีความสอดคล้องกับความต้องการในสถานการณ์ปัจจุบันและอนาคตหรือไม่ รวมถึงการพิจารณาบริบทภายในและภายนอกที่มีผลต่อความสำเร็จของโครงการ

2. Input (ปัจจัยนำเข้า) คือ การวิเคราะห์ทรัพยากรที่ใช้ในการดำเนินโครงการ เช่น บุคลากร งบประมาณ เทคโนโลยี และแผนการดำเนินงาน โดยประเมินว่าทรัพยากรที่มีอยู่เพียงพอและเหมาะสมกับการดำเนินโครงการหรือไม่ และสามารถนำไปสู่การบรรลุเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่

3. Process (กระบวนการ) คือ การติดตามและประเมินขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด และสามารถดำเนินไปตามแผนที่กำหนดหรือไม่

4. Product (ผลลัพธ์) คือ การประเมินผลสัมฤทธิ์ของโครงการ โดยพิจารณาทั้งในแง่ของผลลัพธ์ระยะสั้น ระยะยาว และความยั่งยืนของผลกระทบที่เกิดขึ้น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการและการประเมินโครงการเทคโนโลยี ดังนี้

Smith และคณะ (2564) [2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้ระบบ LIMS (Laboratory Information Management System) ในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ผลการศึกษาพบว่า การใช้ระบบ LIMS สามารถช่วยลดข้อผิดพลาดในการจัดการข้อมูลในห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ลงได้ถึง 30%

Brown และ Johnson (2563) [1] ได้นำเสนอกรอบแนวคิดในการประเมินโครงการด้านเทคโนโลยี ซึ่งพิจารณาจาก 5 ด้าน ได้แก่ ความสอดคล้อง ประสิทธิผล ประสิทธิภาพ ผลกระทบ และความยั่งยืน การพิจารณาทั้ง 5 ด้านนี้จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์และวัดผลกระทบของการนำเทคโนโลยีมาใช้ได้อย่างครอบคลุมประเมินโครงการด้าน

เทคโนโลยี ซึ่งพิจารณาจาก 5 ด้าน ได้แก่ ความสอดคล้อง ประสิทธิผล ประสิทธิภาพ ผลกระทบ และความยั่งยืน

นภัสกร โสภณธนะ (2562) [4] ได้ทำการศึกษาการพัฒนาระบบการจัดการห้องปฏิบัติการอัตโนมัติในมหาวิทยาลัย ซึ่งใช้เทคโนโลยี LIMS และ Equipment Tracking System ผลการศึกษาพบว่าการนำเทคโนโลยีเหล่านี้เข้ามาช่วยทำให้การบริหารจัดการห้องปฏิบัติการมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถลดเวลาในการประมวลผลข้อมูลและเพิ่มความแม่นยำในการจัดการอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะในด้านการจัดการการตรวจสอบและการตรวจรับอุปกรณ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเหล่านี้เป็นกรณีศึกษาส่วนนึงในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อบริหารจัดห้องปฏิบัติการ และกรณีศึกษาในการประเมินโครงการ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้จะช่วยเป็นแนวทางในการประเมินผลการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ

3. การดำเนินงาน

3.1 ออกแบบการประเมิน

การประเมินผลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

3.1.1 วิธีการประเมินที่ 1 เป็นการประเมินโครงการตาม 4 ส่วนหลัก โดยใช้เกณฑ์ที่อ้างอิงจากแนวคิดของ CIPP Model ซึ่งเป็นกรอบแนวคิดที่นิยมใช้ในการประเมินผลโครงการ มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การติดตามผลงานวิจัย

ส่วนที่ 2 ผลสัมฤทธิ์

ส่วนที่ 3 ความคุ้มค่าการวิจัย

ส่วนที่ 4 มาตรฐานและความพร้อมใช้ของงานวิจัย

3.1.2 การประเมินที่ 2 การประเมินตามหลักเกณฑ์ 5 ด้าน โดยอ้างอิงถึงหลักเกณฑ์การประเมินผลโครงการขององค์การความร่วมมือระหว่างประเทศแห่งญี่ปุ่น (Japan International Cooperation Agency: JICA) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

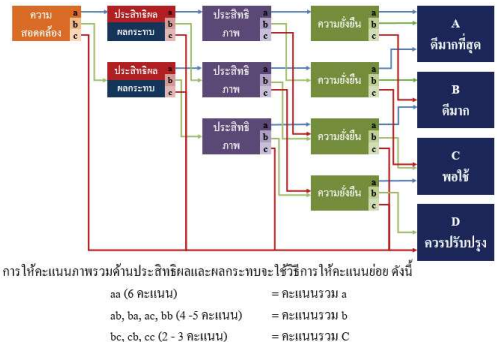
ด้านที่ 1 ความสอดคล้อง (Relevance)

ด้านที่ 2 ประสิทธิผล (Effectiveness)

ด้านที่ 3 ด้านประสิทธิภาพ (Efficiency)

ด้านที่ 4 ด้านผลกระทบ (Impact)

ด้านที่ 5 ด้านความยั่งยืน (Sustainability)



รูปที่ 2 เกณฑ์คะแนนภาพรวมการประเมิน 5 ด้าน

3.2 เก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลประเมิน

ประเมิน โดยใช้แบบประเมินทั้ง 2 การประเมิน ซึ่งประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมนำมาวิเคราะห์และสรุปผลการประเมินตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

4. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยโดยใช้แบบประเมิน 2 รูปแบบ ซึ่งทำการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ 6 ท่าน มีผลการประเมินดังนี้

4.1 การประเมินที่ 1: การประเมินตาม 4 ส่วน

ตารางที่ 1 ผลการประเมินการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อต่อยอดในการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ

รายการ	คะแนนที่ได้ (ร้อยละ)	ระดับการประเมิน
ส่วนที่ 1 การดำเนินงาน	83.33	ดี
ส่วนที่ 2 ผลสัมฤทธิ์	88.89	ดี
ส่วนที่ 3 ความคุ้มค่าการวิจัย	75.93	พอใช้
ส่วนที่ 4 มาตรฐานและความพร้อมใช้ของงานวิจัย	93.33	ดี
สรุปภาพรวม	**83.64**	**ดี**

ส่วนที่ 1 การดำเนินงาน ผลการประเมินระดับ ดี โดยส่วนนี้จะเป็นการประเมินเกี่ยวกับรายละเอียดทั้งหมด จากผลการประเมินจะแสดงให้เห็นว่าการดำเนินงานวิจัยมีการติดตามและควบคุมคุณภาพของงานวิจัยอย่างเหมาะสม

ส่วนที่ 2 ผลสัมฤทธิ์ ผลการประเมินระดับ ดี สะท้อนถึงความสำเร็จของที่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดไว้

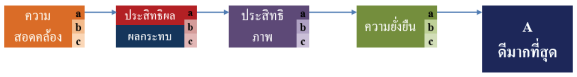
ส่วนที่ 3 ความคุ้มค่าการวิจัย ผลการประเมินระดับ พอใช้ แสดงให้เห็นว่ายังมีจุดที่สามารถพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความคุ้มค่าในการลงทุนและการใช้ทรัพยากร

ส่วนที่ 4 มาตรฐานและความพร้อมใช้ของงานวิจัย ผลการประเมินระดับ ดี แสดงถึงความมีมาตรฐานของผลงานและความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์

สรุปภาพรวม ผลการประเมินระดับ ดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีความสำเร็จในหลายด้าน อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับปรุงในเรื่องของความคุ้มค่าเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการนำไปใช้งานในอนาคต

4.2 การประเมินที่ 2 : การประเมินตามหลักเกณฑ์ 5 ด้าน

สรุปผลการประเมิน



รูปที่ 3 ผลคะแนนภาพรวมประเมิน

จากการประเมินทั้ง 5 ด้าน ได้แก่

1. ด้านความสอดคล้อง: คะแนน a งานวิจัยมีความสอดคล้องกับนโยบายและทิศทางของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เทคโนโลยีที่พัฒนาสามารถตอบโจทย์ปัญหาและความต้องการของห้องปฏิบัติการได้อย่างเหมาะสม

2. ด้านประสิทธิผล: คะแนน a สามารถบรรลุเป้าหมายที่กำหนดไว้ได้อย่างครบถ้วน เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานจริงและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานในห้องปฏิบัติการได้ นอกจากนี้ ยังช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการดำเนินงาน มีความคุ้มค่าในแง่ของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น

3. ด้านประสิทธิภาพ: คะแนน a สามารถดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการใช้ทรัพยากร บุคลากร และงบประมาณอย่างคุ้มค่า เทคโนโลยีที่พัฒนาสามารถลดต้นทุนด้านเวลาและแรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ และสามารถนำไปใช้ต่อยอดได้

4. ด้านผลกระทบ: คะแนน a มีผลกระทบเชิงบวกต่อระบบการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ โดยช่วยให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น บุคลากรได้รับการพัฒนาทักษะและสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ เทคโนโลยีที่พัฒนายังสามารถสร้างมาตรฐานใหม่ในการดำเนินงานในอุตสาหกรรม

5. ด้านความยั่งยืน: คะแนน a มีความยั่งยืนในระยะยาว มีศักยภาพในการต่อยอดและขยายผลไปยังหน่วยงานหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

สรุปภาพรวม จากผลการประเมินในทุกด้าน ได้คะแนน A ในทุกตัวชี้วัด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสบความสำเร็จ ทั้งในด้านความสอดคล้องกับนโยบาย ประสิทธิผลของเทคโนโลยีที่พัฒนา ประสิทธิภาพในการดำเนินงาน ผลกระทบที่เกิดขึ้น และความยั่งยืนในระยะยาว ผลลัพธ์จากงานสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุปผลงานวิจัย

ผลการประเมินที่ได้จากทั้งสองการประเมิน โดยรวมแล้วการประเมินอยู่ในระดับ A ในภาพรวม ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานประสบความสำเร็จ ในการพัฒนาเทคโนโลยีที่เข้ามาช่วยในกระบวนการต่างๆ ของห้องปฏิบัติการ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น พร้อมทั้งช่วยลดข้อผิดพลาด เพิ่มความสะดวกสบายในการทำงาน และสร้างมาตรฐานใหม่ที่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีผลกระทบเชิงบวกต่อการพัฒนาทักษะบุคลากร และสามารถขยายผลไปยังอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องได้ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ประจำปีงบประมาณ 2568 และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (มว.)

เอกสารอ้างอิง

[1] Brown, T., & Johnson, M. (2563). A framework for evaluating technology projects: A five-dimension approach. Technology and Management Review, 28(4), 95–110

[2] Smith, J., Doe, A., & White, K. (2564). The impact of LIMS on medical laboratory data management. Journal of Laboratory Informatics, 35(2), 120–135..

[3] Stufflebeam, D. L. (2546). The CIPP model for evaluation: An update, a review of models, and applications. Evaluation & Program Planning, 27(1), 31–42.

[4] นภัสกร โสภณธนะ. (2562). การพัฒนาระบบการจัดการห้องปฏิบัติการอัตโนมัติในมหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[5] LabWare. (n.d.). แนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการบริหารจัดการห้องปฏิบัติการอย่างมีประสิทธิภาพ. สืบค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2568, จาก https://www.labware.com/th/blog/best-practices-effective-laboratory-management.

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนากระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนในระบบ HRM ของพนักงานมหาวิทยาลัย และพนักงานราชการ กรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

Development of the Salary Disbursement Process in the HRM System for University Employee and Government Employee A Case Study of the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

ศรัญญา พิริยประเสริฐ[1*] และ มลิวรรณ ชัยฮะนิจ[2]
[1*]งานการเงิน ฝ่ายบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2]งานการเงิน ฝ่ายบริหาร คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: E-mail: sarunya.p@rmutp.ac.th*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการพัฒนาระบบเบิกจ่ายเงินเดือนภายในระบบบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM) โดยใช้ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างการใช้งานระบบแบบเดิมและระบบแบบใหม่จากกรณีศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า การใช้งานระบบแบบใหม่สามารถลดเวลาเฉลี่ยในการบันทึกข้อมูลภาษีต่อคนจาก 0.59 นาที เหลือเพียง 0.13 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 77.97 ทั้งนี้ ได้ดำเนินการประเมินผลกระทบของการใช้งานระบบแบบใหม่ผ่านแบบสอบถามความพึงพอใจของพนักงาน ซึ่งผลการประเมินพบว่าพนักงานส่วนใหญ่มีความพึงพอใจในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ย 4.66 โดยการใช้งานระบบแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นจึงถือว่ามีประสิทธิภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหน่วยงานอื่นได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การเบิกจ่ายเงินเดือน, ระบบ HRM, พนักงานมหาวิทยาลัย, พนักงานราชการ, การปรับปรุงกระบวนการ

Abstract

This research aims to study the effects of developing a payroll disbursement system within the Human Resource Management (HRM) system by using comparative data between the traditional system and the newly developed system, based on a case study of the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.

The data analysis results show that the new system significantly reduced the average time for entering tax information per person from 0.59 minutes to only 0.13 minutes, representing a 77.97 % reduction. The impact of the new system was also evaluated through an employee satisfaction survey, which revealed that the majority of employees were highly satisfied, with an average satisfaction score of 4.66 Therefore, the newly developed system is considered efficient and can be appropriately applied in other departments or organizations.

Keywords: Payroll Disbursement, HRM System, University Employees, Government Employee, Process Improvement

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ในบริบทของสถาบันอุดมศึกษาของรัฐในประเทศไทย ความมีประสิทธิภาพและความถูกต้องของกระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของบุคลากรและประสิทธิภาพโดยรวมขององค์กร พนักงานมหาวิทยาลัยและพนักงานราชการซึ่งประกอบด้วยทั้งสายวิชาการและสายสนับสนุนต่างมีบทบาทสำคัญต่อการขับเคลื่อนภารกิจของหน่วยงาน และการจ่ายค่าตอบแทนที่ถูกต้องตรงเวลาเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของการบริหารทรัพยากรมนุษย์ (Human Resource Management: HRM) ที่มีประสิทธิภาพ

แม้ว่าในปัจจุบันหลายหน่วยงานภาครัฐจะเริ่มนำระบบ HRM มาใช้ในการบริหารงานบุคลากรอย่างแพร่หลาย แต่กระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนยังคงประสบปัญหาต่าง ๆ เช่น ขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน ความไม่สอดคล้องของข้อมูล ความล่าช้าในการดำเนินการ และการขาดระบบติดตามที่ชัดเจน [1], [2] ซึ่งปัญหาเหล่านี้พบได้ชัดเจนในหน่วยงานที่มีบุคลากรจำนวนมากและมีลักษณะการดำเนินงานที่ซับซ้อน การแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องอาศัยการพัฒนากระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนอย่างเป็นระบบ โดยเน้นการเพิ่มความถูกต้อง ความรวดเร็ว

ความโปร่งใส และการตรวจสอบได้ของข้อมูล รวมถึงการประยุกต์ใช้แนวคิดการบริหารจัดการที่ดีและเทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามาสนับสนุนกระบวนการในระบบ HRM [3]

1.2 ความสำคัญของปัญหา

กระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนที่ไม่มีประสิทธิภาพอาจส่งผลกระทบโดยตรงต่อความพึงพอใจของบุคลากร ส่งผลต่อขวัญกำลังใจในการทำงาน และอาจเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินงานด้านการบริหารจัดการภายในองค์กร โดยเฉพาะในระบบราชการที่มีลักษณะขั้นตอนการดำเนินงานหลายระดับ หากไม่มีระบบที่สามารถบริหารจัดการข้อมูลได้อย่างเป็นระบบและชัดเจน อาจนำไปสู่ความผิดพลาด ความล่าช้า และภาระงานที่เพิ่มขึ้นของเจ้าหน้าที่ [1], [2]

การพัฒนากระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนจึงเป็นประเด็นสำคัญที่มีผลเชิงบวกต่อหลายด้าน ได้แก่ การเพิ่มความถูกต้อง ลดระยะเวลาและทรัพยากรในการดำเนินการ เพิ่มความโปร่งใสในการตรวจสอบและรองรับการเปลี่ยนแปลงของระบบดิจิทัลในระยะยาวของมหาวิทยาลัย [3]

นอกจากนี้ แนวทางที่พัฒนาขึ้นยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบให้กับหน่วยงานอื่นในสถาบันอุดมศึกษา ซึ่งกำลังมุ่งสู่การปรับปรุงระบบบริหารจัดการให้ทันสมัยและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์

1) วิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนในระบบ HRM ของคณะวิศวกรรมศาสตร์
2) พัฒนาระบบการเบิกจ่ายเงินเดือนที่มีประสิทธิภาพและสามารถลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น
3) ประเมินผลกระทบของการพัฒนาระบบต่อพนักงานและองค์กรในแง่ของประสิทธิภาพการทำงานและความพึงพอใจ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดเกี่ยวกับการบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM)

การบริหารทรัพยากรมนุษย์ เป็นกระบวนการบริหารที่เกี่ยวข้องกับการวางแผน การจัดการ การพัฒนา และการดูแลรักษาบุคลากรในองค์กรอย่างเป็นระบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและสร้างความผูกพันกับองค์กร [5] องค์ประกอบหลักของ HRM ได้แก่ การสรรหาและคัดเลือกบุคลากร การฝึกอบรมและพัฒนา การประเมินผลการปฏิบัติงาน และการบริหารค่าตอบแทนและสวัสดิการ ซึ่งระบบการเบิกจ่ายเงินเดือนถือเป็นหนึ่งในกลไกหลักของ HRM ที่ส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของบุคลากรและภาพลักษณ์ขององค์กร

2.2 ระบบการเบิกจ่ายเงินเดือน (Payroll Management System)

ระบบการเบิกจ่ายเงินเดือนเป็นกลไกที่เชื่อมโยงระหว่างฝ่ายบุคคลและฝ่ายการเงิน มีบทบาทในการจัดการข้อมูลเงินเดือน ค่าตอบแทน ภาษี ประกันสังคม และสิทธิประโยชน์ต่าง ๆ ให้เป็นไปอย่างถูกต้องและตรงเวลา

ตามรายงานของกรมบัญชีกลาง (2566) พบว่าหลายหน่วยงานภาครัฐยังคงประสบปัญหาการดำเนินงานด้านการเงินบุคลากร ทั้งในเรื่องความล่าช้า ความซ้ำซ้อน และข้อผิดพลาดจากการทำงานแบบเอกสาร (manual-based) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อขวัญกำลังใจของบุคลากร [2]

ในขณะที่การนำระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น ระบบ ERP หรือ HRM Software เข้ามาประยุกต์ใช้ช่วยลดปัญหาเหล่านี้ได้ โดยเฉพาะในภาคการศึกษาซึ่งมีความหลากหลายของประเภทบุคลากรและรูปแบบค่าตอบแทน [4]

2.3 การพัฒนากระบวนการ (Process Improvement)

แนวคิดในการพัฒนากระบวนการ เช่น Business Process Improvement (BPI) หรือ Lean Process เป็นกรอบแนวคิดที่ถูกนำมาใช้ในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเน้นการลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็น ลดความซ้ำซ้อน เพิ่มความชัดเจนของข้อมูล และลดต้นทุนเชิงเวลาและทรัพยากร

หลักการ BPI และ Lean ถูกนำมาใช้ในระบบราชการไทยเพื่อส่งเสริม Good Governance และเพิ่มประสิทธิภาพงานบริการประชาชน รวมถึงด้านการบริหารบุคลากรด้วย [3]

3. ขั้นตอนการเบิกจ่ายเงินเดือน (แบบเดิม)

ในการดำเนินการเบิกจ่ายเงินเดือนของพนักงานมหาวิทยาลัยและพนักงานราชการ โดยใช้กระบวนการเบิกจ่ายตามแบบเดิมนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังต่อไปนี้

3.1 เข้าสู่ระบบ HRM

เจ้าหน้าที่การเงินเข้าสู่ระบบบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM) เพื่อดำเนินการจัดการข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเบิกจ่ายเงินเดือน ประมวลผลข้อมูลเงินเดือนของเดือนปัจจุบันที่ต้องการเบิกจ่าย ในระบบ HRM ตามข้อมูลของบุคลากร และจัดพิมพ์หลักฐานการจ่ายเงินเพื่อใช้ในการตรวจสอบ

3.2 ตรวจสอบข้อมูลในหลักฐานการจ่ายเงิน

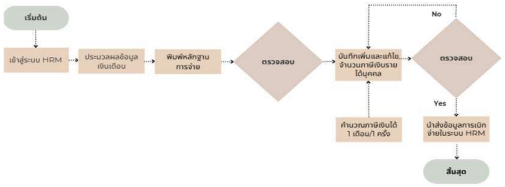
เจ้าหน้าที่การเงินทำการตรวจสอบรายละเอียดในหลักฐานการจ่ายเงิน เช่น เงินเดือนและค่าจ้างอื่น ภาษีเงินได้หัก ณ ที่จ่าย และรายการหักอื่น ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลถูกต้อง

3.3 การคิดคำนวณภาษีเงินได้รายเดือน และบันทึกแก้ไข

เจ้าหน้าที่การเงินดำเนินการคิดคำนวณภาษีเงินได้หัก ณ ที่จ่ายของพนักงานมหาวิทยาลัยและพนักงานราชการ เป็นรายเดือน เดือนละครั้ง จากยอดรายรับของเดือนนั้น ๆ โดยแยกต่างหากจากระบบ HRM ดำเนินการบันทึกแก้ไขข้อมูลภาษีเงินได้หัก ณ ที่จ่าย

3.4 นำส่งข้อมูลการเบิกจ่ายในระบบ HRM

เมื่อข้อมูลได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว จึงทำการนำส่งข้อมูลการเบิกจ่ายเงินเดือนผ่านระบบ HRM เพื่อดำเนินการจ่ายเงินให้แก่บุคลากรต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเบิกจ่ายเงินเดือน (แบบเดิม)

4. ขั้นตอนการเบิกจ่ายเงินเดือน (แบบใหม่)

จากการพัฒนากระบวนการเบิกจ่ายเงินเดือนในระบบบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM) ได้มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนระบบการทำงานรูปแบบใหม่ให้มีความกระชับ ลดการทำงานซ้ำซ้อน และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 คำนวณภาษีเงินได้ (เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับ 6 เดือน)

เจ้าหน้าที่การเงินทำการคำนวณภาษีเงินได้ของบุคลากรแบบราย 6 เดือนต่อการเปลี่ยนแปลงรายรับรวม 1 ครั้ง (ข้อมูลจากคำสั่งเลื่อนเงินเดือน รอบ 6 เดือน) แทนการคำนวณแบบรายเดือนในการเบิกจ่ายรูปแบบเดิม โดยแยกต่างหากจากระบบ HRM เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการหักภาษี ณ ที่จ่ายสำหรับการเบิกจ่ายเงินเดือนในแต่ละเดือน

4.2 เข้าสู่ระบบ HRM และบันทึกข้อมูลภาษีเงินได้เข้าระบบ HRM เป็นฐานข้อมูล (สำหรับ 6 เดือน)

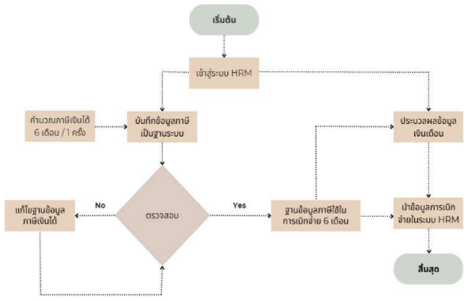
เจ้าหน้าที่การเงินจะบันทึกข้อมูลภาษีเงินได้ที่คำนวณไว้แบบราย 6 เดือน ในระบบ HRM เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลภาษีในการประมวลผลสำหรับการเบิกจ่ายเงินเดือนในแต่ละเดือนอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยไม่ต้องทำการคำนวณและบันทึกแก้ไขข้อมูลภาษีใหม่ทุกเดือน

4.3 ประมวลผลข้อมูลเงินเดือนในระบบ HRM และจัดพิมพ์หลักฐานการจ่ายเงิน

ประมวลผลข้อมูลเงินเดือนในระบบ HRM ของบุคลากร โดยใช้ฐานข้อมูลภาษีที่กำหนดใหม่ พร้อมทั้งจัดพิมพ์เอกสารหลักฐานการจ่ายเงินสำหรับใช้ในการตรวจสอบและอ้างอิงการเบิกจ่ายเงินเดือนของเดือนปัจจุบันที่ต้องการเบิกจ่าย

4.4 นำส่งข้อมูลการเบิกจ่ายเงินเดือนผ่านระบบ HRM

เมื่อข้อมูลได้รับการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการส่งข้อมูลการเบิกจ่ายเงินเดือนในระบบ HRM และเข้าสู่กระบวนการจ่ายเงินให้แก่บุคลากรตามกำหนด ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการเบิกจ่ายเงินเดือน (แก้ไขแบบใหม่ เดือน ก.พ. 2568)

5. การเก็บข้อมูลจากระบบ HRM

5.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล (แบบใหม่)

ภายหลังจากการเก็บรวบรวมข้อมูล (แบบใหม่) การคีย์ข้อมูลภาษีเงินได้ของบุคลากรเข้าสู่ระบบบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM) โดยมีการเปลี่ยนแปลงขั้นตอนให้ลดการบันทึกข้อมูลซ้ำ และใช้การคำนวณภาษีแบบช่วงเวลา (6 เดือน/ครั้ง) ทำให้ระบบสามารถเรียกใช้ข้อมูลได้โดยอัตโนมัติ ส่งผลให้เจ้าหน้าที่ไม่จำเป็นต้องคีย์ข้อมูลใหม่ทุกเดือน ซึ่งช่วยลดภาระเวลาในการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน

5.2 สูตรและสมการทางคณิตศาสตร์

การเก็บรวบรวมข้อมูล (แบบใหม่) และการเก็บรวบรวมข้อมูล (แบบใหม่) เพื่อการคำนวณเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ระบบ HRM ค่าเฉลี่ยเวลาในการคีย์ข้อมูลภาษีต่อคน

ค่าเฉลี่ยเวลาเฉพาะช่วง (Average Time per Period)

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n} \tag{1}$$

เมื่อ $\bar{T}$ = ค่าเฉลี่ยเวลาในการคีย์ข้อมูลภาษีต่อคนในช่วงเวลานั้น (หน่วย: นาที)

T_i = เวลาในการคีย์ข้อมูลของบุคคลที่ i

n = จำนวนพนักงานทั้งหมดในช่วงเวลานั้น

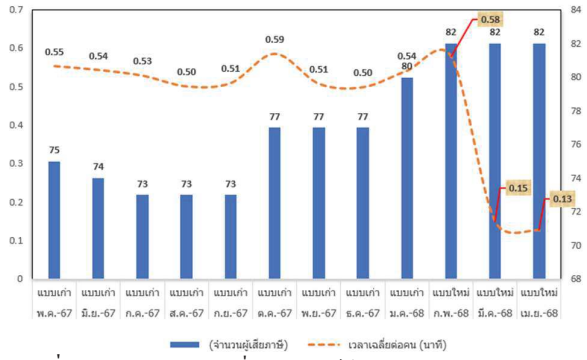
ร้อยละการลดลงของเวลาเฉลี่ย (Percentage Reduction)

$$\text{Percentage Reduction} = \left(\frac{\bar{T}_{\text{เดิม}} - \bar{T}_{\text{ใหม่}}}{\bar{T}_{\text{เดิม}}} \right) \times 100 \tag{2}$$

เมื่อ $\bar{T}_{\text{เดิม}}$ = ค่าเฉลี่ยเวลาในการคีย์ข้อมูลของระบบเดิม (นาที)

$\bar{T}_{\text{ใหม่}}$ = ค่าเฉลี่ยเวลาในการคีย์ข้อมูลของระบบใหม่ (นาที)

5.3 แผนภาพแนวโน้มเวลาเฉลี่ยในการบันทึกข้อมูลภาษี/คน/เดือน (พฤษภาคม 2567 – เมษายน 2568)



ภาพที่ 3 แสดงแสดงเวลาเฉลี่ยในการคีย์ข้อมูลภาษีต่อคน เปรียบเทียบระหว่างระบบแบบเดิมและระบบแบบใหม่

จากแผนภาพแนวโน้มเวลาเฉลี่ยในการบันทึกข้อมูลภาษี/คน/เดือน (พฤษภาคม 2567 – มีนาคม 2568) ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าในช่วงการเก็บรวบรวมข้อมูลการเบิกจ่ายเงินเดือน (แบบใหม่) (พฤษภาคม 2567 – มกราคม 2568) ค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 0.50 – 0.59 นาที/คน และหลังการเก็บรวบรวมข้อมูลการเบิกจ่ายเงินเดือน (แบบใหม่) (กุมภาพันธ์ 2568 – เมษายน 2568) ค่าเฉลี่ยลดลงอย่างต่อเนื่องเหลือเพียง 0.13 นาที/คน ในเดือนเมษายน 2568

6. สรุป

ช่วงระบบแบบใหม่ (พ.ค. 67 – ม.ค. 68) ค่าเฉลี่ยเวลาในการบันทึกข้อมูลภาษีอยู่ในช่วง 0.50 – 0.59 นาที/คน ช่วงระบบแบบใหม่ (กุมภาพันธ์ 2568 – เมษายน 2568) เริ่มต้นเดือนแรกยังสูงอยู่ที่ 0.58 นาที/คน (เนื่องจากการบันทึกฐานข้อมูลภาษีในครั้งแรก) แต่หลังจากนั้นลดลงเหลือเพียง 0.15 และ 0.13 นาที/คน ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังการปรับเปลี่ยนเป็นการพัฒนาระบบแบบใหม่ แม้ช่วงเริ่มต้นยังมีเวลาเฉลี่ยใกล้เคียงกับระบบเดิม แต่ภายในระยะเวลาเพียง 1 เดือน ระบบสามารถลดระยะเวลาในการบันทึกข้อมูลภาษีต่อคนได้กว่า 77.59 % เมื่อเปรียบเทียบค่าจาก 0.58 นาที เหลือเพียง 0.13 นาทีต่อคน

7. แบบสอบถามความพึงพอใจของพนักงานต่อระบบเบิกจ่ายเงินเดือนแบบใหม่

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบแบบสอบถามความพึงพอใจของพนักงานต่อระบบเบิกจ่ายเงินเดือนแบบใหม่ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินผลกระทบของการทำงานระบบที่พัฒนาขึ้น โดยมุ่งเน้นการประเมินในเชิงปริมาณผ่านความคิดเห็นของผู้ใช้งานจริงภายในหน่วยงาน แบบสอบถามฉบับนี้ประกอบด้วย 3 ด้านหลักโดยใช้มาตรวัดแบบ Likert 5 ระดับ [6] ได้แก่ด้านความสะดวกในการใช้งานระบบ อยู่ในระดับดีมีค่าเฉลี่ย 4.31 ด้านความแม่นยำอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ย 4.48 และด้านประสิทธิภาพของระบบอยู่ในระดับดีมากมีค่าเฉลี่ย 4.66 ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ความพึงพอใจในเชิงปริมาณและสามารถนำไปวิเคราะห์ทางสถิติเชิงพรรณนา

ผลการประเมินความพึงพอใจของพนักงานที่มีต่อระบบเบิกจ่ายเงินเดือนแบบใหม่ พบว่าอยู่ในระดับดีมาก ในทุกด้านโดยเฉพาะในด้านความสะดวก ความรวดเร็ว และความถูกต้องของระบบ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับการพัฒนา

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างยิ่งต่อ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยภายใต้ โครงการวิจัย - งบประมาณกองทุนเพื่อการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568

9. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานคณะกรรมการข้าราชการพลเรือน (ก.พ.), “แนวทางการปฏิรูปการบริหารทรัพยากรบุคคลสำหรับหน่วยงานภาครัฐไทย,” กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, 2565.

[2] กรมบัญชีกลาง, “กรอบแนวทางการบริหารและเบิกจ่ายเงินเดือน,” กระทรวงการคลัง, 2566.

[3] ส. วงษ์ไชย และ ธ. เลิศศักดิ์ชัย, “การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัลในการบริหารเงินเดือนของมหาวิทยาลัยในประเทศไทย,” วารสารนวัตกรรมภาครัฐ, ปีที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 45–52, 2565.

[4] สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา, “รายงานสถานการณ์การบริหารบุคลากรในสถาบันอุดมศึกษาไทย,” สกอ., 2565.

[5] M. Armstrong, *Armstrong's Handbook of Human Resource Management Practice*, 15th ed. London: Kogan Page, 2020.

[6] R. Chomeya, "Quality of psychology test between Likert scale 5 and 6 points," *Journal of Social Sciences*, vol. 6, no. 3, pp. 399–403, 2010.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นางศรัญญา พิริยประเสริฐ
นักวิชาการเงินและบัญชีปฏิบัติการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



นางสาวมลิวรรณ ชัยสะนิจ
นักวิชาการเงินและบัญชีชำนาญการ
คณะบริหารธุรกิจ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ในพื้นที่โรงเรียนสังกัดของกรุงเทพมหานคร ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

A Study of Factors Affecting Solar Panel Installation Decisions in Schools Under the Bangkok Metropolitan Administration Using the Analytic Hierarchy Process (AHP)

พีรวิชญ์ วัฒนะ[1*] และ พิชญ รัชฎาวงศ์[1* 2 3]

[1*]หลักสูตรเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2]สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[3]ภาควิชาสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาคารเฉลิมราชกุมารี 60 พรรษา (จามจุรี 10) ชั้น 14 ซอยจุฬาลงกรณ์ 12 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330.

E-mail: 6680067720@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานคร โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย การศึกษาได้แบ่งกลุ่มผู้เชี่ยวชาญออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในส่วนงานราชการ และผู้เชี่ยวชาญด้านแผงพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสบการณ์ในการดำเนินโครงการติดตั้งแผงฯ ไม่น้อยกว่า 5 ปี โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก (Major Criteria) ซึ่งแต่ละปัจจัยหลักจะประกอบด้วยปัจจัยย่อย (Minor Criteria) ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานคร ได้แก่ ปัจจัยด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง (0.54) รองลงมาคือปัจจัยด้านกายภาพของพื้นที่ (0.27) และปัจจัยด้านเทคนิค (0.19)

คำสำคัญ: แผงพลังงานแสงอาทิตย์, กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น, กระบวนการตัดสินใจ

Abstract

This research, entitled "A Study of Factors Affecting Solar Panel Installation Decisions in Schools Under the Bangkok Metropolitan Administration Using the Analytic Hierarchy Process (AHP)," aims to analyze the determinants influencing the decision-making process for solar panel installation in schools within the Bangkok Metropolitan Administration. Employing the Analytic Hierarchy Process (AHP), the study seeks to prioritize and rank the significance of these factors. Expert participants were divided into two distinct groups: those involved in governmental sectors and professionals with a minimum of five years of experience in solar panel installation projects. The factors under investigation were structured into three major criteria, each encompassing several minor criteria. Utilizing pairwise comparisons, experts assessed the relative importance of each factor, subsequently analyzed through the AHP framework.

The findings reveal that the primary determinants affecting solar panel installation decisions in schools under the Bangkok Metropolitan Administration are: policy and regulatory factors (with a weight of 0.54), followed by physical site characteristics (0.27), and technical considerations (0.19).

Keywords: Solar panels, Analytic Hierarchy Process (AHP), Decision-making process

1. บทนำ

กรุงเทพมหานครมีโรงเรียนในสังกัดกว่า 437 แห่ง ซึ่งในปี พ.ศ. 2566 มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 3.5 ล้านบาทต่อเดือน เพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายดังกล่าว การนำเทคโนโลยีแผงพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในโรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานครจึงสำคัญอย่างยิ่ง โดยข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ [4] ระบุว่า ระบบพลังงานแสงอาทิตย์สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 20-50% ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ อาทิ ขนาดและประสิทธิภาพของแผง, ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ในพื้นที่, และรูปแบบการใช้ไฟฟ้า โดยการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 10 กิโลวัตต์ (kW) ในพื้นที่ที่มีศักยภาพแสงอาทิตย์สูง สามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 1,300 หน่วยต่อเดือน ซึ่งคิดเป็นมูลค่าการประหยัดไฟฟ้าได้ประมาณ 5,000-7,000 บาทต่อเดือน อย่างไรก็ตาม การติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ของหน่วยงานราชการ ยังคงมีความท้าทายหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านกฎระเบียบ ข้อบังคับ และการมีส่วนร่วมของผู้มีอำนาจตัดสินใจในระบบราชการ ด้วยเหตุนี้ การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานครโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เข้าใจถึงระดับความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง นำไปสู่การผลักดันการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในโรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานครได้อย่างเป็นรูปธรรม

2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (MCDM) ที่พัฒนาโดย Thomas L. Saaty [1] มีหลักการคือการแบ่งปัญหาที่ซับซ้อนออกเป็นลำดับชั้นของเป้าหมาย เกณฑ์ และทางเลือก เพื่อให้สามารถประเมินและเปรียบเทียบปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างเป็นระบบ ขั้นตอนหลักของ AHP ประกอบด้วยการสร้างโครงสร้างลำดับชั้น การเปรียบเทียบปัจจัยเชิงคู่ (pairwise comparison) เพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญ การคำนวณค่าน้ำหนักรวม และการตรวจสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจ (consistency ratio) กระบวนการเหล่านี้จะช่วยให้ผู้มีอำนาจตัดสินใจสามารถพิจารณาปัจจัยเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้อย่างครอบคลุม และลดความซับซ้อนในการตัดสินใจเมื่อมีเกณฑ์ที่หลากหลายและขัดแย้งกัน

2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจัย	นิยาม / รายละเอียด
ปัจจัยหลักที่ 1 ด้านเทคนิค (A)	ปัจจัยด้านเทคนิค หมายถึง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับองค์ความรู้ที่สำคัญต่อการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งในเรื่องประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ คุณภาพและประสิทธิภาพการติดตั้งและบำรุงรักษาแผงพลังงานแสงอาทิตย์
ประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (a1)	แผงซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon Solar Cells) ผลิตจากซิลิคอนคุณภาพสูง เหมาะสำหรับพื้นที่ติดตั้งที่มีจำกัด และต้องการประสิทธิภาพสูงสุด แผงซิลิคอนแบบผลึกหลายผลึก (Polycrystalline Silicon Solar Cells) ผลิตจากซิลิคอนหลายผลึก มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยวเล็กน้อย แผงฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cells) ผลิตจากวัสดุ เช่น a-Si, CdTe, CIGS เป็นต้น มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น สามารถติดตั้งบนพื้นผิวโค้งงอได้
ความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ (a2)	จากการศึกษาของจุฑาพัฒน์ ธิโสภา [2] พบว่า ปัจจัยที่สำคัญในการตัดสินใจเลือกติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์สำหรับบ้านอยู่อาศัยคือความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ และจากการศึกษาของชัยรัฐ ภัทรเวท และสุภฤกษ์ สุขสมาน [3] พบว่า ความน่าเชื่อถือ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการติดตั้ง Solar Rooftop ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม
คุณภาพและประสิทธิภาพ (a3)	คุณภาพ หมายถึง ความคงทน ความแข็งแรง อายุการใช้งานของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงมาตรฐานและการรับรอง ประสิทธิภาพ หมายถึง ความสามารถของแผงในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
การติดตั้งและบำรุงรักษา (a4)	การติดตั้งและบำรุงรักษาแผงพลังงานแสงอาทิตย์ หมายถึง กระบวนการวางตำแหน่งแผง เชื่อมต่อระบบ และดูแลรักษาแผง เพื่อให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ
ปัจจัยหลักที่ 2 ด้านกายภาพของพื้นที่ (B)	ปัจจัยด้านกายภาพของพื้นที่ หมายถึง ลักษณะและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น แสงแดด มุมตกกระทบ อุณหภูมิ พื้นที่ติดตั้ง และสิ่งบดบัง เป็นต้น
ศักยภาพของพื้นที่ (b1)	ศักยภาพของพื้นที่ หมายถึง ความเหมาะสมของพื้นที่ในการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากปริมาณและคุณภาพของแสงแดด ปราศจากสิ่งกีดขวาง และการเข้าถึงพื้นที่ติดตั้ง ควรเข้าถึงได้ง่าย
พื้นที่ติดตั้ง (b2)	พื้นที่ติดตั้ง หมายถึง พื้นที่ที่มีความแข็งแรง มั่นคง และสามารถรับน้ำหนักของแผงได้ พร้อมรองรับการติดตั้งในทิศทางและมุมเอียงที่เหมาะสม เพื่อให้แผงได้รับแสงอาทิตย์อย่างเต็มที่
สภาพแวดล้อม (b3)	สภาพแวดล้อม หมายถึง ภาวะแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ติดตั้ง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแผง เช่น ฝุ่นละอองและมลภาวะ (ฝุ่น PM2.5) และสัตว์ (นก หนู และแมลง) เป็นต้น
ปัจจัยหลักที่ 3 ด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง (C)	ปัจจัยด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง หมายถึง กฎระเบียบ ข้อบังคับ หรือมาตรการใด ๆ ก็ตาม ที่มีผลต่อการดำเนินงาน ส่งผลให้เกิดต้นทุน และต้องนำมาพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน
ต้นทุน (c1)	ต้นทุน หมายถึง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งและใช้งานแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น ค่าแผง ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้ง ค่าบำรุงรักษา
ความคุ้มค่าของการลงทุน (c2)	ความคุ้มค่าของการลงทุน หมายถึง การประเมินผลตอบแทนทางการเงินจากการลงทุนติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุน มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)
กฎระเบียบและข้อบังคับต่าง ๆ (c3)	ปัจจัยด้านกฎระเบียบและข้อบังคับต่าง ๆ หมายถึง กฎหมาย ข้อบังคับ หรือมาตรฐานใด ๆ ก็ตาม ที่กำหนดโดยหน่วยงานภาครัฐ หรือองค์กรที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีผลต่อการติดตั้งผงพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ศึกษา

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการศึกษานี้ เริ่มจากการกำหนดพื้นที่ศึกษาและกลุ่มเป้าหมาย จากนั้นจึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ นำไปสู่การกำหนดปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย เพื่อสร้างแบบสอบถามตารางการเปรียบเทียบปัจจัยเชิงคู่ สำหรับการคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญในการวิจัยนี้จะใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยกำหนดกลุ่มเป้าหมายเป็นผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มผู้บริหารและบุคลากรจากหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการบริหารจัดการโรงเรียนในสังกัดกรุงเทพมหานคร จำนวน 5 ท่าน และกลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากภาคเอกชนที่มีประสบการณ์ในการดำเนินโครงการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์มาแล้วไม่น้อยกว่า 5 ปี จำนวน 5 ท่าน ดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกและความคิดเห็นจากผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจและผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญตรงตามวัตถุประสงค์ของการศึกษามากที่สุด

เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จสิ้น ในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการคำนวณค่า Eigen vector ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย แล้วจึงตรวจสอบความสอดคล้องของการเปรียบเทียบเชิงคู่ด้วยการคำนวณค่า Consistency Ratio (CR) ดังสมการที่ 1

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

เมื่อ RI คือ Random Consistency Index เป็นค่าคงที่ พิจารณาตามจำนวน (N) ของปัจจัย ดังนี้

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

CI คือ Consistency Index สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$CI = (\lambda_{max} - N) / (N - 1) \quad (2)$$

เมื่อ λ_{max} คือ Eigenvalue สามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$\lambda_{max} = \text{Eigen vector} / CV \quad (3)$$

เมื่อ CV คือ Consistency Ratio เกิดจากการคูณเมทริกซ์ระหว่างเมทริกซ์ของ Eigen vector กับเมทริกซ์การเปรียบเทียบเชิงคู่

หากค่า CR มีค่าน้อยกว่า 0.1 แสดงว่าผลการวิเคราะห์มีความสอดคล้อง สามารถดำเนินการสรุปผลการศึกษาได้ แต่หากค่า CR มีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 0.1 จะต้องดำเนินการทบทวนการวิเคราะห์ AHP อีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 1 ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน

ตำแหน่ง	จำนวน (ท่าน)
ผู้นำนวยการสำนักการศึกษา กรุงเทพมหานคร	1
ผู้อำนวยการสถานศึกษา	2
รองผู้อำนวยการสถานศึกษา	1
วิศวกรโยธาชำนาญพิเศษ สำนักการศึกษา กรุงเทพมหานคร	1
ผู้เชี่ยวชาญด้านแผงพลังงานแสงอาทิตย์	5
รวม	10

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยหลัก (Major Criteria)

ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักด้วยกระบวนการ AHP พบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เรียงตามลำดับความสำคัญคือ ปัจจัยด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง (C) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.54 ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีน้ำหนักสูงสุด รองลงมาคือ ปัจจัยด้านกายภาพของพื้นที่ (B) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.27 และ ปัจจัยด้านเทคนิค (A) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.19 โดยที่ค่า CR ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (CR < 0.1) แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องในการประเมินของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลักด้วยกระบวนการ AHP

ปัจจัยหลัก	(A)	(B)	(C)	CR
ท่านที่ 1	0.14	0.43	0.43	0.00
ท่านที่ 2	0.43	0.43	0.14	0.00
ท่านที่ 3	0.14	0.71	0.14	0.00
ท่านที่ 4	0.14	0.08	0.78	0.01
ท่านที่ 5	0.08	0.33	0.59	0.01
ท่านที่ 6	0.11	0.11	0.78	0.00
ท่านที่ 7	0.09	0.22	0.69	0.05
ท่านที่ 8	0.57	0.14	0.29	0.00
ท่านที่ 9	0.10	0.09	0.81	0.00
ท่านที่ 10	0.07	0.15	0.78	0.07
ค่าเฉลี่ย	0.19	0.27	0.54	

4.2 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยย่อย (Minor Criteria)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยย่อยด้วยกระบวนการ AHP

ปัจจัยหลัก	a1	a2	a3	a4	CR	b1	b2	b3	CR	c1	c2	c3	CR
ท่านที่ 1	0.10	0.12	0.32	0.46	0.03	0.23	0.69	0.08	0.00	0.41	0.48	0.11	0.03
ท่านที่ 2	0.11	0.20	0.35	0.34	0.07	0.22	0.67	0.11	0.00	0.43	0.47	0.10	0.00
ท่านที่ 3	0.07	0.14	0.28	0.51	0.00	0.13	0.75	0.13	0.00	0.70	0.19	0.11	0.01
ท่านที่ 4	0.25	0.08	0.60	0.07	0.08	0.70	0.24	0.06	0.06	0.06	0.24	0.70	0.06
ท่านที่ 5	0.14	0.21	0.60	0.05	0.06	0.67	0.22	0.11	0.00	0.20	0.07	0.73	0.01
ท่านที่ 6	0.12	0.11	0.55	0.21	0.01	0.33	0.41	0.26	0.05	0.07	0.51	0.42	0.03
ท่านที่ 7	0.24	0.08	0.63	0.05	0.07	0.63	0.08	0.29	0.08	0.13	0.09	0.78	0.09
ท่านที่ 8	0.47	0.10	0.25	0.18	0.08	0.33	0.33	0.33	0.00	0.20	0.60	0.20	0.00
ท่านที่ 9	0.05	0.08	0.62	0.26	0.09	0.80	0.12	0.08	0.06	0.07	0.18	0.75	0.03
ท่านที่ 10	0.05	0.17	0.60	0.18	0.08	0.78	0.15	0.07	0.07	0.12	0.08	0.80	0.06
ค่าเฉลี่ย	**0.16**	**0.13**	**0.48**	**0.23**		**0.48**	**0.37**	**0.15**		**0.24**	**0.29**	**0.47**	

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาในรายละเอียดของปัจจัยย่อย พบว่า ในกลุ่มปัจจัยด้านเทคนิค คุณภาพและประสิทธิภาพ ของแผงพลังงานแสงอาทิตย์มีอิทธิพลมากที่สุด (0.48) รองลงมาคือการติดตั้งและบำรุงรักษา (0.23) และประเภทของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (0.16) ในขณะที่ ความน่าเชื่อถือของผู้ให้บริการ มีความสำคัญน้อยที่สุด (0.13) สำหรับปัจจัยด้านกายภาพของพื้นที่ ปริมาณและคุณภาพของแสงแดด มีความสำคัญสูงสุด (0.48) ตามมาด้วย พื้นที่ติดตั้ง (0.37) และสภาพแวดล้อม (0.15) ในส่วนของปัจจัยด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง กฎระเบียบและข้อบังคับต่าง ๆ มีความสำคัญสูงสุด (0.47) ตามมาด้วย ความคุ้มค่าของการลงทุน (0.29) และ ต้นทุน (0.24)

5. สรุปผลการศึกษา

โดยสรุป ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่โรงเรียนสังกัดกรุงเทพมหานคร ได้แก่ ปัจจัยด้านมาตรการที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะกฎระเบียบและข้อบังคับ มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการกำหนดทิศทางการตัดสินใจ รองลงมาคือปัจจัยด้านเทคนิค โดยเฉพาะคุณภาพและประสิทธิภาพของแผงฯ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความต้องการของผู้ที่เชี่ยวชาญที่อยากให้โรงเรียนได้รับเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและเป็นไปตามมาตรฐาน ในขณะที่ปัจจัยด้านกายภาพของพื้นที่ โดยเฉพาะปริมาณและคุณภาพของแสงแดด ก็เป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบสำคัญที่ผู้เชี่ยวชาญให้ความสนใจในการพิจารณาความเหมาะสมของพื้นที่ติดตั้ง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill, 1980.

[2] จ. ธิโสภา และ ศ. เอี่ยมรัตนกูล, "ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยแสงอาทิตย์สำหรับบ้านอยู่อาศัยโดยวิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น," *วารสารวิชาการ Veridian E-Journal*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 1426-1441, 2562.

[3] ช. ภัทรเวท และ ศ. สุขสมาน, "ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการติดตั้งโซลาร์รูฟท็อป ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม," *วารสารวิชาการ Veridian E-Journal*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 136-151, 2563.

[4] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, "ผลการศึกษาการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ในประเทศไทย," ปทุมธานี: สวทช., 2566.



ร.อ.พีรวิชญ์ วัฒนะ
ปริญญาตรี สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์
ปริญญาโท เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน



รศ. ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์
Ph.D. (Civil and Environmental Engineering)
University of Wisconsin-Milwaukee

หัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม

สำหรับนักวิจัยรุ่นเยาว์ ระดับมัธยม

ปวช. และ ปวส.

(SS3)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

การพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอน: ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

The development of instructional media innovation: an Experimental Practice Set Digital Circuit for Higher Vocational Certificate Program

จีรภา เพลาวัน[1*] อุรา คล่องแคล่ว[1] กฤษฎา บุญมีวิเศษ[1] ชาตินนท์ ทองกัลยา[1] พงศธร พรมชมชา[1] อธิวัตร อุปสุข[1] สมเกียรติ์ มะลิพันธ์[1] นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ[1] และ วิชัย ครองกิจศิริ[1]
[1*]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
E-mail: jeerapha.ph@rmuti.ac.th[*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอนชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง เพื่อหาคุณภาพและหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล ซึ่งการออกแบบและสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล รองรับใบงานการทดลองจำนวน 17 ใบงาน โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน ทำแบบประเมินคุณภาพของชุดฝึกปฏิบัติวงจรดิจิทัล และหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองจากผู้เรียนจำนวน 17 คน ตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80 ผลการวิจัยพบว่าการประเมินคุณภาพชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($\overline{X}$) มีค่าเท่ากับ 4.75 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D) มีค่าเท่ากับ 0.27 และประสิทธิภาพชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82.11/82.06 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล มีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ชุดฝึกปฏิบัติ, สื่อการสอน, วงจรดิจิทัล, การหาประสิทธิภาพ, การประเมินคุณภาพ

Abstract

The purpose of this research was to develop an innovative instructional media in the form of a digital circuit experimental practice set for higher vocational certificate program. To fine the quality assessment and the efficiency evaluation of the experimental practice set for digital circuit. The design and construction of practice set with support 17 experimental worksheets. By 3 specialists, the qualitative evaluation of the digital circuit experimental practice set, while its efficiency was tested by 17 students based on the 80/80 standard criteria. The result found that the arithmetic mean ($\overline{X}$) was 4.75, the standard deviation (S.D.) was 0.27. The efficiency when experimented with was 82.11/82.06, which exceeded the standard criteria. The quantitative analysis of digital circuit practical training of very high quality and can be effectively utilized in teaching and learning.

Keywords: Practical kit, Instructional Media, Digital Circuit, Efficiency Evaluation, Quality assessment

1. บทนำ

ชุดฝึกปฏิบัติการเป็นสื่อการเรียนรู้ที่สำคัญในกระบวนการจัดการเรียนการสอน โดยเฉพาะในรายวิชาที่เน้นทักษะทางด้านปฏิบัติ เนื่องจากช่วยให้ผู้เรียนสามารถลงมือทำจริง เข้าใจเนื้อหาได้ลึกซึ้ง และนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวทางการเรียนรู้ในศตวรรษที่ 21 [4] ที่เน้นการสร้างทักษะทั้งด้านทฤษฎีและปฏิบัติ โดยเฉพาะในระดับอาชีวศึกษา ซึ่งผู้เรียนจำเป็นต้องมีความพร้อมในการประยุกต์ใช้ความรู้เข้าสู่ภาคอุตสาหกรรม

ที่ผ่านมามีการพัฒนาชุดฝึกปฏิบัติการในหลากหลายวิชา อาทิ [1] รายวิชาไมโครคอนโทรลเลอร์และอินเตอร์เฟส “การพัฒนาชุดทดลองและการหาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมหุ่นยนต์”, [2] “การพัฒนาชุดทดลองวงจรเรียงกระแสอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นของนักเรียน หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพ” ในรายวิชาวงจรอิเล็กทรอนิกส์, การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรดิจิตอลประยุกต์ กรณีศึกษาสาขาวิชาไฟฟ้ากำลังวิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน” [3] และ[5] วิชาการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ “การพัฒนาชุดปฏิบัติการออปแอมป์สำหรับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี ซึ่งสามารถยกระดับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม สำหรับวิชาดิจิทัลเทคนิค ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการออกแบบระบบควบคุมและอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ ชุดทดลองที่มีอยู่เดิม เช่น รุ่น NX-100 Plus ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ความซับซ้อนในการใช้งาน จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม และไม่มีการบูรณาการ Datasheet ของ IC Logic ไว้ภายในชุดฝึก ส่งผลให้ผู้เรียนต้องใช้เวลาค้นหาข้อมูลและอาจเกิดความสับสนในการทดลอง

ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลที่สามารถแสดงโครงสร้างภายในของ IC Logic ได้อย่างชัดเจน โดยออกแบบและจัดวางอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบกระเป๋าพกพา ช่วยให้สามารถทดลองวงจรดิจิทัลได้สะดวกและเข้าใจง่ายมากยิ่งขึ้น ทั้งยังสามารถใช้ประกอบใบงานการทดลองได้ครบถ้วนตามหลักสูตร และการส่งเสริมทักษะเชิงปฏิบัติของผู้เรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

2.1 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1.1 การสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล มีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดเป้าหมายในการนำชุดฝึกปฏิบัติไปใช้โดยศึกษาคำอธิบายรายวิชาต่าง ๆ และกำหนดจุดประสงค์เชิงพฤติกรรมและทักษะของผู้เรียนในรายวิชาดิจิทัลเทคนิค

2) กำหนดขั้นตอนกิจกรรมการเรียนการสอน เพื่อที่จะนำชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลไปใช้ในการเรียนการสอนให้เหมาะสม

3) ดำเนินการหาข้อมูลจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล ในรายวิชาดิจิทัลเทคนิค

4) ออกแบบชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล จากใบงานการทดลองที่มีในรายวิชาดิจิทัลเทคนิค จำนวน 17 ใบงาน

5) ดำเนินการสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล และทดสอบการทำงานของชุดฝึกปฏิบัติ

6) ผู้วิจัยนำชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลไปประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ

7) ปรับปรุงแก้ไขข้อมูลและข้อบกพร่องตามข้อเสนอแนะและนำชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลไปทดลองใช้กับผู้เรียน

8) ผู้วิจัยนำชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลดำเนินการหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติ โดยเก็บข้อมูลการวิจัยใช้การวิเคราะห์ข้อมูลจากสูตร E1/E2 [6] ให้ผู้เรียนทำการปฏิบัติงานตามใบงานทดลองระหว่างเรียน (E1) ครั้งละ 1 ใบงานจนครบทั้งหมด 17 ใบงาน

9) ให้ผู้เรียนทดสอบทำการปฏิบัติใบงานการทดลองหลังเรียน (E2) ที่ใช้ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล ให้ทำงานได้ตามที่ต้องการแล้วเก็บผลการทดสอบ

10) นำผลคะแนนที่ได้จากการปฏิบัติตามใบงานทดลองมาวิเคราะห์ผลตามหลักการทางสถิติ ตามเกณฑ์มาตรฐาน 80/80

2.2 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.6.1 สถิติที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

$$\overline{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (1)$$

เมื่อ

$\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

X คือ ค่าคะแนนของแต่ละคน

$\sum X$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

2.6.2 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

สถิติที่ใช้ในการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

$$S.D = \sqrt{\frac{\sum\left(X - \overline{X}\right)^2}{n-1}} \quad (2)$$

เมื่อ

$S.D$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n คือ จำนวนข้อมูล

X คือ ค่าคะแนนของแต่ละคน

$\overline{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

$\sum$ คือ ผลรวมของคะแนน

2.6.3 การหาค่าประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติ (E1/E2)

การหาค่า E1 และ E2 มีวิธีการคำนวณหาค่าร้อยละ โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$E1 = \frac{\frac{\sum X}{N} \times 100}{A} \quad (3)$$

$$E2 = \frac{\frac{\sum X}{N} \times 100}{B} \quad (4)$$

เมื่อ

$E1$ คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการทดสอบระหว่างเรียน

$E2$ คือ ประสิทธิภาพของกระบวนการทดสอบหลังเรียน

$\sum X$ คือ คะแนนของแบบทดสอบ

A คือ คะแนนเต็มของแบบฝึกหัดทุกใบงานรวมกัน

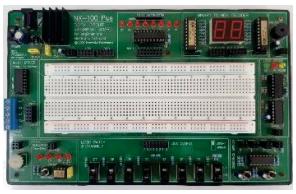
B คือ คะแนนเต็มของแบบทดสอบหลังเรียน

N คือ จำนวนนักเรียนทั้งหมด

3. โครงสร้างการออกแบบและสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง



รูปที่ 1 ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลแบบใหม่



รูปที่ 2 ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลแบบเดิม รุ่น NX-100 Plus

จากรูปที่ 1 การออกแบบและสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลแบบใหม่ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ประกอบด้วยโครงสร้างภายในของ IC Logic ที่รองรับการทดลองตามใบงานจำนวน 17 ใบงาน พร้อมด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ ส่วนที่ 2 ประกอบด้วย ชุดกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock), แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้, ลอจิกสวิตช์ 8 ตัว, ชุดแสดงผล LED และชุดแสดงผล 7-segment ทั้งสองส่วนออกแบบให้ติดตั้งรวมอยู่ภายบรรจุลงในกระเป๋าพกพามีอุปกรณ์ครบพร้อมใช้งาน ซึ่งมีความแตกต่างจากรูปที่ 2 ที่ต้องใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมและไม่ได้รวม Datasheet ของ IC Logic ไว้ในตัวชุดฝึก

4. ผลการวิจัย

ในการวิจัยเรื่องการพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอน ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง โดยการผลการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยดังนี้

4.1 ผลการหาคุณภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ตารางที่ 1 ผลการหาคุณภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ข้อที่	รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D	ระดับคุณภาพ
1. ด้านรูปแบบของชุดปฏิบัติการทดลอง				
1.1	ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ ในใบงาน	4.33	0.58	ดี
1.2	ความปลอดภัยในการใช้ขณะที่ปฏิบัติ	4.33	0.58	ดี
1.3	ความเหมาะสมของการจัดตำแหน่งอุปกรณ์ต่างๆ บนบอร์ดทดลอง	4.67	0.58	ดีมาก
1.4	วัสดุที่ใช้ในการสร้างชุดฝึกปฏิบัติการทดลองมีความเหมาะสม	4.33	0.58	ดี
1.5	มีความสมบูรณ์น่าสนใจของชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง	4.67	0.58	ดีมาก
1.6	ความเหมาะสมของสัญลักษณ์และข้อความบนชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง	4.33	0.58	ดี
2. ด้านใบงานการทดลอง				
2.1	วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรมของใบงานการทดลองสอดคล้องกับชุดฝึกปฏิบัติการทดลอง	5	0	ดีมาก
2.2	ใบงานการทดลองสอดคล้องกับเนื้อหารายวิชาดิจิตอลเทคนิค	5	0	ดีมาก
2.3	ใบงานมีความถูกต้องชัดเจนของเนื้อหา	5	0	ดีมาก
2.4	ลำดับขั้นตอนและภาษาที่ใช้มีความถูกต้อง	5	0	ดีมาก
3. ด้านการทดลองของชุดปฏิบัติการทดลอง				
3.1	สามารถรองรับใบงานการทดลองในรายวิชาดิจิตอลเทคนิค	4.67	0.58	ดีมาก
3.2	การต่อวงจรลอจิกในชุดฝึกปฏิบัติการทดลองเข้าใจง่าย	5	0	ดีมาก
3.3	สามารถทดลองและแสดงผลการทดลองได้ถูกต้อง	5	0	ดีมาก
3.4	การแสดงผลการทดลองผ่าน LED มีความความชัดเจน	4.33	0.58	ดีมาก
3.5	การแสดงผลการทดลองผ่าน 7-segmetn มีความความชัดเจน	5	0	ดีมาก
ค่าเฉลี่ยรวม 3 ด้าน		**4.75**	**0.27**	**ดีมาก**

จากตารางที่ 1 แสดงผลการประเมินคุณภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล จากทรงคุณวุฒิ จำนวน 3 ท่าน พบว่าค่าเฉลี่ยรวมทั้ง 3 ด้าน เท่ากับ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($\bar{X}$) มีค่าเท่ากับ 4.75 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) มีค่าเท่ากับ 0.27 อยู่ในเกณฑ์คุณภาพระดับดีมาก

4.2 การหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

ตารางที่ 2 ผลการหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัลจากผู้เรียนจำนวน 17 คน (N = 17 คน)

ลำดับ	รายการ	N (คน)	คะแนนเต็ม	คะแนนเฉลี่ย	ร้อยละ	เกณฑ์มาตรฐาน
1	คะแนนระหว่างเรียน (E1)	17	170	139.59	82.11	80
2	คะแนนหลังเรียน (E2)	17	170	140	82.06	80

จากตารางที่ 2 แสดงผลการหาประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พบว่าคะแนนการปฏิบัติใบงานการทดลองระหว่างเรียนแต่ละใบงาน (E1) คะแนนที่ได้มีค่าเฉลี่ย 139.59 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 82.11 คะแนนการปฏิบัติการทดลองรวมหลังเรียน (E2) คะแนนที่ได้มีค่าเฉลี่ย 140 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 82.06 ซึ่งผลที่ได้คือ 82.11/82.06 สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 80/80

5. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

การวิจัยเรื่องการพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอน : ชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ผ่านการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่าน พบว่าคุณภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล อยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.75, S.D. = 0.27) และมีประสิทธิภาพของชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล 82.11/82.06 สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงทำให้ชุดฝึกมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ [3] ประจวบ แสงวงค์ “การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรดิจิตอลประยุกต์ ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ 92.33 / 88.66 ซึ่งสูงเกณฑ์ที่กาหนดไว้ และผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนระหว่างกลุ่มทดลองสูงกว่ากลุ่มควบคุม อย่างมีนัยสาคัญทางสถิติที่ระดับ .05” ดังนั้นการพัฒนานวัตกรรมสื่อการสอนชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล สำหรับหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้จริง ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้ได้อย่างมีคุณภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัย เงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ของคณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญที่เสนอแนะในการประเมินคุณภาพชุดฝึกปฏิบัติการทดลองวงจรดิจิทัล ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย จึงขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] กิตติศักดิ์ อังคะนาวิน. (2561). การพัฒนาชุดทดลองและการหาประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมหุ่นยนต์ วิชาไมโครคอนโทรลเลอร์ และอินเตอร์เฟส. *วารสารนวัตกรรมการศึกษาและการวิจัย*, 2(2), 117-128.

[2] กิตตินันท์ จันทร์แป้น, ณัฐกา นาเลื่อน และฐานันท์ ตั้งรุจิกุล. (2564). การพัฒนาชุดทดลองวงจรเรียงกระแสอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้นของนักเรียนหลักสูตร ประกาศนียบัตรวิชาชีพ ชั้นปีที่1 แผนกช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่. ใน *การประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติและนานาชาติครั้งที่ 12*. มหาวิทยาลัยหาดใหญ่, สงขลา.

[3] ประจวบ แสงวงค์. (2564). การพัฒนาและหาประสิทธิภาพชุดทดลองวงจรดิจิตอลประยุกต์ กรณีศึกษาสาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคสว่างแดนดิน.: *วารสารวิชาการ T-VET Journal สถาบันการอาชีวศึกษาภาคเหนือ 3*, ปีที่ 5 ฉบับที่ 10, 272 – 284.

[4] พรศักดิ์ ธรรมนิมิตร์. (2556). วาระนโยบายการศึกษาในศตวรรษที่ 21: นโยบายทางเลือกหรือ นโยบายทางรอดของประเทศไทย. *วารสารสังคมศาสตร์บูรณาการ*, 139-160.

[5] พัชรินทร์ สุวรรณบุตร. (2564). การพัฒนาชุดปฏิบัติการออปแอมป์สำหรับการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี. วารสารการอาชีวศึกษาภาคกลาง, 50-58.

[6] Brahmawong, C. (2013). “Developmental Testing of Media and Instructional Package”. Silpakorn Educational Research Journal 5(1): 7-20. [Online]. Retrieved March 10, 2019, from http://www.educ.su.ac.th/2013/images/stories/Silpakorn_Educational_Research_Journal_ Vol5_No1.pdf

[7] Keawasa S., Jongrutham, P., Wongsuriya, P., Chara, P., Suntonkanokpong, W., & Pornsuwancharoen, N. (2024). Experiment Laboratory Set VIA Internet System on Electrical Instrument and Measurement Course of Higher Vocational Certificate Program of Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus. *Journal of Industrial Education*, *23*(2), 88–99.



ประวัติผู้เขียนบทความ นางสาวจีรภา เพลาวัน ตำแหน่ง อาจารย์ ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร การศึกษา วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า (วิศวกรรมโทรคมนาคม) งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ Optical Communication, Digital circuit and logic design, AI (Artificial Intelligence)

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 17
17th Conference of Electrical Engineering Network 2025 (EENET 2025)

ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล

Smart Trash Selects Plastic Bottles for Recycling

กิตติพัศ แก้วฉิมพลี ธรรศธร จำนงจิตธนัชชา ศุทธางกูร สุวิมล ฤทธิ์พันธ์ และ สุเมธ เนาว์รุ่งโรจน์
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก
E-mail: sujitraporn.25@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษาถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล จากแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE โดยใช้โปรแกรม Shapr 3D ออกแบบโครงสร้างของตัวถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล กำหนดการติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย กล้องเว็บแคม เพื่อตรวจจับรูปร่างของขวด เซอร์โวมอเตอร์ สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดอัตโนมัติ เซนเซอร์อัลตราโซนิก เพื่อวัดปริมาณขยะภายในถัง รวมทั้งเซนเซอร์อินฟราเรด เพื่อตรวจจับการทิ้งขวดพลาสติก ผลการประเมินความถูกต้องในการทำงานของถังขยะที่สร้างขึ้น พบว่าความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 86.67 ความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดแก้วคิดเป็นร้อยละ 83.33 และความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดโลหะคิดเป็นร้อยละ 76.67

คำสำคัญ : ถังขยะอัจฉริยะ, ขวดพลาสติก, การรีไซเคิล

Abstract

The study focuses on the development of a smart trash selects plastic bottles for recycling, utilizing the CiRA CORE artificial intelligence platform. The structure of the smart trash was designed using the Shapr 3D program. Several components were installed, including a webcam for detecting the shape of bottles, a servo motor for automatic lid control, an ultrasonic sensor for measuring the amount of waste inside the trash, and an infrared sensor for detecting the disposal of plastic bottles. The performance evaluation of the smart trash revealed that the accuracy for detecting plastic bottles was 86.67%, glass bottles 83.33%, and metal bottles 76.67%.

Keywords: Smart trash, Plastic bottles, Recycling

1. บทนำ

ปัจจุบันพบว่าขยะทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะขยะพลาสติกที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมมากมาย พบว่าถุงพลาสติก กล่องโฟม และ บรรจุภัณฑ์พลาสติก เป็นขยะที่พบมากที่สุดในทะเล นับว่าขยะพลาสติกเป็นภัยคุกคามต่อระบบนิเวศ ประเทศไทยมีการนำเข้าขยะพลาสติกสูงเป็นอันดับ 3 ของอาเซียน และมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณ 2 ล้านตันในแต่ละปี แต่มีการนำกลับไปใช้ประโยชน์เพียงแค่ร้อยละ 25 ส่วนที่เหลือถูกทิ้งปะปนกับขยะชนิดอื่น หากไม่มีวิธีการจัดการที่เหมาะสม มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และปัญหาด้านอื่น ๆ จากขยะพลาสติกมากยิ่งขึ้น [1] พลาสติกที่สามารถนำมารีไซเคิลได้มีหลายประเภท เช่น HDPE (High-Density Polyethylene), PP (Polypropylene), LDPE (Low-Density Polyethylene), PS (Polystyrene) และ PET (Polyethylene Terephthalate) เป็นต้น [2] ดังนั้นวิธีการที่เหมาะสมในการจัดการกับขยะพลาสติกเหล่านี้ คือคัดแยกขวดน้ำพลาสติก และนำมารีไซเคิล

โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก มีการขายน้ำดื่มที่บรรจุขวดพลาสติก ทำให้ภายในโรงเรียนมีขวดน้ำพลาสติกถูกทิ้งไว้รวมกับขยะชนิดอื่น จึงเกิดแนวคิดที่จะแก้ปัญหานี้ โดยสร้าง ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ซึ่งเป็นการสร้างนวัตกรรมที่ช่วยในการจัดการคัดแยกขวดน้ำพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล โดยอาศัยหลักการสะเต็มศึกษา (STEM) มาบูรณาการ โดยถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล สร้างจากแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE และใช้ Arduino UNO R3 ร่วมกับ Kidbright เพื่อให้ทำงานในการคัดเลือกรับขวดน้ำพลาสติกได้ถูกต้องต้องแม่นยำ และมีประสิทธิภาพ ดังนั้นถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล จึงเป็นนวัตกรรมในการจัดการขยะอย่างยั่งยืน และช่วยลดปริมาณขวดพลาสติกที่ถูกทิ้งในสิ่งแวดล้อม

2.วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อออกแบบ และสร้างถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ที่คัดเลือกรับขวดพลาสติกด้วยเซนเซอร์และปัญญาประดิษฐ์

2.2 เพื่อประเมินความถูกต้องในการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล

3.วิธีการทดลอง

3.1 ออกแบบโครงสร้างถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล โดยออกแบบโครงสร้างของตัวถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล โดยใช้โปรแกรม Shapr 3D กำหนดจุดติดตั้งเซนเซอร์ และติดตั้งกล้องเว็บแคม (Webcam) เพื่อตรวจจับรูปร่างของขวด จากนั้นติดตั้ง Servo Motor เพื่อเปิด-ปิดฝาถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล และติดตั้ง Ultrasonic Sensor และ Infrared Sensor

3.2 เขียนแผนผังการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล (ดังรูปที่ 1)

3.3 เขียนโปรแกรมการประมวลผลโดยใช้แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE

3.4 ออกแบบกลไกการแยกขวด โดยใช้กล้องเว็บแคมตรวจจับรูปร่าง ถ้าขวด ตรงประเภท Servo Motor ทำงานที่มุม 120 องศา (เปิดช่องทิ้งขยะ) พร้อมแสดงผลไฟสีเขียว ถ้าขวด ไม่ตรงประเภท Servo Motor ทำงานที่ 0 องศา และจะส่งเสียง “ Sorry,This bucket only accepts plastic water bottles” เมื่อมีขวดพลาสติกถูกทิ้งลงมาในถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ผ่าน Infrared Sensor จะทำให้ Infrared Sensor ทำงาน และมีการแจ้งเตือนผ่าน LineBot และเมื่อปริมาณขวดถึงระดับที่กำหนดไว้ Ultrasonic Sensor ที่คอยตรวจจับระดับความสูงของขวดน้ำพลาสติก จะส่งสัญญาณแจ้งเตือนผ่าน LineBot และแสดงผลข้อความผ่าน Kidbright เมื่อปริมาณขวดเต็ม

3.5 ทดสอบโดยการประเมินความถูกต้องในการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล โดยทดสอบให้กล้องตรวจจับขวด 3 ประเภทคือขวดพลาสติก ขวดแก้ว และขวดโลหะ อย่างละ 10 ขวด โดยแต่ละขวดทำการทดสอบภายในเวลา 10 วินาที กรณีที่ 1 ทดสอบโดยใช้ขวดพลาสติก หากกล้องตรวจจับได้ถูกต้องภายในเวลา 10 วินาที และฝาถังขยะเปิด ถือว่าเป็นการทำงานที่ถูกต้อง กรณีที่ 2 ทดสอบโดยใช้ขวดแก้ว และขวดโลหะ หากกล้องตรวจจับได้ว่าไม่ใช่ขวดพลาสติกภายในเวลา 10 วินาที และฝาถังขยะไม่เปิด ถือว่าทำงานถูกต้อง โดยแต่ละประเภทของขวดจะทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

3.6 แนวทางการปรับปรุงแก้ไข เมื่อถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิลทำงานผิดพลาด ทำได้โดยการปรับปรุงฐานข้อมูลของ Dataset หรือจัดตำแหน่งการวางของตัวถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ให้มีสิ่งกีดขวางน้อยที่สุดเพื่อลดความผิดพลาดในการตรวจจับของกล้อง

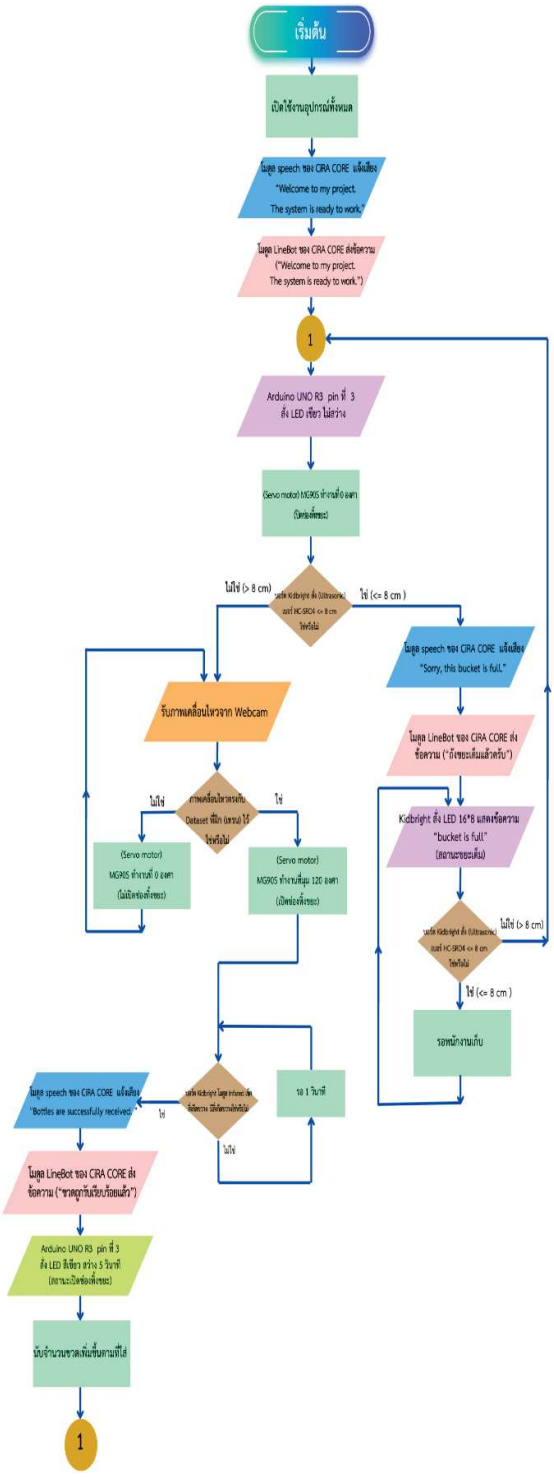
4.ผลการทดลองและอภิปราย

ผลการทดลองความถูกต้องในการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ที่สร้างขึ้นโดยแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE (ดังรูปที่ 2) พบว่ามีความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดพลาสติก ขวดแก้ว และขวดโลหะ คิดเป็นร้อยละ 86.67 ร้อยละ 83.33 และร้อยละ 76.67 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3)

จากผลการทดลอง พบว่า ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกเพื่อการรีไซเคิล ที่สร้างจากแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE สามารถคัดเลือกรับขวดพลาสติกได้สอดคล้องกับการศึกษาระบบเทคโนโลยีแบบออนไลน์เพื่อจัดการขวด PET พบว่าก่อนการติดตั้งถังมีอัตราการเกิดขวด PET เฉลี่ย 2.5 ชิ้นต่อวัน หลังติดตั้งมีอัตราการทิ้งขวด PET เฉลี่ย 7.25 ชิ้นต่อวัน [3] และการสร้างเครื่องคัดแยกขยะอัตโนมัติเพื่อใช้งานในการคัดแยกขวดพลาสติก ขวดแก้ว และกระป๋อง พบว่าตัวเครื่องสามารถแยกประเภทขวดพลาสติก ขวดแก้ว กระป๋อง และทำงานตามขอบเขตที่ตั้งไว้ [4] รวมถึงการออกแบบสร้าง และประเมินประสิทธิภาพการทำงานของถังคัดแยกขยะอัตโนมัติ พบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

5.สรุปผลการทดลอง

จากผลการประเมินความถูกต้องในการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ที่สร้างขึ้นโดยแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE พบว่าความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 86.67 ความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดแก้วคิดเป็นร้อยละ 83.33 และความถูกต้องในการทำงานของการเลือกรับขวดโลหะคิดเป็นร้อยละ 76.67



รูปที่ 1 แผนผังการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติก สำหรับการรีไซเคิล



(ก) โครงสร้างของตัวถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติก สำหรับการรีไซเคิล ที่ออกแบบโดยโปรแกรม Shapr 3D

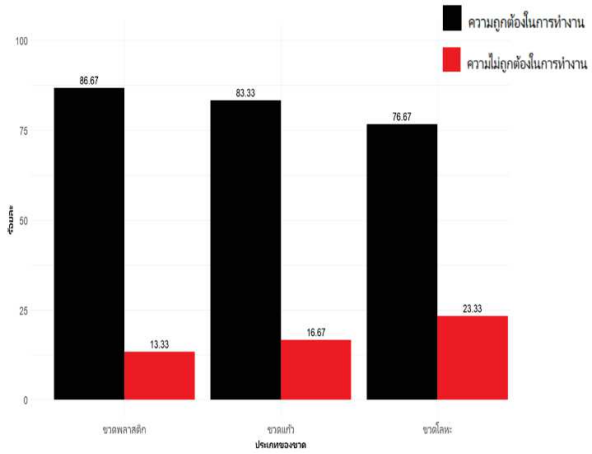


(ข) ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล ที่สร้างมาจากแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ CiRA CORE

รูปที่ 2 ถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล

ตารางที่ 1 ข้อมูลผลการประเมินการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล

ขวดที่	ขวดพลาสติก			ขวดแก้ว			ขวดโลหะ		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
1	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด
2	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
3	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด	เปิด	เปิด	เปิด
4	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
5	เปิด	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
6	ไม่เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด
7	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
8	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
9	เปิด	เปิด	เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด
10	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	ไม่เปิด	เปิด	ไม่เปิด
ความถูกต้องในการทำงาน	ร้อยละ 86.67			ร้อยละ 83.33			ร้อยละ 76.67		



รูปที่ 3 กราฟผลการประเมินการทำงานของถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.สุชาติ เอียดวงศ์ ผู้อำนวยการโรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก ที่ให้การสนับสนุน และอำนวยความสะดวกในการจัดทำการทดลองเรื่องถังขยะอัจฉริยะคัดเลือกรับขวดพลาสติกสำหรับการรีไซเคิล และการเข้าร่วมนำเสนอ

ขอขอบคุณ นายดุริยา เย็นเอง ครู โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก ที่ให้คำปรึกษา แนะนำการใช้แพลตฟอร์ม CiRA CORE

ขอขอบคุณ โครงการส่งเสริมสะเต็มศึกษา (STEM) ปี 2568 ของโรงเรียนกำเนิดวิทย์ ที่ให้โอกาสเข้าไปศึกษาเรียนรู้การทำโครงงานด้านสะเต็มศึกษา

เอกสารอ้างอิง

[1] ทัศนธร ภูมิยุทธิ์. (2565). ขยะพลาสติก. เข้าถึงได้จาก: https://www.onep.go.th/. สืบค้นเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2568.

[2] สถาบันพลาสติก. (2556). ส่อง...ชีวิตพลาสติก สร้างประโยชน์อย่างสร้างสรรค์. Plastics foresight. ฉบับที่ 9 (กันยายน-ตุลาคม 2556).

[3] กัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์. (2562). การใช้ระบบเทคโนโลยีแบบออนไลน์สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการทิ้งขวดพลาสติกพีอีที. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง.

[4] นวฤกษ์ ภัติศิริ. (2563). เครื่องคัดแยกขวดอัตโนมัติ. โรงเรียนอิเล็กทรอนิกส์ กองวิทยาการ กรมอิเล็กทรอนิกส์.

[5] นภัสกร ลาติ. (2566). โครงงานถังคัดแยกขยะอัจฉริยะ. โรงเรียนราชประชานุเคราะห์ 53 จังหวัดสกลนคร.



กิตติพัศ แก้วฉิมพลี ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก งานวิจัยที่สนใจ การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์ในทางการแพทย์ และสิ่งแวดล้อม



ธรรศธร จำนงจิต ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก งานวิจัยที่สนใจ การประยุกต์ใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อตรวจจับความสูงของวัตถุ



ธนัชชา ศุทธางกูร ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบโมเดล 3 มิติ เพื่อใช้ในการศึกษาโครงสร้างทางการแพทย์



สุวิมล ฤทธิ์พันธ์ ครู สาขาวิชาฟิสิกส์ โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก งานวิจัยที่สนใจ คือ งานในสาขาฟิสิกส์ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการแก้ปัญหา



สุเมธ เนาว์รุ่งโรจน์ ครู สาขาวิชาชีววิทยา โรงเรียนสาธิตเทศบาลวัดเพชรจริก งานวิจัยที่สนใจ คือ งานด้านสะเต็มศึกษา การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในการแก้ปัญหา

ดัชนีผู้เขียนบทความ

A

Anon Namin 441

Aran Asavanarakul 185

B

Benjarat Ngansalung 345

C

Chanathip Saengchan 529

Chitsanucha Loicharoenphon 529

F

Fumihiko Sato 161

G

Gontapon promnigon 221

J

Jariya Buajarern 345

Jarun Khonrang 633

Jutturit Thongpron 441

K

Kan nakaiam 441

Kamol Boonlom 633

Keerati Kongwattanathaworn 529

Kittinun Srasuay 441

M

Montri Ngao-det 441

N

Naris Khampangkaew 441

Nattavit Piamvilai 73

Nattawat Panlawan 441

Nikorn Kaewpraek 185

Nithiphat Teerakawanich 665

Niyawadee Srisuwan 453

Nopporn Patcharaprakiti 441

P

Pairoj Duangnakhorn 633

Patnaree Tatiyanukulpong 665

Peerapon Chanhom 529

Peerawit Chaiareekij 529

Phongsuk Ampha 185

Prach Asavanarakul 185

Prasit Mongkhonkaset 221

Promphak Boonraksa 529

Puttipong Ratanatikanon 529

R

Rardchawadee Silapunt 161

Rujipas Sumranbumrung 197

S

Santi Narakulnan 221

Seksan Winyangkul 633

Seksan Wongsom 633

Shiquan Wu	361
Siriroj Sirisukprasert	665
Sokban Sek	57
Sos Agaian	361
Sukan Chotwutthiphan	529
Suwat Sakulchart	185, 453
T	
Tannawat Wongsawang	529
Tassaphan Suwannatat	329
Teerasak Somsak	441
Thanat Sooknuan	185
Thaweesak Trongtirakul	361
Tosapon Intaraumnauy	73
Touchakorn Loedchayakan	73
Trinnapop Boonseng	453
V	
Varin Cholahan	329
Veerapatra Wangsilabatra	529
W	
Waraporn Luejai	453
Wikorn Wongsathian	453
Worrajak Muangjai	441
ก	
กนกพล เพ็ชรมาก	545
กมลชนก ขุนทอง	757
กมลณิตย์ ภู่สร	565
กมลทิพย์ วัฒกีกำธร	317
กมลภัสสร์ มั่นศิลป์	13, 409
กรภัทร เฉลิมวงศ์	309
กรวิทย์ กระจ่างพันธ์	245, 709
กรัณฑ์กมล ภูครองหิน	313
กรัณย์ ศิริจันทร์ชื่น	417
กรุง ลือวัฒนา	45
กฤตภาส หนูคง	657
กฤตยา สมสัย	597, 785
กฤติเดช บัวใหญ่	113, 509
กฤตินันท์ เพ็ชรศรี	709
กฤติพงษ์ ผลอนันต์	13
กฤธพล ธรรมวิรัตน์	29
กฤษฎ์ อานนท์	621
กฤษฎา ทาสันเทียะ	313
กฤษฎา บุญมีวิเศษ	857
กฤษฎากร นวลละออง	285
กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	21, 25, 49, 53, 57, 89
กฤษณะ จันทรวิจิตร	537
กฤษณะพงศ์ พันธ์ศรี	165
กฤษดา ทัศกานิเวศน์	373, 377
กฤษดา แสนสิมน	573
กฤษราช เดชมา	745
กวีวัฒน์ ทัติวงศ์	373
ก่อเกียรติ อ๊อดทรัพย์	689
กอบกุล นงนุช	601
กัญจน์ นาคเอี่ยม	549
กัญญณัช ฤทธานนท์	89
กัญยาณี คำดี	617
กันต์ธีร์ สินะวงค์	557
กัลยรัตน์ ใจชื่น	237
กาญจน์ กันปัญญา	333
กาณฑ์ เกิดชื่น	113, 141, 369, 509

กำไร จันทร์พรม 737
กิตตินัน สระสวย 549
กิตติพงษ์ อนันเอื้อ 793
กิตติพัศ แก้วฉิมพลี 861
กิตติวงศ์ สุธรรมโน 141
กิตติศักดิ์ ศรีสวัสดิ์ 833
กิติธัช คงงาม 497
กีรติ ชยะกุลคีรี 721
กุสุมา เนาว์ประเสริฐ 41
เกษม ตรีภาค 373, 377
โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง 217
โกศล พิทักษ์สัตยาพรต 169, 173
ข
ขจรศักดิ์ เทพผดุง 105
ขจรศักดิ์ สีเมฆ 717
ขวัญชนก ศรีวัลลภ 821, 825
ขวัญชีวา กันทะสาร 509
ค
คงศักดิ์ ตุ้ยสีบ 377
คชพงศ์ สุมานนท์ 701
คณโฑ ปานทองคำ 605
คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ 705, 753
คณิศร บุญรัตน์ 705
คนโฑ ปานทองคำ 61
คมกฤษณ์ ชูเรือง 469
คมกฤษณ์ ศรีสวรรณ์ 785
คุณาธิป อู่ทอง 261
จ
จริยา บัวเจริญ 337, 341, 845
จักรกฤษณ์ เคลือบวัง 789
จักรพันธ์ นรเหรียญ 37
จักรี แซ่ซิ้ม 817
จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน 549, 561, 681
จารุวรรณ พันลำภักดิ์ 493
จารุวัฒน์ เจริญจิต 489
จินดา สามัคคี 433
จิรพันธ์ พิมพล 153
จิรัชยา จำปา 213
จิรัฏฐ์ ฝั้นจักรสาย 589
จิรันธนิน พุกสี 277
จิโรจน์ จริตควร 285
จีรภา เพลาวัน 857
จีรยุ คณธิดามี 505
จีระพงศ์ ศรีวิชัย 569, 785
จุฑาทิพย์ แหมา 213
จุฑารัตน์ ทานะรมณ์ 357
จุฑาศินี พรพุทธศรี 37
จุมพลภัทร์ สีทากุลเศรษฐ์ 465
จุลละพงษ์ จุลละโพธิ 481
เจษฎา พรหมเกษ 597
เจษฎา สารสุข 333, 553
เจษฎาพร ทองขันธ์ 677
ฉ
ฉัตรแก้ว จริยตันติเวทย์ 189
เฉลิม จินาตุน 445, 457, 541
เฉลียว เกตุแก้ว 101, 105
ช
ชญานนท์ แสงมณี 465
ชนกานต์ ไพบูลย์โรจน์รุ่ง 613
ชนสิษฎ์ เปลี่ยนจันทร์ 413

ชนาธิป ใจเฉื่อย 825
ชนาธิป ทิพย์กองราษฎร์ 693
ชยกฤตย์ ลิขิตานุสิทธิ์ 421
ชยานิษฐ์ บุญสนิท 293
ชลลัดดา คงม่วงหมู่ 781
ชวลิต ทองดี 113, 141, 509
ชัชนันท์ ปานะพิพัฒน์ 417
ชัยณรงค์ บุตรจำนง 761
ชัยนรินทร์ ขุมทอง 769
ชัยมงคล เพ็งเต็ม 21, 25, 53, 57
ชัยยุทธ์ สัมภวะคุปต์ 697
ชัยวุฒ ชูรักษ์ 781
ชาคริต วินิจธรรม 237, 617
ชาญชัย แสนจันทร์ 761
ชาญณรงค์ อ่างทอง 321
ชาตรี สรรคอนุรักษ์ 225
ชาตินนท์ ทองกัลยา 857
ชานนท์ ชูพงษ์ 249, 525
ชานนท์ วริสาร 365
ชาริทัศน์ นาคประทุม 837
ชิติสรรค์ วิชิโต 537
ชินวัตร อมรรัตนานุเคราะห์ 821, 825
ชุติพนธ์ วิเศษพันธ์ 13
ชุติพร นิลแนม 373
ชุติพล มหาวีระ 597, 601
ชูศักยฐ์ กมลขันติธร 757, 793
เชษฐวพันธุ์ รัตนบุรี 745
ไชยนุวัติ สิงหประชา 537
ซุลกิฟลี บาโละ 625

ญ
ญาณภัทร ซองทอง 273
ญายนันท์ สุขนพกิจ 817

ฐ
ฐานทัพ นนท์ตุลา 521
ฐาปนา นามประดิษฐ์ 353, 617, 669

ณ
ณฐพัทธ์ พันธ์คง 249, 525
ณตฤณ จันทร์จำรัส 89
ณรงค์ นันทกุศล 549, 561, 645
ณหทัย ผ่องสายใจ 813
ณัชพล เรืองทรัพย์ 109
ณัฏฐพล แจ้งจงดี 445, 541
ณัฏฐกิตติ์ เอี่ยมสมบูรณ์ 53,57
ณัฏฐณิชา จันทร์ปัญญา 845
ณัฏฐพล แจ้งจงดี 457
ณัฐกมล ประดุมสุข 213
ณัฐชนันท์ ปลายเนตร 69
ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี 521
ณัฐฐะวีวรรณ ปานจันทร์ 753
ณัฐนันท์ บางจั่น 405
ณัฐนัย พวงเขียว 833
ณัฐพงศ์ แพนไธสง 693
ณัฐพงศ์ สอนอาจ 469
ณัฐพงศ์ แสงสูงเนิน 237
ณัฐพงษ์ เกตวงษา 473
ณัฐพงษ์ รุ่งพรมมา 305
ณัฐพร ความสุข 605
ณัฐพล ชูสกุล 65
ณัฐพล หาอุปละ 249, 525

ณัฐพันธ์ ถนอมสัตย์ 841
ณัฐภัทร พันธ์คง 241
ณัฐภัทร อนุศักดิกุล 85
ณัฐวัฒน์ พัลวัล 549, 561, 681
ณัฐวัตร รุ่งเรืองพินิจ 817
ณัฐวุฒิ เนียมตะเคียน 829
ณัฐวุฒิ ผ่องหนู 669
ณัฐวุฒิ สมพงษ์ 569, 597, 785
ด
ดนัย ทองธวัช 565, 689
ดนัยกฤต ใจปาละ 85
ดนุพล คำปัญญา 321, 325
ดรุณี ชายทอง 201
ดวงอาทิตย์ ศรีมูล 581
ดารารัตน์ มั่งคั่ง 357
ดำรง เซ้งมณี 693
ดุสิต อุทิศสุนทร 721
เดชรัชต์ ใจถวิล 253
เดชา ปานประเสริฐ 245
เด่น คอกพิมาย 513
ต
ตระการ ยอดดำเนิน 373
ตฤณภพ บุญเส็ง 81, 177, 585, 593
ต้นตระการ เผยกลิ่น 733
ต่อศักดิ์ โกษาวัง 377
ตุลยวัต นวลมุล 61
เตือนใจ อาชีวะพนิช 693
ถ
ถิระวรรธน์ สืบธนะวงษ์ 233
ท
ทนงศักดิ์ โกสีย์ 721
ทนุสินธุ์ ลาลู่ 409
ทรงยศ มาลีวงศ์ 513
ทรัพย์ทวี สุวรรณทา 513
ทักษ์ หงษ์ทอง 477
ทัชชกร ธรรมปัญญา 477
ทัตยา ปุคคละนันทน์ 153
ทัศพงศ์ นันทมัจฉา 473
ทัศพล ชมภูอาจ 797
ทัศพันธุ์ สุวรรณทัต 637
ธ
ธงชัย คล้ายคลึง 141
ธนกฤต ศรีวิสุทธิชัย 65, 313
ธนกฤต สราญสิริบรรักษ์ 589
ธนโชติ กัลยาณปัทม์ 605
ธนพงษ์ กรรณแก้ว 573
ธนภัทร มาลีลัย 673
ธนภูมิ มูสิกัณฑ์ 629
ธนวรรธน์ วัชรดำรงค์ศักดิ์ 513
ธนวัฒน์ เฉลิมพงษ์ 173
ธนวัฒน์ ศรีรักษา 461, 545, 661
ธนะกิจ วัฒกีกำธร 317
ธนัชชา ศุทธางกูร 861
ธนายุทธ ไพศาลอัศวเสนี 833
ธนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ 413
ธนิตา ลาภวิบูลย์กิจ 613
ธเนศ ภู่กัน 737
ธมลวรรณ นัทที่ทอง 357
ธรรศธร จำนงจิต 861

ธราธิป ภู่ระหงษ์ 289,749
ธวัช ชูชิต 37, 461, 545, 661, 697
ธันษา หมื่นศรี 257
ธีรชาติ สถิตธรรมพนา 777
ธีรธรรม บุณยะกุล 33
ธีรพงษ์ ฉิมเพชร 729
ธีรภัทร บุตร์เพชร์ 733
ธีรภัทร วงษ์กำภู 13
ธีรยุทธ ทองทวี 461, 661
ธีระศักดิ์ สมศักดิ์ 549, 561, 681
ธีวราพร เทพสุวรรณ 357

น

นครินทร์ ศรีปัญญา 601
นงลักษณ์ ตั้งไพศาลกุล 845
นที ศรีนะ 297
นนทกร เลิศวชิรไพบูลย์ 281
นนท์ปวิธ ฝัดศิริ 105
นนธวัช สีสรรค์ 697
นพณัฐ จิตกรียาน 113,141, 369, 509
นพดล ฉาบแก้ว 33
นพพร พัชรประกิติ 681
นพมาศ พรมอาสา 417
นพรุจ เขียวนาค 265
นพัตธร พิชัยวง 801
นภรรท แสนสร้อย 481
นภสร จินนิกร 265
นราธิป มีศาสตร์ 533
นรินทร์ จันทวงศ์ 337, 341
นริศ กำแพงแก้ว 681
นริส ประทินทอง 429
นรุตม์ชัย ทรัพย์เจริญกูล 77
นเรศ ชลังสุทธิ์ 1, 5, 9, 29, 41
นฤสรณ์ แน่นหนา 341
นัชนัยน์ รุ่งเหมือนฟ้า 145,149
นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ 1, 5, 9, 17, 29, 41, 109, 129, 701, 725, 809, 829, 837
นัฐรดี เขมากโรทัย 617
นันทวัฒน์ สุวรรณ 425
นาวิน รอดเรือง 29, 109
นาวินต้า ฟักแก้ว 769
นิคม ศรีหะมงคล 333
นิติกร เกษพรหม 129
นิติธร ทองเรือง 769
นิติธร เคนโยธา 337, 341, 845
นิติพงศ์ ปานกลาง 249
นิธิกร จันทร์หัวโทน 249
นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ 857
นิพนธ์ พลเสน 417
นิมิตร ทักษวิทยาพงศ์ 281
นิยวดี ศรีสุวรรณ 81, 177, 585, 593
นิรัช ชัยหา 365
นิโรธ ชื่นชม 233
นิวัติ นวลกัน 205, 805
นิวัทธ์ วรรณวงศ์ 125, 349
นิสิต องอาจ 173
นุชจิเรศ แก้วสกุล 309

บ

บพิตร ไชยนอก 253

บรรชา กวีวงษ์พิพัฒน์	501	ปริญญา สมยี่	645
บุญเติม อุ่นวิเศษ	69, 333	ปรีชา สมหวัง	313
บุญธง วสุริย์	717	ปรีชา วงษ์จำปา	165
บุญยัง ปลั่งกลาง	49, 501, 713	ปรีชา สาคะรังค์	325
บุณย์ชนะ ภู่ระหงษ์	693	ปัทมพร แสงสุวรรณ	757
บุษกร บุญศรี	165	ปาณชัย เจริญบุญพัชร	693
บูรพา จำรัส	409	ปิฎก ค้าโค	437
เบญจมาภรณ์ ภูมี	77, 449	ปิยภัทร โกษาพันธุ์	301
ป		ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	365
ปกรณ์ กัลปดี	301	ปิยะ ศรีสุขขี	105
ปฏิพล กวานปรัชชา	553	ปิยะ ศิริขันธ์	349
ปฏิวัติ บุญมา	97	ปิยะบุตร แก้วรัชนี	21
ปพน งามประเสริฐ	109	ปิยะภัทร พ่วงศรี	765
ปภัศร์ชกรณ์ อารีย์กุล	625, 629	ปิยะมาศ ไชยนอก	253
ปรเมษฐ์ นวมโคกสูง	113, 141	ปุรเชษฐ์ ตราหยก	77, 449
ประกาศิต ปราบพาล	125, 349, 761	ผ	
ประกาศิต ศรีทะแก้ว	85, 589	ผดุงรัตน์ ปรองพิมาย	797
ประจวบ แสงวงค์	749	พ	
ประจวบ อินระวงค์	313	พงศธร นาเวียง	9
ประชา บุณยวานิชกุล	485, 521	พงศธร พรมชมชา	857
ประธาน นิลสนธิ	261	พงศ์พัฒน์ สิงห์ศรี	265, 269, 637
ประภวิษณุ์ ปานมี	817	พงศ์พัทธ์ มังคละคีรี	673
ประมุข อุณหเลขกะ	417	พงศ์พันธ์ เลขะวัฒนะ	745
ประสพโชค โห้ทองคำ	229, 773	พงศภรณ์ ชาติสุทธิ	669
ประสิทธิ์ ศรีนคร	625	พงศภัค บุตรไฉยา	409
ประสิทธิ์ มงคลเกษตร	473	พงษ์ชัย จำนงค์นอก	781
ประหยัด กองสุข	13, 237, 409	พงษ์ประภัทร ชูหิรัญญ์วัฒน์	313
ปรัชญา ปฐมชัยวัฒน์	245	พงษ์พิสิฐ วุฒิดิษฐโชติ	305
ปรานต์ เมฆอากาศ	777	พนัสชัย ศรีบำรุง	557
ปราโมทย์ จางอิสระกุล	813	พนา ดุสิตากร	9

พรชัย กิจเจริญ	717	พิษณุ ดีแสน	193
พรชัย แคล้วอ้อม	293, 433	พิสิฐ สอนละ	533
พรภัสสร อ่อนเกิด	277	พีรธัช มากปรี	817
พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร	77, 449, 449	พีรภัทร โอวาทชัยพงศ์	485, 685
พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล	25,57	พีรวิชญ์ วัฒนะ	853
พฤศยน นินทนาวงศา	497, 505	พูนศรี วรรณการ	5,29
พลกฤษณ์ จริยตันติเวทย์	189	เพลิน จันทร์สุยะ	477
พลอยบุศรา โกมาสังข์	357, 677	ไพบูลย์ เกียรติสุขคณาธร	225
พลากร พรหมเมศร์	381	ไพโรจน์ วุ่นชุม	705, 753
พสิษฐ์ สุวรรณภิงคาร	9, 821, 825	ไพโรจน์ แสงอำไพ	425
พสุพร ศักดิ์วธารักษ์	533	ไพศาล คงเรือง	117, 121
พัชรณัฏฐ์ แสงอ่อน	673	ฟ	
พัชรพร มั่นกิจ	525	ฟิกรี ดีเยาะ	625
พัชรพล ไม่เที่ยง	577	ภ	
พัชรา วงค์ทอง	577	ภราดร เรืองกูล	649
พัชรี ครองกิจศิริ	209	ภัคจิรา กำเนิดเขว้า	509
พัทธพล วิโรจธีระกุล	581	ภัททิยา พยอมหอม	137
พันกร เส็งดอนไพร	565	ภัทธาวุธ วงศ์ศักดิ์	169
พิจักขณา ศรีฉ่ำพันธ์	101	ภัทรพงศ์ จันทรประสาท	573
พิชญ รัชฎาวงศ์	853	ภัสส์กุญช์ ฐิติมหัทธนกุศล	177
พิชญา สุกใส	733	ภากรณ์ ปู	513
พิชญานิน มูลเมือง	149	ภาณุพงศ์ ปัญญาสาร	209
พิชัย อารีย์	93	ภานุมาศ แสนพวง	597
พิเชษฐ์ ทานิล	549, 561	ภาวนา ชูศิริ	533
พิทยา จุฬาเต่า	341	ภาสพิชญ์ ชูใจ มิเชล	297
พิทักษ์ บุญนุ่น	61, 609	ภีรวัชร ภูมิสุวรรณ	217
พินิจ บุญหล้า	241	ภุชงค์ จันทร์จิระ	405, 517
พินิจ ศรีธร	65	ภูดิศ โทอินทร์	165
พิมพ์นภัส ภูมิกิตติพิชญ์	53, 57	ภูมินทร์ ฮงมา	289, 749
พิมพ์นิภา รัตนจันทร์	601	ภูรชญา วิรัตน์ศิริ	549

ภูวภัท อัครดำรงโชค 677
เภาพิภัสร์ ลิ่มสายหั้ว 629
ม
มงคล คูพิมาย 313
มงคล ด่านบำรุงตระกูล 65
มณิสรา มั่นแก้ว 789
มณีรัตน์ ชนะสกุลนิยม 577
มนฑล นาวงษ์ 249
มนตรี เงาเดช 549, 561, 681
มนตรี อารีย์ 265
มนัญญา อำนวย 821, 825
มนัส บุญเทียรทอง 5, 701
มลิวรรณ ชัยฮะนิจ 849
มักตาร์ แวหะยี 133, 489
มานุพล ธานี 621
มารุต รักษา 293, 433
มาลิวรรณ บุญพลอย 261
มาสวีร์ มาศดิศรโชติ 257, 261, 281
มีชัย แจ่มใส 209
เมธา ทัศคร 785
เมธาสิทธิ์ โชคฤทัย 465
ย
ยศชดิพ บุญโกย 565
ยิ่งยศ ทิพย์ศรีราช 641
ยุติ ฉัตรวรานนท์ 573, 577
ยุทธณา คงจีน 113, 141, 369, 509
ร
รตบงกช แสนจุ้ม 641
ระวิวร ฮงมา 289
รัตติยา สิงห์สอน 5
รุ่งเพชร ก่องนอก 369, 509, 513
รุ่งลาวัลย์ ชูสวัสดิ์ 201
รุ่งวิลัย กลิ่นทองหลาง 781
ฤ
ฤชานนท์ ศรีราวงค์ 253
ล
ลัคนา เพิ่มพูล 353
ว
วจี พาที 797
วชิรนันท์ ปุ้ม 273
วรจักร์ เมืองใจ 549, 561, 681
วรพงค์ บุญช่วยแทน 309
วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์ 145, 153
วรพงษ์ วงศ์พาสุข 213
วรพล อินทร์แปลง 237
วรรณวินิต วิจิตรเตมีย์ 49, 713
วรรัตน์ ปัตรประกร 77, 449, 493
วรัญญู เมฆทา 833
วราภรณ์ ลือใจ 81, 181, 585, 593
วราลี หมื่นจิตร 257
วราห์ สาดะระ 245, 817
วลัญช์ ทรรศนโมไนย 37
วลันดา อุ้ยวงค์ 209
วสันต์ จันทรโชติ 705
วสันต์ เธียรสุวรรณ 521
วสุ สุขสุวรรณ 133, 489
วะชิระพงษ์ พงศ์กิจวิทูร 513
วัชรพล นาคทอง 177, 181
วัชรากร ปิ่นธุรัตน์ 13, 409

วัฒนา มาคำ 373, 377
วาฤทธิ์ ช่างประดับ 233
วารินี วีระสินธุ์ 533
วารุณี ศรีสงคราม 181
วารุณี ศรีสงคราม 585
วิกร วงษ์เสถียร 81, 181, 585, 593
วิชชา อุปภัย 685
วิชัย ครองกิจศิริ 209, 857
วิฑูรย์ พรมมี 85, 589, 801
วิทยา ศรีกุล 277, 537
วินัย ใจกล้า 169
วิรัช กองสิน 769
วิวรรธน์ สุเหร็น 661
วิวัฒน์ ทิพจร 477, 801
วิสุทธิ์ ตันติรุ่งเรือง 733, 745
วีรดา เอ่งฉ้วน 41
วีระ รัตนงาม 273
วุฒิไกร เกตุบุตร 37
วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน 613
วุฒิไกร ธรรมวรรณ 477
วุฒิชัย สง่างาม 141, 509
เวทรินทร์ ธัญสิประเสริฐ 701
แวอารีฟ แวอาลี 625

ศ

ศตวรรษ บูรณา 645
ศรัญญา พิริยประเสริฐ 849
ศรัญญู กันทะวงค์ 205
ศรีชล ภิรมย์ลาภ 265, 269
ศศิกา สนธิกัณฑ์ 5
ศักดาวุฒิ บุญตั้ว 237, 353, 641
ศักดินนท์ ตันละมัยงาม 101
ศักดิ์สิทธิ์ ดีอ่ำ 57, 89
ศิริชัย แดงเอม 249, 525
ศิริพงษ์ วัฒนศักดิ์ศิริ 65
ศิวกร โคธิเสน 621
ศีลวัต ร่มโพธิ์ชัย 21, 25, 53, 57, 249
ศุภกร กตาธิการกุล 609
ศุภกาญจน์ รักษาศรี 517
ศุภชัย แก้วพวง 661, 741
ศุภชัย ปลายเนตร 69
ศุภโชค ตันติวิวัทน์ 685
ศุภณกร พวงมาลัย 781
ศุภณัฏฐ์ แก้วประสิทธิ์ 657
ศุภฤกษ์ สนามเขต 101
ศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว 9, 29

ส

สถาปัตย์ กิลาโส 365
สถาพร เสือเทศ 229, 773
สนธยา ขำเดช 573
สมเกียรติ ปันยา 801
สมเกียรติ์ มะลิพันธ์ 857
สมควร มณีนาค 457
สมคิด ฤทธิ์เนติกุล 173
สมคิด สุทธิศักดิ์ 729
สมชาติ โสนะแสง 125
สมชาย เบียนสูงเนิน 249
สมชาย เปาะทองคำ 317
สมบูรณ์ เวชกามา 429, 481
สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ 225

สมพจน์ คำแก้ว	485
สมพร ศรีวัฒนพล	669
สมพล บุญญสุวรรณโณ	541
สมพล บุญสุวรรณโณ	457
สมมาตร ทองคำ	573
สมมาตร พรหมพุฒ	177, 181
สมศักดิ์ วัชระคุปต์	141, 369
สยามรัฐ เพิกอาภรณ์	101, 105, 417
สรายุทธ ปล้องเงิน	565
สลักจิตร แบลนชาร์ด	117, 121
สวรุจ คำสุจริต	405
สวัสดิ์ ยุคะลัง	789
สัญชัย รำเพยพัด	513
สัญญา ผาสุข	293, 433
สัตถาภูมิ ไทยพานิช	321
สันติ การีสันต์	385, 389, 393, 397, 401
สันติ กูลการขาย	365
สันติ หวังนิพพานโต	765
สันติพงษ์ คงแก้ว	425
สันติสุข สว่างกล้า	229, 773
สาคร ปันตา	645
สาคร วุฒิพัฒนพันธุ์	17, 29, 41, 109, 129, 725, 809, 829, 837
สามารถ ใจซื่อ	773
สามารถ ยะเชียงคำ	549, 561, 645
สายชล ชุดเจือจีน	241
สายัณ ละอองโชค	649
สายัณห์ ฉายวาส	797
สาเหะอันวา ดะแซ	765
สิทธเดช หมอกมีชัย	69
สิทธิชัย จีนะวงษ์	777, 805
สิทธิชัย วิบูลย์กลาง	833
สิทธิพร บุญญานุวัตร์	489
สิทธิพันธ์ เธียรชาติอนันต์	33
สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ	385, 389 ,393, 397, 401
สิรวิชญ์ ตังตา	537
สิรวิชญ์ ธรรมรสเดชา	277
สิริพงษ์ เพชรนาค	533
สิษฐ รัตนคำ	125, 349
สุขคานา ลืม	217
สุจิตรา จีนะวงษ์	205, 777, 805
สุเจนต์ พรหมเหมือน	609
สุชาติ เขียวนอก	169, 173
สุชานันท์ บริบรูณ์	517
สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน	421
สุเทพ ชูกลิ่น	489
สุนทร รุ่งเรืองใบหยก	201, 657
สุนัน หนองเหล็ก	457
สุนันติยา พาระนา	337
สุพร หนูคง	725
สุพิพัฒน์ พานิชธนาคม	381
สุภัทรา เกิดเมฆ	277, 537
สุเมธ ดาราพิสุทธิ์	265, 269
สุเมธ เทศกุล	457
สุเมธ เนาว์รุ่งโรจน์	861
สุรชัย เหมหิรัญ	521
สุรชา พนันชัย	69
สุรชาติ เหล็กงาม	621

สุรเชษฐ เดชฟุ้ง 5, 701
สุรพล โรจนประดิษฐ 101, 105
สุรวุฒิ ยิ้มฤทธิ์ 577
สุรศักดิ์ เกตบุญนาค 629
สุรศักดิ์ น้อยทับทิบ 49
สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์ 653
สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ 9, 701, 821
สุริยา เทียมตามณี 645
สุริโยทัย สุปัญญาพงศ์ 217
สุวรรณี ปัญยศ 205, 805
สุวัฒน์ สกลุชาติ 81, 177, 181, 585, 593
สุวิทย์ เพชรห้วยลึก 609
สุวิมล ฤทธิ์พันธ์ 861
เสฏฐา ศาสนนันทน์ 485
เสนอ สะอาด 657
เสวก ประทุมเมศ 49
เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย 545
โสภณวิชญ์ กองมงคล 557

ห

หัฏฐะ สาวะจันทร์ 217
หาญศึก สุชาติกุล 457
เหมหงส์ จุรีนุกูล 765

อ

อดิศร พลเสนา 509
อดิศร เมรุแก้ว 741
อดิศักดิ์ ผ่อนร้อน 617
อธิโรจน์ มะโน 649
อธิวัตร อุปสุข 857
อธิษฐ์ บุตรโดย 793
อนนท์ นำอิน 653
อนุชา ไชยชาญ 533
อนุชา บุญชูโต 809
อนุชิต อุไรรัตน์ 445, 457, 541
อนุวรรตน์ ศิริเพ็ชร 61
อนุศักดิ์ บิสลาม 213, 217
อนุสรณ์ ผ่องประภา 577
อเนก ไทยกุล 605
อภิรักษ์ ขัดวิลาศ 789
อภิรักษ์ เสือเดช 201, 649, 657
อภิรัญธ์ จันทร์ทอง 425
อภิราช รัตนอุดมพิสุทธิ์ 241, 557
อภิสิทธิ์ บุตรนนท์ 573, 577
อมรเทพ ประเสริฐน้อย 789
อมรพงศ์ ฐากุลอธิวัฒน์ 613
อรพิน ชาญนำสิน 153
อรรคชัย ภูผานิล 569
อรรคชัย ภูมิผานิล 785
อรรถ พยอมหอม 137
อรสา พุทธศรี 357
อรุณสวัสดิ์ ปรีดาถวัลย์ 429
อสิวุฒิ บุญเจียม 53, 57
อัชวา มามะ 117
อันวัร มัสอูดี 413
อัฟนันท์ กะลูแป 117
อัมพร บุญราม 121
อาคม ลักษณะสกุล 425
อาทิตย์ ขาวรุ่งเรือง 17
อานนท์ พ่วงชิงงาม 97
อานนท์ สิงห์เสถียร 701

อานนท์ อิศรมงคลรักษ์	37, 461, 697, 741
อำนวย เรืองวารี	193
อำนาจ ผดุงศิลป์	437
อิดริส เร่งหวัง	625
อินทัช ฉันทสัมพันธ์	1
อินทิรา คำพิมพ์	233
อิศเรศ ขาวเกลียด	697
อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา	569
อุทัย อึ้งเจริญ	573
อุรา คล่องแคล่ว	857
เอกชัย ชัยดี	477
เอกชัย ชูเที่ยง	737
เอกนรินทร์ เถิงจาง	653
เอกบดี เมืองกลาง	313
เอกพล อนุสุเรนทร์	757
เอกรัฐ ชอุ่มเอียด	833
เอกราช ธรรมษา	301
โอภาส สุขหวาน	405, 517
ฮ	
ฮานาฟี ลือแบกาเส็ง	117
ฮามียี ยูโซะ	133

ผู้ให้การสนับสนุนการจัดงาน EENET2025


เปิดรับสมัคร
นักศึกษาใหม่
ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ
ระดับปริญญาตรี
ระดับป.บัณฑิต
ระดับปริญญาโท-เอก
รับตรงทุกวุฒิการศึกษา
ลดค่าสมัคร
50%
ทุกระดับ
RMUTP
ทุกโอกาสเป็นไปได้ที่ RMUTP
จบแล้วมีงานทำ
9 คณะ
1 วิทยาลัย
www.rmutp.ac.th
(สมัครเรียนได้ตลอด 24 ชั่วโมง)
rmutpFB
rmutpIG
rmutp_twit
@rmutp
RMUTP
RMUTP
สอบถามเพิ่มเติม : 02-665-3777 ต่อ 6636, 6307


RMUTP
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
รับสมัครนักศึกษาใหม่
รับตรงทุกวุฒิการศึกษา
(ม.3/ม.6/ปวช./ปวส.)
รับตรง
โควตา
TCAS
ระดับปวช.
ระดับปริญญาตรี
ระดับป.บัณฑิต
ระดับปปริญญาโท-เอก
ลดค่าสมัคร
50%
- คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
- คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์
- คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน
- คณะบริหารธุรกิจ
- คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- คณะวิศวกรรมศาสตร์
- คณะศิลปศาสตร์
- คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น
- คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ
- วิทยาลัยการบริหารแห่งรัฐ
สมัครผ่านระบบออนไลน์
ตลอด 24 ชั่วโมง
www.rmutp.ac.th
02-665-3777 ต่อ 6636, 6307



จัดทำโดย : คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ สาย 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800.
โทร. 02 – 836 – 3000 ต่อ 4150 – 4151

Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
1381 Pracharat 1 Road, Wong Sawang, Bang Sue, Bangkok, 10800.
Tel : 02 – 836 – 3000 Ext. 4150 – 4151