

วารสารวิชาการ

เทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT TECHNOLOGY
of Graduate School Siam Technology College



ปีที่ 13 ฉบับที่ 1
(มกราคม – มิถุนายน 2569)



ISSN 2392 – 5701

วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College

ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 (มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2569): Vol. 13 No. 1 (January-June 2026)

ISSN (Print): 2392-5701

วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม จัดทำโดย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม เพื่อเป็นสื่อในการเผยแพร่ผลงานวิจัย ความรู้และวิทยาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม เป็นต้น โดยวารสารเปิดรับบทความจากภายในและภายนอก รวมถึงต่างประเทศ แบบเต็มรูปแบบ (Full Paper) รวมถึงบทความวิชาการ (Review Articles) บทความที่เสนอมาอาจเขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ โดยบทความดังกล่าวจะต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน และเป็นข้อคิดเห็นของผู้ส่งบทความ นอกจากนี้อัตราการคัดลอกในระบบต้องไม่เกินกว่าร้อยละ 20 เท่านั้น

วัตถุประสงค์	เพื่อสนับสนุนและกระตุ้นให้มีการเขียนผลงานทางวิชาการ เผยแพร่ผลงานทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิชาการและนักศึกษาทั้งภายในและภายนอก รวมทั้งเป็นสื่อกลางทางการศึกษา ค้นคว้า และเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการ
จุดมุ่งหมาย	เป็นศูนย์กลางเพื่อสนับสนุน ถ่ายทอด องค์ความรู้ และเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ และการวิจัยที่มีคุณภาพ ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ส่วนรวมของประเทศได้อย่างต่อเนื่องในวารสารรูปแบบสิ่งพิมพ์ และวารสารอิเล็กทรอนิกส์
เงื่อนไข/ข้อกำหนด	1. รับต้นฉบับบทความที่เป็นไปตามเกณฑ์ รูปแบบ มาตรฐาน และแนวปฏิบัติที่วารสารกำหนดไว้โดยผ่านความเห็นชอบจากวารสารแล้วเท่านั้น (ไม่รับต้นฉบับบทความที่ไม่เป็นไปตามที่ระบุไว้) 2. บทความที่ส่งขอรับการพิจารณาจะต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในขั้นตอนพิจารณาเพื่อเผยแพร่ในวารสารอื่น 3. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นข้อคิดเห็นของผู้แต่ง/ผู้พิมพ์/ผู้เขียน เท่านั้น และจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น 4. บทความที่ได้รับการลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
กำหนดการเผยแพร่	ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ดังนี้ ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม-ธันวาคม
การประเมินบทความ	โดยผู้ทรงคุณวุฒิ / ผู้เชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ ในรูปแบบ Double Blinded
ที่ปรึกษา	อธิการบดี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม หน้าที่ ให้คำปรึกษาในการจัดทำวารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม
บรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุทฤต ปานชลธิ หน้าที่ ดำเนินงานบริหารจัดการวารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อมให้เป็นไปตามนโยบายของวิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

<http://jeet.siamtechu.net>

เจ้าของ	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600 โทรศัพท์ 02-878-5000	
การส่งบทความ	ส่งไฟล์ทาง E-mail (MS Word และ PDF) ไปที่ทางเว็บไซต์ของวารสาร http://jeet.siamtechu.net/ และ https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/JEET/index	
พิมพ์ที่	บริษัท แดเน็กซ์ อินเทอร์เน็ตปอเรชั่น จำกัด 103/11 ซอยกำแพงเพชร 6 ซอย 5 แขวงตลาดบางเขน เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210 โทรศัพท์ 02-575-1791, 088-578-8400 เว็บไซต์ www.protexts.com	
สำนักงาน	หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม เลขที่ 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600 โทรศัพท์ 02-878-5035	
กองบรรณาธิการ	ศาสตราจารย์ ดร.จงจิตร หิรัญลาม รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิระ สายสร รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ ดวงเดือน รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ปรากฏเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ ด้วงทองสุข รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ ภูเกล้าวัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุโกศล วโนทยาพิทักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา สำราญพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต แต่งศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ติรอต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา เครือชาลี ดร.ดิณณภพ จุ่มอิน ดร.กวินเวทย์ พิพิธนาธันยธร ดร.ทรงพล นครศรีเรืองศักดิ์ ดร.กนกอร รจนากิจ ดร.สุทธิลักษณ์ ชุนประวัติ ดร.กฤติเดช ดวงใจบุญ ดร.ธนเสฏฐ์ อัครัญญภูติส ดร.ไพโรจน์ หอมอ่อน อาจารย์ปิยะนัฐ ใจตรง อาจารย์เฉลิมพล เมืองลือ อาจารย์ภัทรมนตร์ ธนเดชา อาจารย์จิรวัดน์ กรุณา อาจารย์สงกรานต์ ภารกุล มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา มหาวิทยาลัยธนบุรี มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม มหาวิทยาลัยธนบุรี มหาวิทยาลัยปทุมธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม	

หน้า	อาจารย์กัญญ์ สุริยันธ์	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
	อาจารย์วัชรินทร์ รตนนิมิตร	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
	อาจารย์ปัญญ์พัชรกร บุญพร้อม	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
	อาจารย์สารสิน โคตรธาดา	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
	1. ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะในการดำเนินการจัดทำวารสารให้มีคุณภาพ เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้การดำเนินงานจัดทำวารสารสำเร็จลุล่วงด้วยดี 2. พิจารณาและประเมินบทความที่ส่งเข้าสู่กระบวนการของวารสารตามความเหมาะสม	

ฝ่ายประสานงานและเลขานุการกองบรรณาธิการ

อาจารย์ชลิดา โปะมา	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์สารสิน โคตรธาดา	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewers) ปีที่ 13 ฉบับที่ 1	
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ ตรงศิริกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐกฤต ปานชลธิ	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เยาวเรศ จันทะคัต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ภูสมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สำรวม โกศลนันท์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.ชยพล ผู้พัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.จุฑารัตน์ แก้วบุญชู	มหาวิทยาลัยมหิดล
ดร.บงกชรัตน์ สุยะหมุด	มหาวิทยาลัยเซนต์ปีเตอร์สเบิร์ก
ดร.กวินเวทย์ พิพิธนันทนธร	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ดร.กฤติเดช ดวงใจบุญ	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ดร.ไพฑูรย์ เหล่าดี	มหาวิทยาลัยรัตนบุรี
อาจารย์ปิยะนัฐ ใจตรง	มหาวิทยาลัยปทุมธานี
อาจารย์เฉลิมพล เมืองลือ	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์สงกรานต์ ภารกุล	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์ก่าจิต ใจตรง	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์สุคนธ์ ขาวกริบ	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์ปัญญ์พัชรกร บุญพร้อม	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์สารสิน โคตรธาดา	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
อาจารย์ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน	วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม ก้าวเข้าสู่ปีที่ 13 ท่ามกลางบริบทของโลกที่กำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทั้งด้านเทคโนโลยี เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะความท้าทายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความมั่นคงทางพลังงาน การจัดการทรัพยากรธรรมชาติ และการพัฒนาที่ยั่งยืน ซึ่งล้วนเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิต การดำเนินธุรกิจ และการพัฒนาประเทศในทุกมิติ ภายใต้สถานการณ์ดังกล่าว การวิจัยและพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ พลังงาน และสิ่งแวดล้อม มีบทบาทสำคัญในการสร้างนวัตกรรมและแนวทางการแก้ไขปัญหาที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของสังคมในปัจจุบันและอนาคต การบูรณาการองค์ความรู้จากหลากหลายศาสตร์ ตลอดจนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานสะอาด เทคโนโลยีดิจิทัล ปัญญาประดิษฐ์ การจัดการคาร์บอน และเศรษฐกิจหมุนเวียน ล้วนเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาอย่างยั่งยืนในระดับประเทศและระดับโลก วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม ปีที่ 13 ฉบับที่ 1 จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเวทีทางวิชาการในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพจากนักวิจัย นักวิชาการ คณาจารย์ และผู้เชี่ยวชาญจากหลากหลายสาขา โดยมุ่งหวังให้เป็นศูนย์กลางของการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ประสบการณ์ และแนวคิดสร้างสรรค์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม อันจะนำไปสู่การสร้างคุณค่าและประโยชน์ต่อสังคมในวงกว้าง

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยามในฐานะผู้จัดทำวารสาร ยังคงมุ่งมั่นในการส่งเสริมคุณภาพงานวิจัยและการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการตามมาตรฐานสากล พร้อมทั้งสนับสนุนการสร้างเครือข่ายความร่วมมือทางวิชาการระหว่างสถาบันการศึกษา หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และภาคประชาสังคม เพื่อร่วมกันพัฒนาองค์ความรู้และนวัตกรรมที่สามารถตอบโจทย์ความท้าทายของโลกยุคใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กองบรรณาธิการขอขอบคุณผู้เขียนบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ คณะกรรมการที่ปรึกษา และผู้อ่านทุกท่าน ที่ได้มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและพัฒนาวารสารอย่างต่อเนื่อง ความร่วมมือและความทุ่มเทของทุกภาคส่วนถือเป็นพลังสำคัญที่ช่วยยกระดับคุณภาพและมาตรฐานของวารสารให้เป็นที่ยอมรับในวิชาการ

สุดท้ายนี้ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่า บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทั้งในด้านวิชาการ การวิจัย และการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ อีกทั้งจะเป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมการสร้างองค์ความรู้ใหม่ การพัฒนานวัตกรรม และการขับเคลื่อนสังคมสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อไป



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุทฤต ปานชลธิ

บรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
1. EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND PH FOR THERMAL EFFICIENCY IN BIOGAS PRODUCTS FROM FOOD WASTE VIA ANAEROBIC DIGESTION METHOD <i>Thanyamai Samhirun, Apichart Thammajarn, Kittinut Kaewthong Natthawat Wisaiprom</i>	1-17
2 FUTURE SCENARIOS AND FORESIGHTS OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR ASTRONOMY AND SPACE LEARNING CENTERS IN THAILAND <i>Chaloemchon Wannathong Rachada Boonkaew Vichit Rangpan</i>	18-30
3 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน: กรณีศึกษาโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ <i>อริศโนชา เพ็ญหนู เสรีย์ ตู๊ประกาย กฤษดา พิศลยบุตร อนุวัต เจริญสุข นันทน์ภัสร์ อินย์มวัฒนา จันทะโคตร</i>	31-47
4 การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากเครื่องวัดแสงที่ได้มาตรฐานและที่ได้จากแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ กรณีศึกษาในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา <i>ณัฐพงศ์ ม้าเทศ ฤทธิ์ติกร สมปาน พรรณวดี สิงห์แก้ว</i>	48-60
5 การศึกษาอัตราส่วนตัวประสานมันสำปะหลังที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกะลามะพร้าว <i>ยุทธชัย จารุจิตร ตั้งเฮง ยนต์สถิตย์กุล</i>	61-71
6 การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 ของประเทศไทย <i>จตุรนต์ กันทะธง พรรณวดี สิงห์แก้ว ฤทธิ์ติกร สมปาน ณัฐพงศ์ ม้าเทศ</i>	72-85
7 การประเมินและการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ระดับองค์กรเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์: กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร <i>ศุภกร สุวรรณพันธ์ กวินเวทย์ พิพิธนาชนยธร วรรณลักษณ์ อภินาวิน ธัญลักษณ์ สุภาเนตร</i>	86-99
8 การวิเคราะห์เชิงออกแบบการจัดวางแผงโซลาร์เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบขึ้นรูปสำหรับติดตั้งบนตัวถังรถพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2027 <i>ศรายุทธ โรหิตเสถียร วรงค์ จิวเรือง ทศพล สีน้าเงิน</i>	100-109

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)

หน้า

- 9 การพัฒนาระบบควบคุมความเร็วพัดลมคอยล์ร้อนอัตโนมัติร่วมกับการลดอุณหภูมิท่อทางออกคอมเพรสเซอร์ด้วยน้ำทิ้งจากคอยล์เย็น
สงกรานต์ ภารกุล กำจัด ใจตรง ฉัตรชัย เขียวหิรัญ ณพวัฒน์ ทองพันชั่ง 110-118
- 10 การดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนแบบเปิดสำหรับลดการปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อม
ไพฑูรย์ เหล่าดี นำพร ปัญญาใหญ่ ศรีธร อุปคำ ธนวรรณ วัชรดำรงศักดิ์ 119-129
- 11 การเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้าของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกฐ
ชนะโรจน์ พงศ์กิตติอิรา 130-141

บทความวิชาการ

- 12 การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบของเทคโนโลยีด้านพลังงานเพื่อการลดก๊าซเรือนกระจกและความเป็นกลางทางคาร์บอนในประเทศไทย
มณี คิ้วเจริญ เสรีย์ ตู่ประกาย ชญานิษฐ์ วิทยากรมย์ 142-150

EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND PH FOR THERMAL EFFICIENCY IN BIOGAS PRODUCTS FROM FOOD WASTE VIA ANAEROBIC DIGESTION METHOD

Thanyamai Samhirun, Apichart Thammajarn , Kittinut Kaewthong and Natthawat Wisaiprom*

*Energy, Environment, Safety, and Health Center, King Mongkut's University of Technology Thonburi
126 Pracha Uthit Road, Bang Mod Subdistrict, Thung Khru District, Bangkok 10140, Thailand*

*Corresponding author E-mail: Natthawat.wisai@kmutt.ac.th

Received: April 9, 2026 Revised: June 18, 2026 Accepted: June 26, 2026

Abstract

This study explores the influence of hydraulic retention time (HRT) and pH on the efficiency of biogas production and methane (CH₄) concentration in anaerobic digestion systems. Findings indicate that extending HRT enhances biogas output and improves methane purity, while simultaneously reducing levels of carbon dioxide (CO₂), oxygen (O₂), and nitrogen (N₂), reflecting more effective methanogenic activity. As HRT increases from 10 to 30 days, biogas yield improves from 0.6 to 1.0 m³/kg.VS, and CH₄ concentration rises from 54.71% to 65.92%. The decline in CO₂ content from 37.89% to 31.38% further supports the development of more stable anaerobic conditions. Despite these benefits, extended HRTs require larger digester capacities and raise operational expenses, underlining the necessity of identifying an economically viable operational window. At an HRT of 30 days, pH variation shows that methane levels grow from 63.78% at pH 6.0 to a peak of 73.46% at pH 9.0, with optimal methanogenesis observed between pH 7.0 and 8.5. The study also observes significant reductions in chemical oxygen demand (COD) within the first 10 days, indicating rapid breakdown of organic substrates. Alkaline conditions appear to mitigate the inhibitory effects of volatile fatty acids, thereby enhancing methane quality, calorific value, and thermal efficiency. Overall, the result showed that emphasize the critical role of fine-tuning both HRT and pH to maximize biogas yield, improve energy recovery, and promote more sustainable anaerobic digestion system performance.

Keyword: Biogas, Thermal efficiency, Food waste, Anaerobic Digestion

1. Introduction

The increasing reliance on fossil fuels and the escalating effects of climate change have driven a global shift toward sustainable energy alternatives. Among these, biogas production via anaerobic digestion (AD) has garnered significant attention as a renewable energy technology. Anaerobic digestion involves the microbial breakdown of organic materials in the absence of oxygen, resulting in the production of biogas, which is primarily composed of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) [1]. Food waste, which is rich in biodegradable organic content, is considered a highly suitable feedstock for AD due to its abundance and potential to address both energy production and waste management challenges simultaneously [2], [3]. Despite its promise, optimizing methane

production and ensuring thermal efficiency in AD systems remain critical for maximizing the viability of this technology. Methane yield, a key indicator of AD performance, is influenced by substrate characteristics, microbial community dynamics, and operational parameters [4]. For instance, the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is a critical factor in maintaining microbial activity and process stability. Imbalanced C/N ratios can lead to ammonia inhibition or nutrient limitations, both of which can compromise methane production [5]. Additionally, the presence of inhibitory substances, such as heavy metals or volatile fatty acids, can disrupt microbial metabolism, necessitating proper feedstock selection and preparation [6].

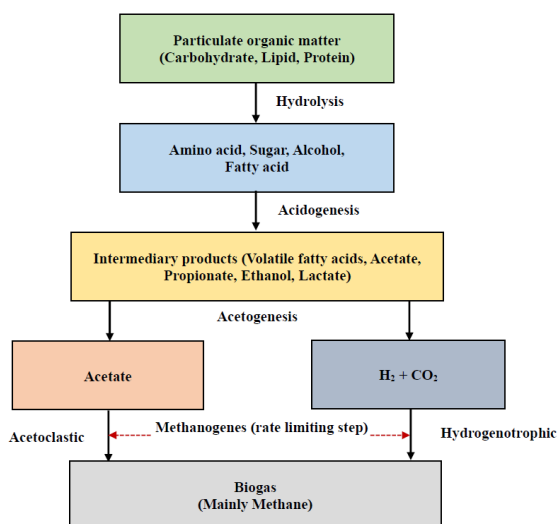


Figure 1. Biogas production process [17-20]

Pre-treatment technologies have been widely studied to enhance the biodegradability of organic materials and improve methane yields. Methods such as thermal treatment, chemical addition, mechanical disintegration, and enzymatic hydrolysis have been shown to break down complex organic polymers into simpler, more accessible compounds for microbial digestion [7], [8]. These approaches not only enhance substrate bioavailability but also accelerate the hydrolysis stage, which is often a rate-limiting step in AD. Operational parameters such as temperature, pH, and hydraulic retention time (HRT) also play pivotal roles in determining methane yields. Mesophilic (30–40°C) and thermophilic (50–60°C) temperature ranges support distinct microbial communities, each with specific metabolic capacities and stability characteristics [9]. Maintaining optimal pH levels between 6.8 and 7.2 is essential for methanogenic activity, while appropriate HRT ensures sufficient time for the complete digestion of organic materials [10].

Thermal efficiency, another crucial aspect of biogas systems, involves maximizing the energy recovery and utilization from both biogas and digestate. The use of heat recovery systems, such as combined heat and power (CHP) units, [21-23] can significantly improve the energy balance of AD facilities by capturing waste heat for internal process use or external applications [11]. Co-digestion, where food waste is processed alongside other organic materials such as livestock manure or agricultural residues, has emerged as a practical approach to improve system efficiency. This strategy not only provides a more balanced nutrient profile for microorganisms but also enhances methane yields through synergistic effects between different substrates [12], [13].

The integration of advanced technologies and a deeper understanding of these influencing factors have the potential to overcome existing limitations in AD systems. By optimizing methane enhancement and thermal efficiency, biogas production can be transformed into a more reliable and scalable energy solution. [24-28] This paper aims to explore the critical factors affecting methane yield and thermal efficiency in AD processes, with a focus on recent advancements in technology and best practices for food waste utilization. [29-32] Fig.1. illustrates the biological breakdown of organic waste through a four-stage process known as anaerobic digestion, which ultimately converts complex organic matter into methane rich biogas. This sustainable biochemical pathway relies on a sequence of distinct microbial groups. The process begins with Hydrolysis, the initial stage where complex particulate organic matter consisting of macromolecules like carbohydrates, lipids, and proteins is broken down by extracellular enzymes. This step liquefies and dissolves the large polymers into smaller, soluble monomers, specifically amino acids, sugars, alcohols, and fatty acids. Once these soluble compounds are formed, they enter the second stage, Acidogenesis. During this fermentative phase, acid-forming bacteria metabolize the monomers to produce a variety of intermediary products. These intermediaries primarily consist of volatile fatty acids (VFAs), along with acetate, propionate, ethanol, and lactate. In the third stage, Acetogenesis, these intermediary products are further digested by acetogenic bacteria. This step is crucial as it refines the volatile fatty acids into compounds that can be directly utilized by the final group of microorganisms. The acetogenesis stage splits the metabolic pathway into two primary precursors: acetate on one side, and a mixture of hydrogen gas and carbon dioxide) on the other. The final and most critical phase of the flowchart is Methanogenesis, which is explicitly highlighted as the rate-limiting step of the entire anaerobic digestion process. During this stage, strictly anaerobic archaea called methanogens convert the preceding biochemical products into the final output. This occurs via two distinct microbial pathways: the Acetolactic pathway, which utilizes the acetate, and the Hydrogenotrophic pathway, which utilizes the mixture. The culmination of these synchronized pathways results in the generation of biogas, a renewable energy source composed mainly of methane.

Table 1. Composition of biogas.

Component	Typical Composition (%)	Description	Ref.
Methane (CH ₄)	50–75%	Primary energy carrier: flammable and odorless	[14,15]
Carbon Dioxide (CO ₂)	25–50%	Non-flammable gas: reduces the calorific value of biogas	[14,16]
Water Vapor (H ₂ O)	0–10%	Present due to the wet digestion process	[15,16]
Hydrogen Sulfide (H ₂ S)	0.1–3%	Toxic and corrosive: needs removal for energy applications	[14,16]
Nitrogen (N ₂)	0–5%	Non-reactive and inert: may dilute the gas	[14,15]
Oxygen (O ₂)	0–1%	Trace amounts: can affect combustion efficiency	[16]
Hydrogen (H ₂)	0–1%	Adds minimal energy value but rarely present in high amounts	[15]
Ammonia (NH ₃)	Trace	Typically negligible but may contribute to odor	[14,16]

For Table 1. outlines the typical chemical composition of biogas, detailing the primary gases, secondary impurities, and trace elements that form this renewable energy source. Understanding these components is essential, as the practical utility and heating value of biogas depend heavily on the balance between its energy-yielding gases and its problematic impurities. The foundational value of biogas lies in its highest concentration component, Methane (CH_4), which makes up 50–75% of the total mixture. As a flammable and odorless gas, methane serves as the primary energy carrier of biogas. Conversely, the second largest component is Carbon Dioxide (CO_2), accounting for 25–50% of the volume. Unlike methane, carbon dioxide is non-flammable and acts as a diluent that reduces the overall calorific (heating) value of the gas.

Beyond these two main bulk gases, biogas contains secondary components and impurities introduced during the biological breakdown process. Water Vapor (H_2O) is found at levels of 0–10%, which naturally occurs due to the wet nature of the anaerobic digestion process. A more critical impurity is Hydrogen Sulfide (H_2S), which ranges from 0.1–3%. Despite its relatively small percentage, H_2S is highly toxic and corrosive, requiring strict removal before the biogas can be safely used in energy applications. Nitrogen (N_2) is also present at 0–5% as a non-reactive, inert gas that can further dilute the gas mixture. Finally, the table lists several elements that appear only in minor or trace quantities. Both Oxygen (O_2) and Hydrogen (H_2) are typically restricted to 0–1% of the total composition; oxygen can negatively affect combustion efficiency, while hydrogen contributes a minimal energy value but rarely accumulates in high amounts. Lastly, Ammonia (NH_3) exists in mere trace levels; while its volume is typically negligible, it is noted for its potential contribution to the overall odor of the biogas. For objective of research is investigate the effects of hydraulic retention time (HRT) on biogas production, biogas composition, and chemical oxygen demand (COD) removal efficiency during the anaerobic digestion of food waste., Evaluate the effects of pH on biogas quality, particularly methane (CH_4) concentration, heating value, and thermal efficiency in the biogas production process. And determine the optimal operating conditions of HRT and pH for maximizing biogas production, methane quality, COD removal efficiency, and energy recovery from food waste through anaerobic digestion. This study differs from previous research by simultaneously evaluating the effects of hydraulic retention time (HRT) and pH on biogas production, methane concentration, COD removal, heating value, and thermal efficiency using food waste as the sole substrate. The results showed that increasing HRT from 10 to 30 days enhanced biogas yield from 0.6 to 1.0 m^3/kg VS and increased methane concentration from 54.71% to 65.92%, while achieving COD removal efficiencies of 72.0–73.6%. Furthermore, increasing pH from 6.0 to 9.0 improved methane concentration to 73.46%, resulting in a higher heating value (1,780.25 kJ/kg) and maximum thermal efficiency (64.35%). Unlike many previous studies that focus primarily on methane yield, this research integrates waste treatment performance, biogas quality, and energy efficiency into a single evaluation framework. These findings provide a comprehensive approach for optimizing anaerobic digestion systems and maximizing renewable energy recovery from food waste.

2. Experimental setup

2.1 Biogas digester using anaerobic system

A biogas digester using the anaerobic method is a system that converts organic waste into biogas through microbial activity in the absence of oxygen. The process consists of four main stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. During hydrolysis, complex organic compounds such as carbohydrates, proteins, and fats break down into simpler molecules. Acidogenesis further converts these molecules into volatile fatty acids, hydrogen (H_2), and carbon dioxide (CO_2). Acetogenesis transforms these acids into acetic acid, CO_2 , and H_2 . Finally, methanogenesis occurs, where methanogenic archaea convert acetic acid and hydrogen into methane (CH_4) and CO_2 , the primary components of biogas. The result showed that biogas can be used as an energy source for cooking, heating, and electricity generation. The efficiency of the process depends on temperature, pH, carbon-to-nitrogen ratio (C/N), and organic loading rate. This sustainable technology reduces greenhouse gas emissions and provides a renewable energy source while managing organic waste effectively.

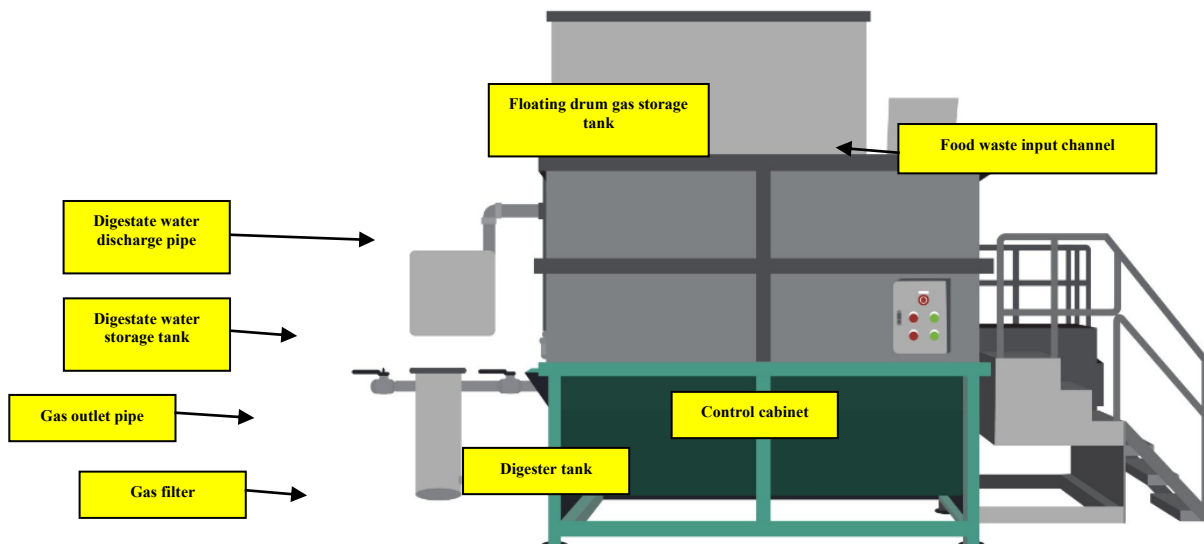


Figure 2. Biogas Digester using Anaerobic method

For figure 2 is the biogas digester operates based on the anaerobic digestion process, which involves the breakdown of organic matter such as food waste by microorganisms in the absence of oxygen. The key steps are as follows: Food Waste Input: Organic waste is introduced through the food waste input channel into the digester tank. This tank provides an oxygen-free environment essential for anaerobic microorganisms to thrive. Anaerobic Digestion: Inside the digester tank, microorganisms decompose the organic material. This process occurs in several stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. As a result, biogas mainly composed of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2) is produced. Biogas Collection: The produced gas rises and is collected in the floating drum gas storage tank, which moves up and down depending on the amount of gas stored. Gas Outlet and Filtering: The biogas flows out through the gas outlet pipe and passes through a gas filter to remove impurities like hydrogen

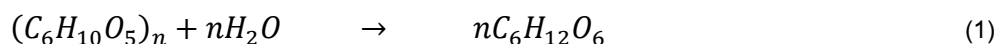
sulfide, making it cleaner and safer for use as an energy source. Digestate Management: The remaining slurry, called digestate, contains nutrients and can be used as a bio-fertilizer. The digestate water flows into the digestate water storage tank through the digestate water discharge pipe for further handling or use. System Control: The control cabinet manages the operation of the digester system, ensuring optimal temperature, pressure, and mixing conditions for efficient biogas production.

2.2 Anaerobic Digestion Process [33-41]

The production of biogas occurs in four main stages:

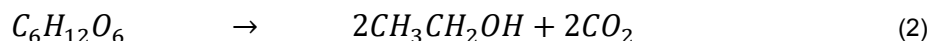
Hydrolysis

The carbohydrates, proteins, and fats in organic materials (e.g., animal manure, and food waste) are broken down by enzymes produced by microorganisms into simpler molecules. Example reaction:



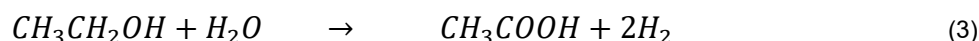
Acidogenesis (Formation of organic acids)

Acidogenic bacteria convert the organic compounds produced during hydrolysis into volatile fatty acids (VFAs), alcohols, hydrogen (H_2), and carbon dioxide (CO_2). Example reaction:



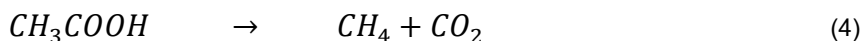
Acetogenesis (Conversion into Acetate)

Volatile fatty acids (VFAs) and alcohols are further broken down into acetic acid (CH_3COOH), hydrogen (H_2), and carbon dioxide (CO_2). Example reaction:

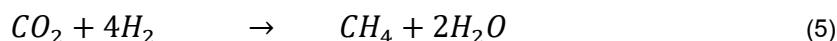


Methanogenesis (Production of methane)

Methanogenic archaea convert acetic acid (CH_3COOH), hydrogen (H_2), and carbon dioxide (CO_2) into methane (CH_4). Example reactions:



Acetic acid is converted into methane and carbon dioxide. Or



Hydrogen and carbon dioxide are converted into methane and water.

2.3 Preparation experimental

As the hydraulic retention time (HRT) increases from 10 to 30 days, biogas production efficiency improves significantly. At HRT 10 days, microbial activity is limited, leading to lower methane yield and reduced biogas quality. Extending HRT to 20 days enhances the digestion process, allowing methanogenic bacteria to convert more organic matter into methane, resulting in higher biogas volume and energy content. At HRT 30 days, the system reaches optimal conditions, maximizing methane production and thermal efficiency. Longer retention times provide sufficient time for complete anaerobic digestion, improving overall biogas yield and quality. However, excessively long HRTs may reduce system efficiency due to substrate depletion and operational constraints. Therefore, balancing HRT is essential for optimizing biogas production performance.

2.4 Thermal efficiency of biogas [42-47]

The thermal efficiency of biogas from food waste depends on multiple factors, including the composition of the biogas, the efficiency of the combustion system, and the type of engine or burner used. Here are some key points:

1. Biogas Composition

- Biogas from food waste typically consists of 50–70% methane (CH₄), 30–50% carbon dioxide (CO₂), and small amounts of other gases (e.g., H₂S, H₂O).
- The higher the methane content, the higher the energy value of the biogas.

2. Energy Content

- The energy content of pure methane is ≈ 55.5 MJ/kg or ≈ 39.8 MJ/m³.
- Biogas with 60% methane typically has an energy value of ≈ 22 –24 MJ/m³.

3. Thermal Efficiency in Different Systems

- Biogas burners (direct heat applications): 55–85% efficiency
- Gas engines (electricity generation): 30–40% efficiency
- Combined heat and power (CHP) systems: 60–90% efficiency (total heat + electricity output)
- Fuel cells: Can reach 50–60% efficiency

The thermal efficiency of gas derived from food waste is an important parameter to evaluate its potential as an alternative energy source. It is determined by the amount of energy released during combustion relative to the energy input. The key parameters influencing thermal efficiency include the calorific value of the gas, combustion efficiency, and heat transfer efficiency in the utilization system.

The thermal efficiency (η) of the system can be expressed as:

$$\eta = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{input}}} \times 100 \quad (6)$$

Where:

Q_{useful} is useful heat energy output (Joules or kcal)

Q_{input} is total energy input from the gas (Joules or kcal)

For biogas combustion, the thermal efficiency of a burner or engine can also be estimated using:

$$\eta = \frac{mC_p\Delta T}{LHV \times m_{\text{fuel}}} \times 100 \quad (7)$$

Where:

M is mass flow rate of the working fluid (kg/s)

C_p is specific heat capacity of the fluid (J/kg·K)

ΔT is temperature change of the fluid (K)

LHV is calorific value of the gas (J/kg or J/m³)

m_{fuel} is mass flow rate of the fuel (kg/s)

In practice, thermal losses occur due to incomplete combustion, heat dissipation, and system inefficiencies. Enhancing gas purity (reducing CO₂ and moisture content) and optimizing combustion conditions can improve efficiency. This study investigated the effects of hydraulic retention time (HRT) and pH on biogas production, methane concentration, and thermal efficiency using a food-waste anaerobic digestion system. Food waste was used as the substrate and fed into a laboratory-scale anaerobic biogas digester operating under oxygen-free conditions. The anaerobic digestion process involved four biological stages: hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis, during which organic matter was converted into biogas consisting mainly of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). To evaluate the effect of retention time, the digester was operated at HRTs of 10, 20, and 30 days. Biogas production, gas composition (CH₄, CO₂, O₂, and N₂), and chemical oxygen demand (COD) were measured to assess digestion performance and organic matter degradation. The influence of pH on biogas quality was also investigated by adjusting the digestion conditions and monitoring changes in methane concentration and energy content. The thermal performance of the produced biogas was evaluated using calorific value and thermal efficiency calculations. Thermal efficiency was determined from the ratio of useful heat output to total energy input, considering the methane content and heating value of the biogas. The relationships among HRT, pH, methane production, COD removal, and thermal efficiency were analyzed to identify the optimal operating conditions for maximizing biogas yield, improving gas quality, and enhancing energy recovery from food waste.

3. Results and discussion

3.1 Effect of hydraulic retention time (HRT) on biogas production

The study investigates the effect of hydraulic retention time (HRT) on biogas production and its composition. HRT is a crucial parameter in anaerobic digestion, representing the average time that organic material remains in the digester before being converted into biogas. The efficiency of biogas production is highly dependent on the duration of HRT, as it directly affects the breakdown of volatile solids (VS) and the activity of methanogenic bacteria responsible for methane (CH₄) generation. According to the experimental data presented, an increase in HRT leads to a significant improvement in both the volume of biogas produced and its methane content. At an HRT of 10 days, the biogas yield is 0.6 m³/kg.VS, with a methane concentration of 54.71%. When the retention time is extended to 20 days, the biogas yield increases to 0.8 m³/kg.VS, and the methane concentration rises to 60.95%. At 30 days HRT, the biogas yield reaches its peak at 1.0 m³/kg.VS, with the highest methane content of 65.92%. This trend clearly indicates that a longer retention time enhances the anaerobic digestion process, allowing more complete degradation of organic matter and an improved conversion rate into methane. Furthermore, the

concentration of carbon dioxide (CO_2) in the biogas gradually decreases as the HRT increases. At 10 days, the CO_2 concentration is 37.89%, which drops to 35.89% at 20 days and further reduces to 31.38% at 30 days. This decline in CO_2 suggests a higher efficiency of methanogenesis, where organic acids and intermediates are more effectively converted into methane rather than accumulating as carbon dioxide. This improvement in methane-to-carbon dioxide ratio results in a higher-quality biogas with better combustion characteristics.

Table 2. Effect of hydraulic retention time (HRT) on biogas production

Hydraulic retention time (day)	Biogas volume ($\text{m}^3/\text{kg.VS}$)	%Volume concentration			
		% CH_4	% CO_2	% O_2	% N_2
10	0.6	54.71	37.89	0.97	6.43
20	0.8	60.95	35.89	0.94	2.22
30	1.0	65.92	31.38	0.85	1.85

Another important observation from the data is the reduction in oxygen (O_2) and nitrogen (N_2) concentrations with increasing HRT. At 10 days, oxygen concentration is 0.97%, and nitrogen is 6.43%. These values drop to 0.94% and 2.22% at 20 days, respectively, and further decline to 0.85% and 1.85% at 30 days. The decreasing levels of oxygen and nitrogen indicate a more controlled anaerobic environment, minimizing external air intrusion into the digester. This is critical for maintaining an optimal anaerobic condition, as excessive oxygen presence can inhibit methanogenic activity and lead to inefficient biogas production. The result showed that confirm that increasing HRT enhances biogas yield and methane concentration while reducing undesirable gases such as CO_2 , O_2 , and N_2 . The reason behind this is that longer retention times allow methanogenic bacteria to fully utilize the available organic substrates, completing the biochemical degradation processes necessary for maximum methane production. However, while a longer HRT improves biogas quality and quantity, practical considerations such as digester size, operational costs, and substrate availability must be taken into account when optimizing the retention time for large-scale applications. From an engineering perspective, an HRT of 30 days appears to be the most effective for maximizing biogas production while maintaining a high methane content. However, this may not always be economically feasible, as longer retention times require larger digestion tanks, increased capital investment, and potentially higher maintenance costs. In practical biogas plant operations, a balance must be found between achieving high methane yields and maintaining cost-effective and space-efficient digester systems. In conclusion, this study demonstrates that hydraulic retention time plays a vital role in optimizing biogas production. Longer retention times improve methane yield, decrease carbon dioxide levels, and create a more stable anaerobic environment, ultimately enhancing the efficiency and sustainability of anaerobic digestion processes. However, the ideal HRT should be selected based on specific project constraints, ensuring an optimal trade-off between biogas yield, system efficiency, and economic feasibility.

3.2 Effect of pH on biogas production

Table 3. Effect of pH on biogas production at HRT 30 day at 1.0 biogas volume (m³/kg.VS)

pH	Biogas volume (m ³ /kg.VS)	Methane content (%)
6.0	1.0	63.78
7.0	1.0	66.32
8.0	1.0	70.59
9.0	1.0	73.46

The experiment investigates the effect of pH on biogas production, focusing on both biogas volume and methane content under a hydraulic retention time (HRT) of 30 days. The result showed that the biogas volume remains constant at 1.0 m³/kg.VS across all tested pH levels (6.0, 7.0, 8.0, and 9.0), while the methane content progressively increases from 63.78% at pH 6.0 to 73.46% at pH 9.0. These findings provide insight into the role of pH in the anaerobic digestion process and methane production. Biogas production is a multi-stage biological process involving hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis, and methanogenesis. Each stage is carried out by different microbial communities that thrive in specific pH ranges. Hydrolysis and acidogenesis, the initial stages of anaerobic digestion, are typically more active under slightly acidic conditions (pH 5.5–6.5), where hydrolytic and acidogenic bacteria break down complex organic matter into simpler organic acids. However, the final stage, methanogenesis, where methane-producing archaea convert intermediates into methane and carbon dioxide, occurs optimally in neutral to slightly alkaline conditions (pH 7.0–9.0). The experimental results indicate that the total biogas volume is not significantly affected within the pH range of 6.0 to 9.0, suggesting that the anaerobic digestion process remains stable across these conditions. However, the methane content shows a clear increasing trend with higher pH values. This observation suggests that methanogenic activity is more efficient under alkaline conditions. At lower pH levels, the accumulation of volatile fatty acids (VFAs) may inhibit methanogenesis, leading to lower methane yields. As the pH increases towards the alkaline range, methanogens become more active and efficient in converting intermediate organic compounds into methane, resulting in higher methane content in the biogas. The increase in methane content from 63.78% at pH 6.0 to 73.46% at pH 9.0 implies that slightly alkaline conditions favor methane production, enhancing the quality of the biogas. This is consistent with previous studies indicating that methanogenic archaea prefer neutral to slightly alkaline conditions and that pH imbalances can significantly impact methane yield. The improvement in methane content at higher pH levels suggests that buffering the pH towards alkalinity could be beneficial for optimizing biogas production, particularly in systems where methane quality is a priority. From a practical perspective, maintaining an optimal pH range is crucial for efficient biogas production. While the total biogas yield remains unchanged, a higher methane content enhances the energy value of the biogas, making it a more efficient fuel source. In industrial applications, controlling pH through buffering agents, such as sodium bicarbonate or lime, can help stabilize the anaerobic digestion process and maximize methane production.

However, excessively high pH levels beyond the tested range might start inhibiting microbial activity, which requires careful monitoring. Overall, the findings confirm the importance of pH regulation in anaerobic digestion. While biogas production remains stable across a wide pH range, methane production is significantly influenced by pH, with higher values favoring methanogenic activity. These results reinforce the theoretical understanding that methanogenesis is optimized under slightly alkaline conditions, highlighting the need for proper pH control in biogas systems to enhance methane yield and improve energy efficiency.

3.3 Effect of Chemical oxygen demand (COD) with HRT of biogas production

As shown in Figure 3, the chemical oxygen demand (COD) concentration was high during the initial stage of fermentation, with a value of 8.0×10^3 mg/L at an HRT of 1 day, increasing to a maximum of 8.5×10^3 mg/L at an HRT of 5 days. This indicates the presence of a large amount of biodegradable organic matter in the biogas production system. Thereafter, the COD concentration decreased markedly with increasing fermentation time, reaching values between 2.24 and 2.34×10^3 mg/L at HRTs of 10–30 days. This trend demonstrates the effective degradation of organic matter by anaerobic microorganisms during the digestion process.

The COD removal efficiency was further evaluated based on the observed data. The COD concentration decreased from 8.5×10^3 mg/L to an average value of 2.29×10^3 mg/L, corresponding to a COD removal efficiency of approximately 73.1%. Similarly, when comparing the initial COD concentration at day 1 (8.0×10^3 mg/L) with the minimum COD value recorded (2.24×10^3 mg/L), the COD removal efficiency was calculated to be 72.0%. Therefore, the overall COD removal efficiency of the biogas production system ranged from 72.0% to 73.6%, indicating a high level of treatment performance and demonstrating the effectiveness of anaerobic digestion in reducing the organic load within the system. The substantial reduction in COD observed between HRTs of 5 and 10 days suggests that this period represents the most active phase of microbial degradation. During this stage, readily biodegradable organic compounds were intensively consumed by anaerobic microorganisms and converted into intermediate products and biogas. After an HRT of 10 days, the COD concentration remained relatively stable, indicating that the system had reached a steady-state condition and that most of the remaining organic matter was less biodegradable. These findings suggest that an HRT of at least 10 days is sufficient for effective organic matter degradation and stable biogas production. At this retention time, more than 70% of the initial COD was removed, and the digestion system achieved operational stability. Extending the HRT beyond 10 days resulted in only minor additional reductions in COD, implying that longer retention times may not provide significant benefits in terms of treatment efficiency or economic feasibility.

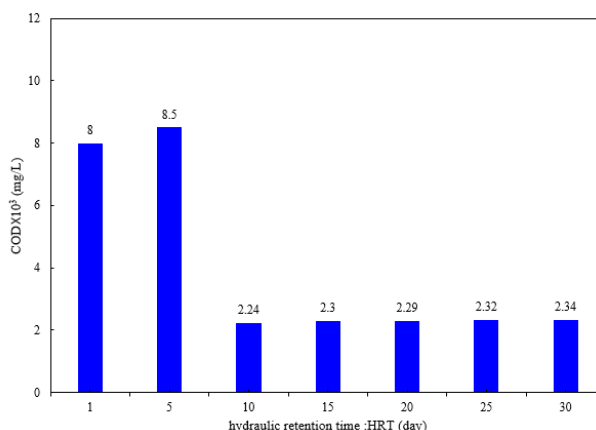


Figure 3. COD value with with HRT of biogas production

3.4 Thermal efficiency of biogas

The test to determine the heating value and thermal efficiency of the produced biogas was conducted using the heating value and thermal efficiency of the produced biogas were evaluated using the Boiling Water Test (BWT) method. The recorded values were then used for calculations, including the initial and boiling water temperatures, as well as the initial and final water volumes. These data were applied in the equation (7) to calculate the heating value and thermal efficiency of the biogas. From the equation, the average heating value of the biogas was determined, as shown in Table 4.

Table 4. Thermal efficiency of biogas at HRT 30 day at 1.0 biogas volume ($\text{m}^3/\text{kg.VS}$)

pH	Methane content (%)	Heating value (kJ/kg)	η (%)
6.0	63.78	1,150.25	46.5
7.0	66.32	1,287.34	52.17
8.0	70.59	1,457.60	59.31
9.0	73.46	1,780.25	64.35

The table presents the thermal efficiency of biogas production at a hydraulic retention time (HRT) of 30 days under different pH conditions, with a fixed biogas production volume of $1.0 \text{ m}^3/\text{kg.VS}$. Key parameters measured include methane content, heating value, and thermal efficiency (η). The result showed that, it is evident that as the pH increases from 6.0 to 9.0, the methane content of the biogas also increases, ranging from 63.78% at pH 6.0 to 73.46% at pH 9.0. This trend directly influences the heating value, which rises from 1,150.25 kJ/kg to 1,780.25 kJ/kg. Consequently, the thermal efficiency improves significantly, reaching the highest value of 64.35% at pH 9.0. These results align with the principles of anaerobic digestion, where pH plays a critical role in microbial activity. Methanogenic bacteria, responsible for methane production, thrive in a slightly alkaline environment, typically between pH 6.8 and 8.5. As the

pH moves toward the upper end of this range, methane-producing microbes become more active, leading to increased methane concentration and energy output. In summary, the data suggest that controlling the pH toward the alkaline range, particularly around pH 8.0 - 9.0, enhances the quality of biogas by increasing its methane content and thermal efficiency. This highlights the importance of pH management in optimizing biogas production systems.

4. Conclusion

The results demonstrated that both hydraulic retention time (HRT) and pH significantly influenced biogas composition, methane concentration, and overall biogas quality. Increasing HRT from 10 to 30 days enhanced biogas production from 0.6 to 1.0 m³/kg VS, while methane concentration increased from 54.71% to 65.92%. Concurrently, carbon dioxide concentration decreased from 37.89% to 31.38%, indicating a more efficient methanogenesis process and improved conversion of organic matter into methane. The reduction in oxygen and nitrogen concentrations further confirmed the establishment of stable anaerobic conditions within the digester, minimizing air intrusion and promoting the activity of methanogenic microorganisms. The COD analysis supported these findings, showing that organic matter degradation occurred primarily during the first 10 days of digestion. COD concentrations decreased from 8.0–8.5 × 10³ mg/L to approximately 2.24–2.34 × 10³ mg/L, corresponding to a removal efficiency of 72.0–73.6%. The stabilization of COD after 10 days the result showed that most readily biodegradable organic compounds had been consumed and converted into biogas. Consequently, an HRT of at least 10 days was necessary to achieve effective substrate degradation and stable methane production. The effect of pH on biogas quality was also pronounced. Although the biogas yield remained constant at 1.0 m³/kg VS at an HRT of 30 days, methane concentration increased substantially from 63.78% at pH 6.0 to 73.46% at pH 9.0. This improvement was accompanied by an increase in heating value from 1,150.25 kJ/kg to 1,780.25 kJ/kg and a maximum thermal efficiency of 64.35% at pH 9.0. The enhanced methane production under alkaline conditions can be attributed to the favorable environment for methanogenic archaea and the reduced inhibitory effects of volatile fatty acids (VFAs).

Overall, the highest biogas quality was achieved at an HRT of 30 days and pH 9.0, yielding a methane concentration of 73.46%, a heating value of 1,780.25 kJ/kg, and a thermal efficiency of 64.35%. These results indicate that methane concentration is a key indicator of biogas quality, directly affecting its energy content and thermal performance. Therefore, maintaining an appropriate HRT and controlling pH within the slightly alkaline range (8.0–9.0) are critical factors for maximizing methane production, improving biogas quality, and enhancing the overall efficiency of anaerobic digestion systems.

5. Acknowledgment

Thank you Energy Environment Safety and Health Center (EESH) , King Mongkut's University of Technology Thonburi for supporting the budget and tools for research operations. Thank you to the Joint Graduate School of Energy and Environment Testing Laboratory, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bang Khun Thian Campus, for supporting the tools for analysis and testing.

6. Consent to Participate, and Consent to Publish

Ethics, Consent to Participate, and Consent to Publish declarations

7. References

- [1] Karthikeyan, O. P., & Heimann, K. (2019). Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants. *Energy for Sustainable Development*, 52, 69–79.
- [2] Wang, X., Yang, G., Feng, Y., Ren, G., & Han, X. (2012). Optimizing the efficiency of biogas production from anaerobic digestion of food waste: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5633–5642.
- [3] Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 3, 117–129.
- [4] Browne, J. D., & Murphy, J. D. (2013). The impact of increasing organic loading in two-phase digestion of food waste. *Waste Management*, 33(12), 2390–2398.
- [5] Monlau, F., Sambusiti, C., Barakat, A., et al. (2012). New opportunities for agricultural and agro-industrial residues in anaerobic digestion: Highlights and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4396–4405.
- [6] Rao, P. V., Baral, S. S., Dey, R., & Mutnuri, S. (2010). Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2086–2094.
- [7] Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478–5484.
- [8] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., & Peces, M. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427.
- [9] Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 821–826.
- [10] Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C., & Cecchi, F. (2006). Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and OFMSW: The experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). *Water Science and Technology*, 53(8), 203–211.
- [11] Kleerebezem, R., & van Loosdrecht, M. C. (2007). Mixed culture biotechnology for bioenergy production. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 207–212.
- [12] Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, 102(3), 2255–2264.
- [13] Silvestre, G., Fernández, B., & Bonmatí, A. (2015). Significance of co-digestion to enhance anaerobic biodegradability of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 14, 649–663.
- [14] Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B., & Esbensen, K. H. (2011). Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3141–3155.

- [15] Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109(1-3), 95–105.
- [16] Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860.
- [17] Li, J., Xu, X., Chen, C., Xu, L., Du, Z., Gu, L., Xiang, P., Shi, D., Huangfu, X., Liu, F., 2023a. Conductive materials enhance microbial salt-tolerance in anaerobic digestion of food waste: microbial response and metagenomics analysis. *Environ. Res.* 227, 115779.
- [18] Hung, C.-Y., Tsai, W.-T., Chen, J.-W., Lin, Y.-Q., Chang, Y.-M., 2017. Characterization of biochar prepared from biogas digestate. *Waste Manag.* 66, 53–60.
- [19] Du, J., Tian, C., Xiao, J., Liu, Y., Zhang, F., Gao, X., Xing, B., Zhao, Y., 2024. Co-fermentation of titanium-flocculated-sludge with food waste towards simultaneous water purification and resource recovery. *Water Res.* 251, 121110.
- [20] Deng, L., Zhao, Y., Sun, S., Feng, D., Zhang, W., 2023. Thermochemical method for controlling pore structure to enhance hydrogen storage capacity of biochar. *Int. J. Hydrogen Energy* 48 (57), 21799–21813.
- [21] Lyu, F., Zhang, H., Shao, L., He, P., 2017. Problems and Countermeasures of Anaerobic Digestion Process of Food Waste Based on Material Flow Analysis. *Environmental Sanitation Engineering*. 25 (01), 1–9. In Chinese.
- [22] Nordahl, S.L., Devkota, J.P., Amirebrahimi, J., Smith, S.J., Breunig, H.M., Preble, C.V., Satchwell, A.J., Jin, L., Brown, N.J., Kirchstetter, T.W., Scown, C.D., 2020. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. *Environ. Sci. Tech.* 54 (15), 9200–9209.
- [23] Rehl, T., Müller, J., 2011. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resour. Conserv. Recycl.* 56 (1), 92–104.
- [24] Santagata, R., Zucaro, A., Fiorentino, G., Lucagnano, E., Ulgiati, S., 2020. Developing a procedural method for the integration of life cycle assessment and emergy analysis. The amalfi paper case study. *Ecol. Ind.* 117, 106676.
- [25] Santagata, R., Ripa, M., Genovese, A., Ulgiati, S., 2021. Food waste recovery pathways: Challenges and opportunities for an emerging bio-based circular economy. A systematic review and an assessment. *J. Clean. Prod.* 286, 125490.
- [26] Sarigiannis, D.A., Handakas, E.J., Karakitsios, S.P., Gotti, A., 2021. Life cycle assessment of municipal waste management options. *Environ. Res.* 193, 110307.
- [27] Shen, J., Zhang, X., Lv, Y., Yang, X., Wu, J., Lin, L., Zhang, Y., 2019. An improved emergy evaluation of the environmental sustainability of China's steel production from 2005 to 2015. *Ecol. Ind.* 103, 55–69.
- [28] Shi, C., Li, K., Bian, X., Wang, K., 2023. Comprehensive benefit evaluation of “carbon neutrality” in anaerobic treatment of kitchen waste. *Environmental Science in China*. 43 (01), 436–445. In Chinese.
- [29] Singh, D., Tembhare, M., Machhirake, N., Kumar, S., 2023. Impact of municipal solid waste landfill leachate on biogas production rate. *J. Environ. Manage.* 336, 117643.

- [30] Sulis, F., Agostinho, F., Almeida, C.M.V.B., Giannetti, B.F., 2024. Assessing the food recovery hierarchy concept from an emergy accounting perspective: Validation and theoretical insights. *Waste Manag.* 190, 131–140.
- [31] Zhang, X., Jiang, W., Deng, S., Peng, K., 2009. Emergy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998–2004. *J. Clean. Prod.* 17, 1030–1038.
- [32] Zhang, X., Xiang, N., Wang, W., Liao, W., Yang, X., Shui, W., Deng, S., 2018. An emergy evaluation of the sewage sludge treatment system with earthworm composting technology in Chengdu. China. *ecol Eng.* 110, 8–17.
- [33] Agrawal, A., Chaudhari, P.K., Ghosh, P., 2022. Anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: a critical review of associated challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022 30: 10 30, 24987–25012.
- [34] Aryal, N., Ghimire, N., Bajracharya, S., 2020. Coupling of microbial electrosynthesis with anaerobic digestion for waste valorization. In: Li, Y., Khanal, S.K. (Eds.), *Advances in Bioenergy*. Academic Press, pp. 101–127
- [35] Chakravarty, I., Mandavgane, S.A., 2020. Valorization of fruit and vegetable waste for biofertilizer and biogas. *J. Food Process Eng.* 44
- [36] Ghaderikia, A., Yilmazel, Y.D., 2024. Methane recovery from cattle manure: role of granular activated carbon amendment into anaerobic digestion-microbial electrolysis cells (AD-MECs) integrated systems. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12, 1437–1445.
- [37] Li, Y., Park, S.Y., Zhu, J., 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15, 821–826.
- [38] Ugwuanyi, J., 2005. Effect of digestion temperature and pH on treatment efficiency and evolution of volatile fatty acids during thermophilic aerobic digestion of model high strength agricultural waste. *Bioresour. Technol.* 96, 707–719.
- [39] Wang, H., Liu, Y., Du, H., Zhu, J., Peng, L., Yang, C., Luo, F., 2021. Exploring the effect of voltage on biogas production performance and the methanogenic pathway of microbial electrosynthesis. *Biochem. Eng. J.* 171, 108028
- [40] Wang, S., Ma, F., Ma, W., Wang, P., Zhao, G., Lu, X., 2019. Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. *Water (Basel)* 11, 133.
- [41] Wang, W., Lee, D.-J., Lei, Z., 2022. Integrating anaerobic digestion with microbial electrolysis cell for performance enhancement: a review. *Bioresour. Technol.* 344, 126321
- [42] Sengupta MY, Xie A, Lopez A, Habte G, Maclaurin G, Shelby J. The National Solar Radiation Data Base.
- [43] Li X, Xu E, Song S, Wang X, Yuan G. Dynamic simulation of two-tank indirect thermal energy storage system with molten salt. *Renew Energy* 2017;113:1311–9.
- [44] Khaleghi S, Asiaei S, Siavashi M. A smart grid poly-generation design for hot arid regions composed of multi-effect distillation (MED), compressed air energy storage (CAES), and parabolic trough solar collector field (PTSC). *J Clean Prod* 2022;372: 133693.

<http://jeet.siamtechu.net>

- [45] Membere E, Sallis P. Effect of temperature on kinetics of biogas production from macroalgae. *Bioresour Technol* 2018;263:410–7.
- [46] Balasubramanian P, Bajaj I, Hasan MMF. Simulation and optimization of reforming reactors for carbon dioxide utilization using both rigorous and reduced models. *J CO₂ Utiliz* 2018;23:80–104.
- [47] Zhao F, Virkar AV. Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters. *J Power Sources* 2005;141:79–95.

FUTURE SCENARIOS AND FORESIGHTS OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT FOR ASTRONOMY AND SPACE LEARNING CENTERS IN THAILAND

Chaloemchon Wannathong* Rachada Boonkaew and Vichit Rangpan

Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University

**Corresponding author E-mail: chaloemchon89@gmail.com*

Received: April 11, 2026 Revised: June 21, 2026 Accepted: June 23, 2026

Abstract

This research aims to analyze and forecast future scenarios regarding the environmental management of astronomy and space learning centers in Thailand over the next decade. As the initial phase of a broader mixed-methods study, this article adopts a qualitative approach utilizing the Ethnographic Delphi Futures Research (EDFR) technique. A panel of 24 key experts was purposively selected; notably, 75% of the informants hold doctoral degrees, while 54.2% possess more than 16 years of professional experience. Data collection was conducted through in-depth inquiries, followed by rigorous content analysis.

The Phase 1 qualitative findings, extracted from in-depth inquiries, establish three distinct future scenarios. First, the worst-case scenario underscores impending crises driven by urban expansion, physical structures obstructing astronomical visibility, environmental negligence, and a disproportionate focus on research that consequently marginalizes public service. Second, the desirable scenario portrays the successful integration of Sustainable Development Goals (SDGs), net-zero carbon policies, responsible tourism, and the advancement of citizen science. Third, the most probable scenario reflects a pragmatic adaptation characterized by the concurrent use of technology and nature conservation, the establishment of collaborative networks, and workforce development designed to accommodate the emerging space economy. Ultimately, these findings provide a strategic empirical foundation for elevating Thailand's astronomical learning facilities toward long-term sustainability.

Keywords: Foresights; Future scenarios; Environmental Management; Astronomy Learning Centers

Introduction

Environmental management in the 21st century is undergoing a major transition driven by globalization and climate change. The global community has prioritized the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) as the primary framework for balancing economic growth, natural resource conservation, and social equity. However, with rapid scientific and technological advancement, environmental conservation is no longer limited to terrestrial resources such as forests, water sources, or the troposphere. The concept has expanded to include the space environment and dark sky preservation, which are now recognized as human natural heritage [1] [2]. This awareness coincides with the growth of the space economy, driven by space innovation, satellite communication, and astrotourism, generating significant value for local economies worldwide.

Given these developments, astronomy and space learning centers—such as observatories, astronomical parks, and science centers—are no longer solely physical observation sites. They have shifted toward becoming science communication spaces that connect advanced knowledge with the general public. These centers inspire

youth, develop the workforce for the space industry, and promote citizen science. Additionally, they help attract tourists and distribute income to surrounding communities through responsible tourism, aligning with the Bio-Circular-Green (BCG) Economy Model [3].

Beyond providing academic services, astronomy learning centers are highly energy-intensive infrastructures. This is primarily due to climate control systems maintaining strict temperature and humidity standards for advanced scientific instruments, alongside the energy demands of large exhibition areas. Furthermore, environmental issues like light pollution and fine particulate matter (PM2.5) directly compromise observational capabilities. Consequently, integrating energy and environmental management is a critical prerequisite for the long-term survival and sustainability of these centers. Despite infrastructure development, Thailand's astronomy learning centers face mounting environmental threats. A primary crisis is light pollution from unplanned urban expansion and improper lighting installations that obstruct sky visibility. Light pollution not only reduces observational capacity and instrument efficiency, but it also negatively affects ecosystems, biological clocks, and human health. Furthermore, many centers struggle with internal resource management, including waste disposal, high carbon footprints from mass visitation, and energy management that has not yet reached net-zero carbon targets. The lack of an environmental management system suited to the local community context also creates a gap between the learning centers and the surrounding society. Currently, solutions to these problems are often reactive and fragmented. Most research focuses on industrial environmental management or purely astrophysical outcomes, leaving an academic gap in integrating international standards like ISO 14001 with dark sky reserve criteria specifically for astronomy centers. Because environmental problems are complex and highly uncertain, traditional research focusing only on past or current events is insufficient for long-term strategic planning. Although previous studies have explored the development of science learning centers, most research has primarily focused on educational management effectiveness, lacking concrete and in-depth investigations into energy and environmental management systems. This research thus presents a distinct novelty by integrating astronomical sciences with the dynamics of energy and environmental technology applications to formulate future scenarios that have never previously been assessed within the context of Thailand. The outcomes of this study will serve as a crucial milestone in preparing for the challenges of the coming decade.

Therefore, this research applies futures studies, specifically Ethnographic Delphi Futures Research (EDFR), to gather expert insights. This method helps anticipate trends and forecast future scenarios—including worst-case, desirable, and most probable scenarios—over the next decade. Analyzing these scenarios provides a strategic direction for environmental management in Thailand's astronomy learning centers. The findings will offer empirical data for policymakers, local governments, and relevant agencies to develop practical management models. The ultimate goal is to upgrade Thailand's astronomy learning centers to international standards, creating spaces that sustainably balance space science advancement, environmental conservation, and local economic growth.

Research Objective

The objective of this research is to analyze and forecast future scenarios for environmental management in Thailand's astronomy and space learning centers, including the desirable, worst-case, and most probable scenarios.

Research Methodology

This research is part of a larger mixed-methods project utilizing the Ethnographic Delphi Futures Research (EDFR) technique [4]. However, to ensure a comprehensive and in-depth analysis of future scenarios and systemic contexts, this article focuses specifically on presenting the qualitative findings from Phase 1 (In-depth Inquiry). The detailed procedures are as follows:

Key Informants: The key informants consisted of a panel of 24 experts selected through purposive sampling. This sample size ensures data saturation and comprehensive stakeholder coverage, which is standard and highly appropriate for futures research prioritizing qualitative depth over statistical generalization [5] [6]. To obtain highly reliable, in-depth insights capable of comprehensively reflecting future scenarios, the researcher established strict selection criteria. These criteria thoroughly considered the individuals' qualifications, specialized expertise, empirical achievements, and long-standing professional experience. The selection encompassed five primary professional disciplines essential to driving the learning ecosystem: 1) astronomy and space, 2) environmental education, 3) architecture and urban planning, 4) educational technology, and 5) learning center management. The experts were categorized into three distinct groups: 6 policymakers, 9 practitioners, and 9 academics. Most informants were in the peak experience bracket, with 41.7% aged 40–49 and 37.5% aged 50–59. Furthermore, 75% of the panel held a doctoral degree, and 54.2% possessed more than 16 years of direct working experience in astronomy, environmental fields, and learning center management.

Research Instruments: The primary instrument for data collection was an open-ended, in-depth inquiry questionnaire. This tool was adapted from the Ethnographic Futures Research (EFR) approach to encourage experts to envision and forecast the environmental management of astronomy learning centers over the next 10 years. The experts were asked to project future scenarios in three dimensions: 1) the best-case scenario, 2) the worst-case scenario, and 3) the most probable scenario. To ensure content validity, the instrument was evaluated by three independent experts. All questions achieved an Item-Objective Congruence (IOC) index of 0.50 or higher, meeting the standard criteria.

Data Collection: In-depth data were collected individually using flexible methods suited to each expert's context. These methods included self-administered open-ended questionnaires, online video interviews, and face-to-face interviews. The process emphasized giving experts sufficient time and freedom to reflect, ensuring the most complete and insightful perspectives possible.

Data Analysis: Data were systematically analyzed using thematic and content analysis. Following the transcription of recorded interviews and the integration of written questionnaire responses, the consolidated textual data were subjected to a rigorous coding process to extract key terms, which were then categorized into coherent conceptual groups. These concepts were synthesized into distinct variables to formulate the three future scenarios serving as the foundation for presenting the research findings.

Results and Discussion

Research Findings: Based on the content analysis of qualitative data from in-depth inquiries with 24 experts during the first round of the Ethnographic Delphi Futures Research (EDFR) process, the researcher synthesized future scenarios for the environmental management of Thailand's astronomy and space learning centers over the next decade. These scenarios are categorized into three main types as follows:

1. The Worst-Case Scenario: Degradation and Social Disconnection

This scenario reflects the experts' concerns about a situation where learning center management lacks vision, fails to perform maintenance, and neglects the social and environmental contexts. This would lead to a decline across all areas, specifically:

1.1 Outdated Technology and Personnel Shortages: Experts indicated that without long-term budget planning and strategic management, advanced equipment—which required massive initial investment—would quickly deteriorate and become outdated. A severe concurrent issue is the shortage of specialized personnel and brain drain. When technical problems occur, there would be a lack of capable staff to repair or upgrade the systems. Consequently, the learning centers would fail to meet their functional objectives and completely lose their capacity to provide academic services.

1.2 Pollution, Climate Threats, and Urban Planning: The learning centers will face severe environmental crises, particularly high levels of PM2.5 and light pollution. Combined with unplanned urban expansion and a lack of strict zoning regulations, this will lead to the construction of high-rise buildings that obstruct the horizon and visibility for astronomical observation. Furthermore, climate change impacts, such as extreme weather and unseasonal dense cloud cover, will pose serious operational limitations. Additionally, inefficient management and the neglect of occupational health and safety standards will inevitably result in municipal waste problems and the destruction of surrounding ecosystems.

1.3 Infrastructure Degradation from Policy Discontinuity: Facilities lacking continuous maintenance will gradually deteriorate into deserted areas or abandoned monuments. This reflects a structural vulnerability caused by the discontinuity of executive policies that fluctuate with administrative terms. Such instability causes large-scale projects to be suspended or face mid-project budget cuts. Consequently, these infrastructures will not only lose their visual appeal, but the lack of risk management or emergency response plans will also turn them into significant safety hazards for users and the surrounding communities.

1.4 Inequality, Conflict, and Ultimate Abandonment: Focusing solely on physical buildings or advanced research while neglecting local residents will create conflicts with the surrounding communities. The learning centers will become closed spaces inaccessible to the general public. Coupled with high admission or service fees that create access inequalities, these astronomical facilities will become ivory towers or exclusive spaces serving only elites or specific academic groups. Ultimately, lacking social acceptance and a shared sense of public ownership, these learning centers will face severe budget shortages and be completely abandoned.

2. The Desirable Scenario: A Green Learning Ecosystem and International Standards

This scenario represents an ideal future where learning centers transform into key drivers for national development while sustainably maintaining ecological balance. It comprises the following aspects:

2.1 Advanced Technology and the Metaverse: The learning centers will overcome physical limitations by integrating advanced technologies. Specifically, applying the Metaverse alongside Artificial Intelligence (AI) will connect the physical and virtual worlds without borders, allowing users to experience highly realistic space learning simulations. Furthermore, developing online observatory networks and utilizing Big Data will enable the public and researchers worldwide to access astronomical data 24/7. This effectively removes traditional barriers to learning.

2.2 Carbon Neutrality and Dark Sky Reserves: Environmental management will be upgraded to the highest international standards. The learning centers will transition to 100% clean energy, such as solar power, to achieve carbon neutrality. Crucially, they will push for the establishment of Dark Sky Reserves—areas completely free from light pollution, optimized for astronomical research. Additionally, Circular Economy principles will be systematically applied to resource management, aiming for zero-waste goals and highly efficient wastewater recycling.

2.3 Universal Design and Green Infrastructure: Spatial design will be based on Universal Design principles, ensuring that everyone, regardless of gender or age, including vulnerable groups like the elderly and persons with disabilities, can access the space safely. This reflects a commitment to equity in science education. Concurrently, building infrastructure will follow green architecture standards. This involves using eco-friendly materials, designing structures to blend with the surrounding natural landscape, and relying on natural lighting and ventilation to minimize building energy consumption.

2.4 International Standards and the Community Economic Ecosystem: The learning centers will be elevated to gain global recognition. Beyond serving as knowledge hubs, they will act as key mechanisms in driving the Space Economy by promoting responsible astrotourism. This will generate income for surrounding communities, allowing the local economy to grow sustainably alongside the institutions. Most importantly, their primary role will be fostering a citizen science society, where local residents are aware of and actively participate in protecting natural resources in collaboration with the centers.

3. The Most Probable Scenario: Dynamic Adaptation through Multilateral Cooperation

Given the realistic budget and resource constraints in Thailand, the experts evaluated the most likely direction, which emphasizes flexible management as follows:

3.1 Practical and Hybrid Technologies: The most probable future will not involve heavy investments in expensive, cutting-edge technologies. Instead, it will focus on cost-effectiveness by using hybrid technologies to provide both online and offline services. Concurrently, the lifespan of existing astronomical equipment will be extended through system upgrades and the promotion of open-source databases. This approach meets diverse user needs in practical situations and helps reduce the digital divide under a limited budget.

3.2 Contextual Green Management and Efficiency Enhancement: Environmental management will not leap directly to advanced green technologies. Instead, it will implement basic standards and progress gradually, prioritizing the specific context of each area. The focus will be on resource management through the 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) principles and basic energy-efficiency measures. The goal is to minimize environmental disturbance given limited resources, while also promoting Community-based Monitoring systems to oversee environmental impacts.

3.3 Renovating Existing Structures and Flexible Spaces: Instead of constructing large new buildings, the learning centers will focus on routine maintenance and upgrading existing structures to extend their lifespan. This includes managing areas as flexible spaces (or adaptive reuse) that can be easily adjusted to support various activities. The highest priority will be given to core safety standards for both the public and staff.

3.4 4P Collaborative Networks and Resource Sharing: The survival of these learning centers will not depend on working alone or relying solely on government funding. Instead, it will rely on strong collaborative networks through Public-Private-People Partnership (4P) mechanisms. This involves integrated management

among government agencies, the educational sector, and local communities to jointly drive initiatives and share resources—such as equipment, personnel, and knowledge. This collaboration is the most crucial strategy for overcoming resource shortages.

To provide an overview of the directions and specific characteristics of each dimension, the researcher has synthesized all findings into a comparative summary, as shown in Table 1.

Table 1. Comparative summary of the three future scenarios for environmental management in Thailand's astronomy and space learning centers.

Dimensions	The Desirable Scenario	The Worst-Case Scenario	The Most Probable Scenario
Technology	Advanced Technology and the Metaverse: Integrating the Metaverse, AI, and Big Data to overcome limitations, alongside creating a Virtual Observatory network.	Outdated Technology and Personnel Crisis: Damaged equipment, lack of specialized experts for maintenance and development, and severe brain drain.	Hybrid Systems and Cost-Effectiveness: Utilizing hybrid systems, extending the lifespan of existing equipment, and supporting Open Educational Resources (OER).
Environment	Carbon Neutrality and Dark Sky Reserves: Utilizing 100% clean energy, driven by the Circular Economy and zero-waste goals.	Pollution, Climate Threats, and Urban Planning: Facing PM2.5 and light pollution, urban expansion obstructing visibility, and adverse climate change impacts.	Contextual Green Management and the 3Rs: Efficient resource utilization based on 3Rs principles, focusing on energy efficiency and community-based monitoring.
Infrastructure	Universal Design and Green Architecture: Applying Universal Design integrated with Green Architecture, using eco-friendly materials to ensure safety for all.	Degradation from Policy Discontinuity: Degenerating into abandoned monuments, lacking emergency plans, and turning into hazard zones.	Structural Upgrades and Flexible Spaces: Focusing on building performance improvements and maximizing the utilization of adaptable, flexible spaces.
Management	International Standards and Community Economic Ecosystems: Promoting astrotourism, driving the Space Economy, and fostering a citizen science society.	Exclusive Spaces and Conflicts: Creating access inequality (exclusive spaces), conflicting with communities, and facing budget suspensions due to lack of acceptance.	4P Collaborative Networks and Resource Sharing: Managing through Public-Private-People Partnerships (4P) and emphasizing shared resource utilization.

In-depth Insights and Synthetic Conclusions

Synthesizing the three future scenarios—Optimistic, Pessimistic, and Most Probable—reveals key insights that reflect the actual direction for developing astronomy and space learning centers in the Thai context:

1. A Paradigm Shift from Physical Infrastructure to Dynamic Management: Expert consensus indicates that the future success of these centers depends less on building size or equipment modernity than on effective dynamic management. As demonstrated in the negative scenario, buildings risk becoming abandoned monuments

due to policy discontinuity and brain drain. Therefore, the key factor is the efficiency of dynamic management, particularly upgrading existing structures and designing multi-purpose spaces for maximum cost-effectiveness. Ensuring long-term equipment maintenance and resource sharing are decisive factors for organizational sustainability under budget and personnel constraints.

2. Environmental Sustainability as a Condition for Survival, Not an Option: Environmental issues are more than just a social trend; they are a direct requirement for the survival of astronomy learning centers. These institutions face multiple threats, including light pollution, urban expansion, PM 2.5, and climate variability. Failure to manage these challenges will lead to the loss of their primary function: celestial observation. Consequently, implementing circular economy principles, pursuing zero-waste goals, and adopting basic energy-saving measures are not merely social contributions but essential strategies to reduce operational costs and achieve long-term self-reliance, as projected in the most probable scenario.

3. Technology as a Tool for Expanding Learning Opportunities and Reducing Inequality: Although the optimistic scenario mentions advanced technologies like the Metaverse, AI, and Big Data, the analysis shows that technology is not meant to replace genuine on-site experiences. Instead, it acts as a bridge to overcome accessibility limits, preventing the learning centers from becoming exclusive spaces. Developing online observatory networks and Open Educational Resources (OER) allows people from remote areas or vulnerable groups to access astronomical knowledge equally with urban residents. Therefore, experts highly agree that a hybrid learning model is the most effective solution for addressing educational inequality.

4. Multilateral Networks and Community Engagement as the Foundation of Stability: Lessons from the pessimistic scenario demonstrate that learning centers cannot survive in isolation without community involvement. The desirable model must move beyond being merely an educational facility to become a Social Space that supports surrounding communities. This is driven by 4P (Public-Private-People Partnership) networks, the promotion of astrotourism to generate local income, and the cultivation of a citizen science network. When the community feels a sense of ownership and receives benefits, they naturally shift from being mere observers to active protectors, automatically helping to safeguard the facility and monitor environmental issues.

Discussion

This research aimed to analyze and forecast future scenarios for the environmental management of Thailand's astronomy and space learning centers, covering three distinct models: the desirable, worst-case, and most probable scenarios. The findings align with the theoretical foundations of futures studies established Wendell Bell [7] who suggested that this discipline requires exploring multiple futures to broaden perspectives and prepare strategically. The experts' collective reflection on the worst-case scenario serves as an early warning, which is consistent with the perspective of Ketudat [8]. Meanwhile, the desirable and most probable scenarios reinforce Ziauddin Sardar's [9] view that the future is dynamic and can be shaped by current management practices. Based on the synthesis of these three scenarios, the researcher discusses the in-depth findings across four core dimensions as follows:

1. Transitioning to Dynamic Management: A comparative analysis of the scenarios reveals a notable concern among the experts: learning centers could be abandoned and turned into mere monuments. This contrasts sharply with the optimistic scenario, which envisions astronomical facilities as fully integrated green architecture. This contrast leads to a practical synthesis: the most viable and likely solution is to focus on upgrading the

performance of existing structures while designing flexible spaces. This approach allows facilities to adapt to technological changes and budget constraints. Such circumstances highlight that structural failure, often caused by policy discontinuity at the executive level, is a major vulnerability. This aligns with Tekhanmag [10] who noted that futures research must account for the sensitivity of socio-political contexts, as these factors directly impact the sustainability of large-scale government projects. Therefore, management over the next decade should not fixate on new construction. Instead, it should transition to flexible environmental management based on international standards to extend the lifespan of existing infrastructure and maximize cost-effectiveness amid budget fluctuations. This concept is supported by Thamwapi and Thongkamsamut [11] who studied building renovation guidelines based on green building criteria at the College of Local Administration, Khon Kaen University. Their study showed that retrofitting existing public buildings using green criteria is a cost-effective and sustainable strategy, particularly for Thai educational institutions. They found that upgrading existing structures with simple yet effective techniques—such as optimizing lighting systems and building envelopes—can transform older facilities into smart learning spaces without requiring massive budgets for new construction. This also corroborates the findings of Khetkrathok and Suluksna [12] who indicated that renovating the library building at Suranaree University of Technology under green building standards significantly reduced environmental impacts and generated value throughout the building's life cycle. Regarding spatial management, Klinchoey and Boonyaputthipong [13] suggested that retrofitting existing buildings with flexible designs to support diverse activities (multi-functional spaces) is key. This approach enables government agencies to increase space utilization rates under severe budget constraints. This is consistent with Bullen and Love [14] who studied the adaptive reuse of heritage buildings in Australia. They confirmed that reusing existing structures is a more efficient alternative to demolition and reconstruction for achieving both economic and environmental sustainability goals. However, the findings of this study expand on previous research by demonstrating that, within the context of Thailand's astronomy and space learning centers, dynamic management is no longer merely an architectural choice. Rather, it has become a survival strategy that acts as a shield against the uncertainties of public policy. This strategic resilience ensures that these scientific learning institutions can continue to serve society continuously without being left behind in the future.

2. Systemic Environmental Management for Sustainability: The findings reflect a concerning future scenario: without an effective environmental management system, astronomy learning centers will inevitably face pollution crises and environmental threats. Specifically, the worsening PM2.5 pollution and light pollution will obscure celestial visibility. This situation confirms that environmental sustainability is no longer a secondary management issue, but a fundamental prerequisite for the centers to survive and fulfill their core functions. This aligns with the study by Youyuenyong [15] on the impact of light pollution on public astronomical research services. His research examined how urban expansion and unregulated artificial lighting affect observatory operations in Thailand. That study clearly indicated that light pollution not only degrades the quality of scientific research data but also deprives the public of their right to access astronomical learning services. On the other hand, the optimistic scenario focuses on establishing Dark Sky Reserves and achieving carbon neutrality. This elevates environmental management standards beyond conventional carbon footprint reduction. This approach is consistent with the practices of global organizations like the European Southern Observatory (ESO), which proactively uses 100% renewable energy to tangibly reduce greenhouse gas emissions. When comparing these localized future scenarios with international astronomical facilities, similar environmental management trajectories become highly evident.

Major global observatories, such as those in Mauna Kea, Hawaii, which emphasize community-based ecological management [16] or the Atacama Desert in Chile, where international observatories have formed the Dark Skies Council to combat light pollution [17] actively integrate rigorous environmental impact assessments into their operations. The 'desirable scenario' identified in this Thai context aligns seamlessly with the global astronomical community's broader shift towards the Sustainable Development Goals (SDGs) and mitigating observatory carbon footprints to achieve net-zero carbon operations [18] [19]. This alignment implies that for Thailand's space learning centers to remain scientifically competitive and socially responsible, they must adopt an environmental management framework that is globally aligned yet practically adapted to local constraints. Furthermore, it aligns with Martínez-Ramos et al. [3] who suggested that learning spaces in the next century must function as a Social-Ecological Model, helping people realize the deep connection between human lifestyles and ecosystems. However, comparing the findings from these future scenarios with previous literature reveals significant insights and differences. While Youyuenyong [15] focused on reactive mechanisms, such as advocating for local ordinances to control light pollution, this study presents a more strategic perspective. It suggests that future learning centers must shift their role from being victims of environmental threats to becoming economic drivers through the Space Economy and astrotourism. This transforms the pollution crisis into a strategic opportunity, utilizing the darkness of the sky as a primary resource for value creation. Additionally, whereas Martínez-Ramos et al. [3] focused on the general design of educational spaces, this research focuses specifically on the Thai context. It indicates that the sustainability of Thai astronomy learning centers must be concretely linked to the national BCG (Bio-Circular-Green) Economy model and Thailand's goal of achieving net-zero greenhouse gas emissions by 2065. Therefore, contextual environmental management in this research is not limited to facility maintenance. Instead, it integrates institutional stability with global Sustainable Development Goals (SDGs). This integration is a key strength and a novel finding that this study contributes to the current academic field of astronomy and environmental management.

While a limitation of this study lies in the absence of measured environmental baseline data from actual sites, the synthesized expert insights clearly demonstrate the feasibility of implementing practical environmental solutions. Specifically, zero-waste initiatives and circular economy concepts can be operationalized through eco-friendly exhibition designs utilizing renewable materials, as well as systematic electronic waste (e-waste) management for specialized astronomical equipment. However, effectively driving these environmental innovations in practice will still require further research to evaluate their detailed economic cost-effectiveness in the next phase.

3. Integrating Technology to Reduce Inequality and Expand Learning Opportunities: A key issue highlighted by the findings is the risk that high-cost advanced technologies could widen the inequality gap if learning centers focus solely on modernity for commercial purposes. The researcher found that although virtual reality (the Metaverse) and digital astronomy represent the optimistic scenario, in the most probable context, technology must serve as a tool to reduce inequality. This can be achieved through hybrid learning and access to Open Educational Resources (OER), creating a ubiquitous learning environment where astronomy education is accessible anywhere and anytime [20]. This approach aligns with the futurist philosophy described by Poolpatarachewin [21] who noted the necessity of considering fair alternatives to distribute scientific knowledge, ensuring equal access for all groups, particularly those in remote areas. The concept of using technology to bridge the learning gap is consistent with the study by Bamrungsetthapong et al. [22] on hybrid learning and the quality improvement of Thailand's education

in the 21st century. Their research indicated that transitioning to a hybrid teaching model is a crucial mechanism for improving the education system and overcoming domestic inequality. The flexibility of this learning model reduces physical limitations, enabling students who lack financial resources or live in remote areas to access high-quality educational materials equally with urban learners. Regarding modern technology, these findings also support the work of Mystakidis [23] who reviewed literature on the use of the Metaverse in educational institutions. His research pointed out that the true value of virtual technology is not merely in attracting attention, but in its ability to provide immersive experiences, such as space exploration. This allows learners who cannot physically travel to learning centers to experience them realistically. However, Mystakidis emphasized that the success of such technology depends on readiness and access to equipment—a concern that aligns with the views of the expert panel in this study. Comparing these findings demonstrates that this research aligns with Bamrungsetthapong et al. [22] and Mystakidis [23] in asserting that technology is a key enabler in expanding learning boundaries beyond physical constraints. However, this study expands the analytical scope to include technological sustainability. In the context of Thai astronomy learning centers, integrating technology must be accompanied by environmentally friendly information technology management (Green ICT). This prevents the issue of e-waste from becoming a long-term burden for the learning centers. Furthermore, future technological development should reduce overly complex academic barriers by integrating ethno-astronomy through digital platforms. This serves as a bridge connecting modern science with local wisdom. Ultimately, this approach will allow technology to act as a medium that fosters a sense of ownership among all groups of Thai people, enabling them to utilize it in a concrete manner.

4. Institutional Stability Through Multilateral Networks and Social Participation: The findings across all scenarios confirm that astronomy learning centers cannot survive sustainably if they operate without collaborative networks. Transitioning the space from a conventional scientific institution or academic service center to a Social Space via Public-Private-People Partnership (4P) mechanisms is a key variable in achieving the desirable scenario. This emphasis on networking aligns with systems thinking and participatory theories presented by Jamkrajang [24] who noted that the power of sustainable change comes from cultivating a sense of local ownership. This is achieved by allowing citizens to influence the decision-making process from the beginning to the end of a project. Such a process helps build trust and solidarity, leading to strong, collective environmental management. Furthermore, engaging the community as citizen scientists to monitor light pollution and protect the environment surrounding the learning centers aligns with the research of Kokamai and Weerapalangoon [25]. Their study indicated that opening spaces for community participation in operations yields concrete, shared benefits, including a cleaner environment, better health, and an effective reduction in local resource degradation. This finding also supports Kyba et al. [26] in their article, *Citizen Scientists Report Global Rapid Reductions in the Visibility of Stars from 2011 to 2022*, which used observational data from global volunteers through the *Globe at Night* project. Their findings confirm that citizen power is the most crucial mechanism for collecting massive scientific data (Big Data) that agencies cannot gather alone. It is also a primary tool for raising broad public awareness about the loss of dark sky resources. However, a comparative analysis reveals that while this study aligns with Kokamai and Weerapalangoon [25] and Kyba et al. [26] in viewing civic networks as vital mechanisms for environmental monitoring, it presents a broader strategic conclusion. Specifically, while Kokamai and Weerapalangoon focused on operational-level participation and Kyba prioritized scientific data collection, this study finds that in the Thai context, participation must be elevated to create a Community Economic Ecosystem. This can be achieved by linking the 4P network with innovative environmental

management that generates local income. Examples include encouraging surrounding communities to operate eco-lodges within Dark Sky Reserves or jointly developing local curricula with nearby schools.

This approach represents a shift from volunteer-based participation to engagement tied to local livelihoods and economic sustainability. This socioeconomic integration is a concrete driving force that can steer Thai astronomy learning centers away from the risks of undesirable scenarios, guiding them toward long-term stability and sustainability.

Conclusion

This study reports the qualitative findings obtained from Phase 1 (In-depth Inquiry) of an ongoing Ethnographic Delphi Futures Research (EDFR) project investigating future environmental management scenarios for astronomy and space learning centers in Thailand. Based on the perspectives and professional judgments of 24 experts, three future scenarios were identified: the worst-case scenario, the desirable scenario, and the most probable scenario.

The findings suggest four strategic directions for future development: 1) shifting from infrastructure-centered development toward dynamic management systems; 2) recognizing environmental sustainability as a prerequisite for long-term organizational survival; 3) utilizing technology to reduce educational inequality and expand learning opportunities; and 4) strengthening multi-sector collaboration and community participation as foundations for institutional resilience. These findings highlight the importance of integrating scientific, environmental, and social dimensions to support the sustainable development of astronomy and space learning centers in Thailand.

It should be noted that the scenarios presented in this study reflect the perceptions, experiences, and expert judgments of the participating panel members rather than measured environmental baseline data. Therefore, the findings should be interpreted as preliminary future scenarios developed during the first phase of the EDFR process. These qualitative results provide the conceptual basis for developing research instruments and conducting the subsequent Delphi rounds and quantitative assessment. The findings from Phase 2 are currently under development and will contribute to a more comprehensive evidence base for future policy and management recommendations.

References

- [1] Lawrence, A., Rawls, M. L., Jah, M., Boley, A. C., Di Vruno, F., Garrington, S., Kramer, M., Lawler, S., Lowenthal, J. D., McDowell, J., & McCaughrean, M. J. (2022). The case for space environmentalism. *Nature Astronomy*, 6(4), 428–435. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01655-6>
- [2] Losch, A. (2020). Developing our Planetary Plan with an 18th United Nations Sustainable Development Goal: Space Environment. *HTS Teologiese Studies/Theological Studies*, 76(1), 7. <https://doi.org/10.4102/hts.v76i1.5951>.
- [3] Martínez-Ramos, S. A., Rodríguez-Reséndiz, J., Gutiérrez, A. F., Sevilla-Camacho, P. Y., & Mendiola-Santibañez, J. D. (2021). The learning space as support to sustainable development: A revision of uses and design processes. *Sustainability*, 13(21), 11609. <http://doi.org/10.3390/su132111609>.
- [4] Suwansaenthavee, V., & Suwansaenthavee, M. (2020). Future Research Basic, EDF. *Journal of Buddhist Philosophy Evolved*, 4(1), 91–102. <https://ojs.mbu.ac.th/index.php/jbpe/article/view/833/637>
- [5] Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The Delphi Method: Techniques and Applications*. Addison-Wesley.

- [6] Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., & Krahn, J. (2007). The Delphi method for graduate research. *Journal of Information Technology Education: Research*, 6(1), 1-21.
- [7] Bell, W. (1997). *Foundations of futures studies: History, purposes, and knowledge*. Transaction Publishers.
- [8] Ketudat, S. (1991). *The middle path for the future of Thailand: Technology in harmony with culture and environment*. Thai Watana Panich Press.
- [9] Sardar, Z. (2010). The namesake: Futures; futures studies; futurology; futuristic; foresight—What's in a name?. *Futures*, 42(3), 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.11.001>
- [10] Tekhanmag, K. (1988). *Scenarios and alternatives in the futures for cultural implementations in the year B.E. 2540* [Master's thesis, Chulalongkorn University].
- [11] Thamwapi, P., & Thongkamsamut, C. (2024). Guidelines for green building criteria-based building improvement: A case study: The College of Local Administration Khon Kaen University. *Journal of Modern Learning Development*, 9(5), 339–355. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/jomld/article/view/266804>
- [12] Khetkrathok, N., & Suluksna, K. (2019). Guidelines for the management of thermal comfort conditions in air-conditioned areas for energy saving case study library building Suranaree University of Technology. *Engineering and Technology Horizons*, 36(1), 17–24. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/view/240131/163693>
- [13] Klinchoey, R., & Boonyaputthipong, C. (2023). Guidelines for improving building to reduce energy consumption case study: Watabaek Subdistrict Administrative Organization Office, Thepsathit District, Chaiyaphum Province. *Journal of Architecture, Design and Construction*, 6(2), 12–25. <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/Jadc/article/view/264036/181333>
- [14] Bullen, P. A., & Love, P. E. D. (2011). Adaptive reuse of heritage buildings. *Structural Survey*, 29(5), 411–421. <https://doi.org/10.1108/02630801111182439>
- [15] Youyuenyong, P. (2013). Light pollution and astronomical observatories: Guidelines for by-laws to reduce light pollution problems. *Humanity and Social Science Journal Ubon Ratchathani University*, 4(2), 45–64. https://so02.tci-thaijo.org/index.php/human_ubu/article/view/85371/67944
- [16] Center for Maunakea Stewardship. (n.d.). *Community-based Stewardship*. University of Hawai'i at Hilo. Retrieved from <https://hilo.hawaii.edu/maunakea/stewardship/community-based-stewardship>
- [17] European Southern Observatory. (2025). *Dark Skies Council: International astronomical observatories join forces to protect Chile's skies*. ESO Announcements. Retrieved from <https://www.eso.org/public/announcements/annlang25004-es-cl/>
- [18] Knödseder, J., Brau-Nogué, S., Coriat, M., Garnier, P., Hughes, A., Laurent, P., & Tibaldo, L. (2022). Estimate of the carbon footprint of astronomical research infrastructures. *Nature Astronomy*, 6(4), 503-513. <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01612-3>
- [19] W. M. Keck Observatory. (2022, November 22). *W. M. Keck Observatory Sets Climate Action Goal: Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2035*. Retrieved from <https://keckobservatory.org/climate-action/>
- [20] Chen, C.-C., & Lin, P.-H. (2016). Development and evaluation of a context-aware ubiquitous learning environment for astronomy education. *Interactive Learning Environments*, 24(3), 644–661. <http://doi.org/10.1080/10494820.2014.915417>
- [21] Poolpatarachewin, C. (2003). Ethnographic Delphi futures research (EDFR). *Journal of Education Studies*, 32(1), <https://digital.car.chula.ac.th/educujournal/vol32/iss1/2>

- [22] Bamrungsetthapong, S., Tharnpanya, P., & Satjharuthai, K. (2020). Hybrid learning and the quality improvement of Thailand's education in the 21st century. *Nakkhabut Paritat Journal*, 12(3), 213–224. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/nakboot/article/view/245900/168814>
- [23] Mystakidis, S. (2022). Metaverse. *Encyclopedia*, 2(1), 486–497. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031>.
- [24] Jamkrajang, T. (2017). *The role of community in environmental management: Case study of Sa-Nguankam community, Khwaeng Nong Khang Phlu, Nong Kheam district, Bangkok* [Master's independent study, Thammasat University].
- [25] Kokamai, Y., & Weerapalangkoon, W. (2019). Participation of community members in environmental management in Bang Len sub-district municipality, Bang Yai district, Nonthaburi. *HUSO Journal of Humanities and Social Sciences*, 3(2), 12–29. <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/husojournalpnr/article/view/245624/166389>
- [26] Kyba, C. C. M., Altıntaş, Y. Ö., Walker, C. E., & Newhouse, M. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science*, 379(6629), 265–268. <https://doi.org/10.1126/science.abq7781>.

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์และความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน: กรณีศึกษาโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์

ASSESSMENT OF ORGANIZATIONAL CARBON FOOTPRINT AND TRANSITION RISKS TOWARD CARBON NEUTRALITY: A CASE STUDY OF A COMPRESSOR MANUFACTURING PLANT

อริศโนชา เพ็ญหนู¹ เสรีย์ ตู๊ประกาย^{1*} กฤษดา พิศลยบุตร¹ อนูวัต เจริญสุข² นันทน์ภัสร์ อินยิ้ม¹
และวัฒนา จันทะโคตร¹

Aritsanocha Pennoo¹, Seree Tuprakay^{1*}, Krissada Phisonyabut¹, Anuwat Charoensuk², Nannapasorn Inyim¹
and Wattana Chanthakhot¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

¹ Safety, Occupation Health and Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

² Logistics and Supply Chain Management Program, Faculty of Business Administration, Huachiew Chalermprakiew University

* Corresponding author e-mail: seree.t@ru.ac.th

Received: February 28, 2026 Revised: April 5, 2026 Accepted: April 9, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร (CFO) และวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน (Transition Risks) สู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์กรณีศึกษา โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณและคุณภาพผ่านเครื่องมือ McKinsey 7S, PESTEL และการประเมินความเสี่ยงตามกรอบ TCFD ผลการศึกษาพบว่า องค์กรมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 32,268 tCO₂e/ year โดยสัดส่วนการปล่อยสูงสุดมาจากขอบเขตที่ 3 (การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ) คิดเป็นร้อยละ 59.46 ซึ่งมีสาเหตุหลักจากคาร์บอนแฝงในวัตถุดิบเหล็กและทองแดง รองลงมาคือขอบเขตที่ 2 (การใช้ไฟฟ้า) ร้อยละ 23.68 และขอบเขตที่ 1 (การปล่อยทางตรง) ร้อยละ 16.85 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน พบประเด็นความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านขององค์กร จำนวน 12 รายการ โดยเฉพาะความเสี่ยงด้านนโยบายและกฎหมายจากมาตรการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดน (CBAM) ภาษีคาร์บอน และความเสี่ยงทางเทคโนโลยีจากการใช้สารทำความเย็น R-22 งานวิจัยจึงเสนอแนวทางการบริหารจัดการผ่านนโยบายจัดซื้อสีเขียว (Green Procurement) การลงทุนเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง และการบูรณาการตัวชี้วัดก๊าซเรือนกระจก (GHG KPI) เข้ากับกลยุทธ์ธุรกิจ เพื่อยกระดับขีดความสามารถในการแข่งขันและขับเคลื่อนองค์กรสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร, ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน, TCFD, ความเป็นกลางทางคาร์บอน, อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

Abstract

This research aims to assess the organizational carbon footprint (CFO) and analyze transition risks toward carbon neutrality in a case study of a compressor manufacturing plant. The study applies both quantitative and qualitative research methods using the McKinsey 7S framework, PESTEL analysis, and risk assessment in accordance with the Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) framework.

The results indicate that the organization's total greenhouse gas (GHG) emissions amount to 32,268 tCO₂e per year. The largest proportion of emissions originates from Scope 3 (other indirect emissions), accounting for 59.46%, primarily due to embedded carbon in raw materials such as steel and copper. This is followed by Scope 2 emissions (electricity consumption) at 23.68% and Scope 1 emissions (direct emissions) at 16.85%. The transition risk assessment identifies 11 high-risk issues, particularly policy and regulatory risks related to the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) and carbon taxation, as well as technological risks associated with the use of R-22 refrigerant. The study proposes management approaches including the implementation of green procurement policies, investment in high-efficiency technologies, and the integration of greenhouse gas (GHG) performance indicators into corporate strategy. These measures are intended to enhance competitiveness and support the organization's transition toward a Carbon Neutrality.

Keywords: Organizational Carbon Footprint, Transition Risks, TCFD, Carbon Neutrality, Compressor Industry

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันได้ทวีความรุนแรงและส่งผลกระทบอย่างเป็นรูปธรรมต่อระบบเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมทั่วโลก โดยเฉพาะจากมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศที่มีความเข้มงวดมากขึ้น อาทิ มาตรการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดนของสหภาพยุโรป (Carbon Border Adjustment Mechanism: CBAM) และนโยบาย European Green Deal ซึ่งมุ่งลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดห่วงโซ่อุปทานและกำหนดต้นทุนคาร์บอนกับสินค้านำเข้า นอกจากนี้ แนวโน้มการกำกับดูแลด้านสภาพภูมิอากาศในระดับสากล เช่น กรอบการเปิดเผยข้อมูลทางการเงินที่เกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศ (TCFD) และมาตรฐานการรายงานความยั่งยืน (ISSB) ได้ยิ่งเพิ่มแรงกดดันให้ภาคอุตสาหกรรมต้องเร่งปรับตัวเพื่อลดความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน (Transition Risks) ที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขัน ต้นทุนการดำเนินงาน และมูลค่าทางธุรกิจในระยะยาว [1], [2]

สำหรับประเทศไทย ได้มีการกำหนดเป้าหมายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ชัดเจนภายใต้แผนการมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contribution: NDC) ฉบับปรับปรุง โดยตั้งเป้าลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกไม่น้อยกว่าร้อยละ 40 ภายในปี พ.ศ. 2573 รวมถึงเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2593 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี พ.ศ. 2608 ซึ่งสะท้อนถึงทิศทางเชิงนโยบายที่มุ่งสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำอย่างเป็นรูปธรรม [3] อย่างไรก็ตาม การดำเนินมาตรการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรมยังเผชิญข้อจำกัดด้านต้นทุน เทคโนโลยี และความพร้อมขององค์กร ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน ทั้งในมิติของกฎระเบียบ เทคโนโลยี ตลาด และพฤติกรรมผู้บริโภค [4]

ในบริบทของอุตสาหกรรมการผลิตคอมเพรสเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบอุตสาหกรรมและพลังงาน เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบทำความเย็น และระบบปรับอากาศ พบว่าคอมเพรสเซอร์เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนสูงของโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งยังมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเลือกใช้สารทำความเย็น (Refrigerants) ซึ่งกำลัง

อยู่ในช่วงการเปลี่ยนผ่านจากสารที่มีค่าศักยภาพการก่อภาวะโลกร้อนสูง (High GWP) ไปสู่สารทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมตามข้อตกลง Kigali Amendment ภายใต้พิธีสารมอนทรีออล ส่งผลให้ผู้ผลิตคอมเพรสเซอร์ต้องปรับตัวทั้งในด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์ เทคโนโลยีการผลิต และการจัดการห่วงโซ่อุปทาน เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อมและความต้องการของตลาดโลก [5], [6]

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรจะสามารถระบุแหล่งที่มาของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างเป็นระบบ แต่ยังคงขาดการบูรณาการข้อมูลดังกล่าวเข้ากับการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านในระดับองค์กร ดังนั้น การศึกษาเพื่อเชื่อมโยงผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์กับการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงกลยุทธ์จึงมีความจำเป็น เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงบริหารและการวางแผนการลงทุนในเทคโนโลยีที่เหมาะสม

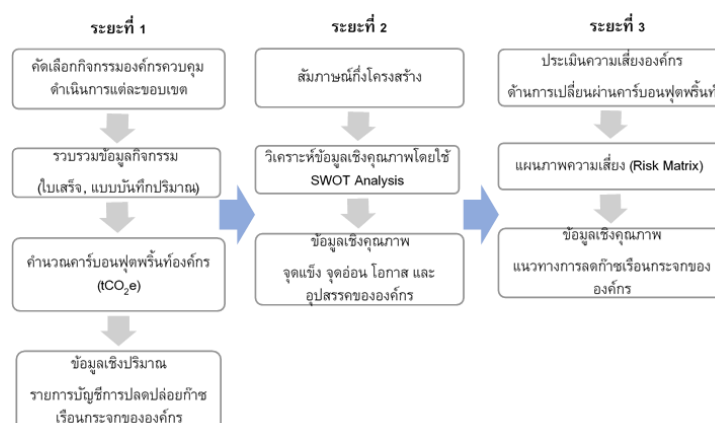
งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรควบคู่กับการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในกรณีศึกษาโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร (CFO) วิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน และเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์สำหรับการบริหารจัดการความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านในมิติต่าง ๆ ผลการศึกษานี้คาดว่าจะประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมในการปรับตัวสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ และสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน ได้แก่ SDG 13 (Climate Action), SDG 12 (Responsible Consumption and Production) และ SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) อย่างเป็นรูปธรรม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปแบบคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร (CFO) ของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์กรณีศึกษา
2. เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน และเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์สำหรับการบริหารจัดการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

3. เครื่องมือและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยบูรณาการการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรและวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ โดยกำหนดกระบวนการศึกษาออกเป็น 3 ระยะ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 ระยะที่ 1 การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) ใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากปี พ.ศ. 2567 ซึ่งรวบรวมจากแหล่งข้อมูลภายในองค์กร ได้แก่ ใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า บันทึกการใช้เชื้อเพลิง (เช่น น้ำมันดีเซล และก๊าซ LPG) รายงานการใช้พลังงาน ข้อมูลการผลิต และรายงานด้านสิ่งแวดล้อมของโรงงาน โดยครอบคลุมกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตาม แนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2565 [7] การศึกษานี้ จำแนกแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกเป็น 3 ขอบเขต ได้แก่ ขอบเขต 1 ซึ่งเป็นการปล่อยโดยตรงจากกิจกรรมของ องค์กร เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องจักรและการรั่วไหลของสารทำความเย็น ขอบเขต 2 ซึ่งเป็นการปล่อยทางอ้อม จากการใช้พลังงานไฟฟ้า และขอบเขต 3 ซึ่งเป็นการปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ 15 หมวด โดยพิจารณาถึงความสำคัญของขอบเขตนี้ ตามเกณฑ์พิจารณาจากระดับขนาด ความสามารถในการตรวจติดตาม และความเสี่ยงตาม ข้อกำหนดในการคำนวณและ รายงานคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร. 2564 พบว่าแหล่งปล่อยที่นับในการประเมิน ได้แก่ หมวด 1 สินค้าและบริการที่ องค์กรจัดซื้อ หมวด 5 การกำจัดของเสียที่เกิดกิจกรรมขององค์กร และหมวด 7 การเดินทางของพนักงานด้วยรถโดยสาร ประเภทรถบัส ที่องค์กรดำเนินการรับผิดชอบค่าเชื้อเพลิงเอง

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใช้สมการ $CFO = \sum (A_i \times EFi)$ โดยที่ A_i คือข้อมูลกิจกรรม เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh) ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (liter/kg) และปริมาณของเสีย (kg) และ EF_i คือค่าสัมประสิทธิ์การ ปล่อย (Emission Factor: EF) ที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากฐานข้อมูลของ Intergovernmental Panel on Climate Change และองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก เช่น ค่า EF ของไฟฟ้า ($kgCO_2e/kWh$) ค่า EF ของน้ำมันดีเซล ($kgCO_2e/liter$) ค่า EF ของ LPG ($kgCO_2e/kg$) และค่า Global Warming Potential (GWP) ของสารทำความเย็น ทั้งนี้ การคำนวณได้แยก ตามแต่ละขอบเขตอย่างชัดเจนเพื่อให้สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ (Traceability) [8]

3.2 ระยะที่ 2 การวิเคราะห์บริบทองค์กร

การวิเคราะห์บริบทองค์กรของกลุ่มตัวอย่างโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ โดยคัดเลือกโดยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ด้วยการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญกรมการบริษัท จำนวน 1 คน และเอกสารที่เกี่ยวข้อง ใช้ข้อมูลเชิงคุณภาพ จากการสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured Interview) โดยออกแบบคำถาม เพื่อให้ครอบคลุมข้อมูลด้านนโยบาย การดำเนินงาน และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีการบันทึกเสียงและถอดความข้อมูลเพื่อนำมา วิเคราะห์

การวิเคราะห์ปัจจัยภายในองค์กรใช้กรอบแนวคิด McKinsey 7S ของ McKinsey & Company ได้แก่ กลยุทธ์ของ องค์กร โครงสร้างองค์กร ระบบการดำเนินงาน บุคลากร ทักษะความสามารถ รูปแบบการบริหารจัดการ และค่านิยมร่วม ขององค์กร [9] ปัจจัยภายนอก ใช้การวิเคราะห์ PESTEL ซึ่งครอบคลุมปัจจัยด้านการเมือง เศรษฐกิจ สังคม เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม และกฎหมาย [10] เพื่อนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากทั้งปัจจัยภายในและภายนอก มาคัดกรองและจัดลำดับ ความสำคัญของปัจจัย นำผลลัพธ์ไปใช้ในประเมินความเสี่ยงและโอกาสที่บริษัทต้องเผชิญในปัจจุบันและที่คาดว่าจะต้อง เผชิญในอนาคต

3.3 ระยะที่ 3 การประเมินความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน

การประเมินความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่การลดก๊าซเรือนกระจกใช้กรอบของ Task Force on Climate-related Financial Disclosures ซึ่งแบ่งความเสี่ยงออกเป็น 4 มิติ ได้แก่ นโยบาย (Policy) เทคโนโลยี (Technology) ตลาด (Market) และชื่อเสียง (Reputation) [11] เนื่องจากเป็นกรอบที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการประเมินความ เสี่ยงด้านสภาพภูมิอากาศในภาคธุรกิจ [12]

การประเมินความเสี่ยงใช้วิธี Risk Matrix โดยอ้างอิงแนวทางจาก COSO-ERM 2017 และ ISO 31000:2018 [13] ซึ่งกำหนดเกณฑ์การประเมินเป็น 2 มิติ ได้แก่ โอกาสเกิด (Likelihood) และผลกระทบ (Impact) โดยใช้ระดับคะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 5 และคำนวณระดับความเสี่ยงจากผลคูณของทั้งสองปัจจัย จากนั้นจัดระดับความเสี่ยงลงในแผนภาพความเสี่ยง ใช้

แบบประเมินความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน ซึ่งประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญภายนอกจำนวน 5 คน ได้แก่ ผู้จัดการโครงการ Net Zero องค์การบริหารก๊าซเรือนกระจก สังกัดกระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม, กองขับเคลื่อนการลดก๊าซเรือนกระจก ส่วนติดตามและประเมินผลการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ และกลุ่มวิจัยด้านการลดก๊าซเรือนกระจก สังกัดกรมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและสิ่งแวดล้อม กำหนดขึ้นเพื่อคัดเลือกความเสี่ยงตั้งแต่ระดับสูงไปจนถึงระดับสูงมาก เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดมาตรการ มุ่งเน้นความเสี่ยงในระดับสูงมาก และระดับสูง โดยแสดงผลในช่วงสีส้มและสีแดง ที่จะต้องมีแผนการควบคุมและจัดการความเสี่ยงขององค์กร

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 วิเคราะห์ข้อมูลปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแต่ละขอบเขตของกิจกรรม เทียบสัดส่วนจากแหล่งกำเนิดในรูปแบบหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรขอบเขตที่ 1 (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการรั่วไหล)

ประเภท	แหล่งปล่อย	หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ e/year)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)	ค่า EF (Emission Factor)	แหล่งอ้างอิง
การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่อยู่กับที่	น้ำมันเชื้อเพลิง (ดีเซล) จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Lite	470.00	1.27	0.02	2.71	IPCC Vol.2 table 2.2, DEDE
	LPG ประกอบอาหารของร้านค้า	Lite	6,619.05	11.13	0.20	1.68	
	LPG (Boiler การเชื่อมและเตาอบชิ้นงาน)	Lite	1,154,347.48	1,940.72	35.69	1.68	
การเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบเคลื่อนที่	การใช้ LPG รถโฟล์คลิฟท์ (ถึง 15 ลิตร)	Lite	977,247.86	1,691.27	31.10	1.73	
	น้ำมันเชื้อเพลิง ดีเซล (รถขนส่งสินค้า)	Lite	22,846.15	62.61	1.15	2.74	
	น้ำมันเบนซิน 95 (การเดินทางภายใน)	Lite	9,561.39	21.41	0.39	2.24	
การรั่วไหลและอื่น ๆ	R-22 (HCFC-22)	kg	24.00	42.24	0.78	1,760.00	IPCC 2013, AR5
	R-32	kg	1,005.91	681.00	12.52	677.00	
	R-125	kg	287.50	911.38	16.76		
	R-134a	kg	57.20	74.36	1.37	1,300.00	

ผลรวม	2,172,466.54	5,437.39	100
--------------	---------------------	-----------------	------------

จากตารางที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบบอยู่กับที่ ครอบคลุมกิจกรรมการบำรุงรักษา การผลิต และการประกอบอาหารในโรงอาหาร และการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) มีการเดินเครื่องตามแผนเดือนละ 2 ครั้ง ขณะที่ระบบสำรองน้ำดับเพลิง (Fire pump) ไม่พบการเติมเชื้อเพลิงในรอบปีศึกษา สำหรับกิจกรรมการประกอบอาหารในร้านค้า มีการใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) โดยอ้างอิงจากมิเตอร์หลักที่จ่ายเข้าสู่ร้านค้า ในส่วนของกระบวนการผลิต พบว่าการผลิตไอน้ำจากหม้อต้ม (Boiler) ซึ่งใช้ในกระบวนการเชื่อมและเตาอบชิ้นงาน เป็นแหล่งใช้พลังงานหลัก

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งเคลื่อนที่ ครอบคลุมการใช้เชื้อเพลิงในยานพาหนะและอุปกรณ์ขนส่งภายในองค์กร รถยก จำนวน 7 คัน ใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG ขนาดถัง 15 ลิตร โดยอ้างอิงจากข้อมูลการสั่งซื้อ รถยนต์นั่งส่วนบุคคลขององค์กร ใช้น้ำมันเบนซิน 95 โดยคำนวณจากระยะทางรวม 141,154.80 กิโลเมตร และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย รถบรรทุกสำหรับขนส่งสินค้า จำนวน 4 คัน มีการเดินทางเฉลี่ย 5 กิโลเมตรต่อเดือน คิดเป็นระยะทางรวม 146,124 กิโลเมตร คูณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุกเฉลี่ย

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งรั่วไหลและกิจกรรมอื่น ๆ ประกอบด้วยระบบบำบัดน้ำเสียและการใช้สารทำความเย็น ระบบบำบัดน้ำเสียขององค์กรเป็นระบบ Activated Sludge ซึ่งมีการเติมอากาศและควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งให้เป็นไปตามมาตรฐาน ส่งผลให้ไม่เกิดการปล่อยก๊าซมีเทน ในส่วนของระบบปรับอากาศ ไม่พบการเติมสารทำความเย็นในรอบปี เนื่องจากองค์กรใช้ระบบหล่อเย็นแบบน้ำหมุนเวียน (Cooling Tower) เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม พบการใช้สารทำความเย็นเฉพาะในกิจกรรมทดสอบคอมเพรสเซอร์ โดยอ้างอิงจากบันทึกปริมาณการใช้สารทำความเย็นของหน่วยงานควบคุมคุณภาพ

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าภายในองค์กรขอบเขตที่ 2

ประเภท	แหล่งปล่อย	หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ e/year)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)	ค่า EF (Emission Factor)	แหล่งอ้างอิง
การใช้ไฟฟ้า	การใช้ไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง	Kwh	303,446.90	151.69	1.99	0.49	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA, AR5 (with TGO electricity 2016-2018)
	การใช้ไฟฟ้าในระบบระบบน้ำเย็น	Kwh	917,172.00	458.49	6.00		
	การใช้ไฟฟ้าในระบบเครื่องปรับอากาศ	Kwh	3,064,762.00	1,532.07	20.05		
	การใช้ไฟฟ้าในระบบอัดอากาศ	Kwh	3,704,760.00	1,852.01	24.24		
	การใช้ไฟฟ้าในระบบการผลิต	Kwh	7,296,557.58	3,647.55	47.73		
ผลรวม			15,286,698.48	7,641.81	100		

จากตารางที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า โดยใบเสร็จค่าไฟ 12 เดือน ไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกจ่ายไปใช้ระบบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ ระบบเครื่องจักรการผลิต ระบบอัดอากาศ ระบบเครื่องปรับอากาศ ระบบระบบน้ำเย็น และระบบแสงสว่าง

ตารางที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ขอบเขตที่ 3 (ทางอ้อมอื่นๆ)

ประเภท	แหล่งปล่อย	หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ e/year)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)	ค่า EF (Emission Factor)	แหล่งอ้างอิง
หมวดที่ 1 จากการซื้อวัตถุดิบและบริการ	น้ำประปา	m ³	62,333.00	16.05	0.08	0.54	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
	เหล็กเหนียว	kg	1,900,484.75	3,344.85	17.43	1.76	CFP TGO. อ้างอิง
	เหล็กซิลิกอน	kg	123,871.06	812.56	4.23	6.56	JEMAI Pro using Thai Electricity Grid
	เหล็กหล่อ	kg	4,929,003.00	8,074.69	42.08	1.64	TGO (Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a)

ตารางที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ขอบเขตที่ 3 (ทางอ้อมอื่นๆ) ต่อ

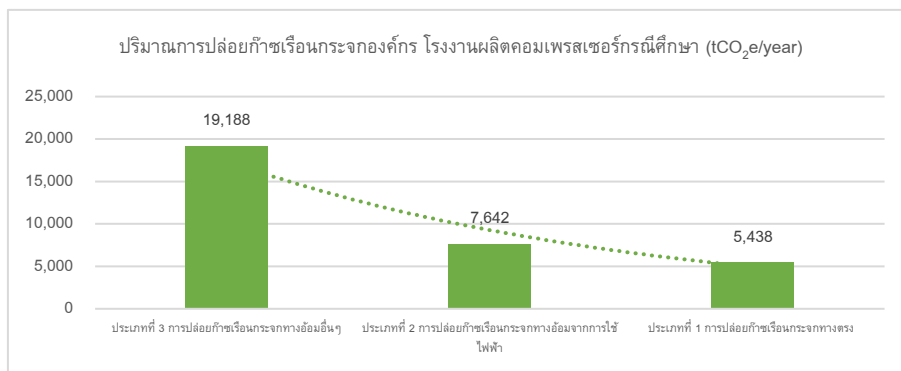
ประเภท	แหล่งปล่อย	หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ e/year)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)	ค่า EF (Emission Factor)	แหล่งอ้างอิง
หมวดที่ 1	ท่อทองเหลือง	kg	2,818,849.00	4,594.16	23.94	1.63	
จากการซื้อวัตถุดิบ	น้ำมันคอม	Lite	446,714.95	98.28	0.51	0.22	TGO, Suttakhunsantikan et al., 2024
และ	แผ่นฟิล์มฉนวน	kg	13,699.27	25.77	0.13	1.88	Thai National LCI Database, TIIS-
บริการ (ต่อ)	การใช้ CO ₂	kg	31,433.00	33.02	0.17	1.05	MTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
	สี	kg	37,504.00	24.94	0.13	0.67	TGO (CFP FY23 072 0458)
	ทินเนอร์	kg	16,604.00	35.24	0.18	2.12	TGO (CFP EF Data v.2.01 ของประเทศไทยปี 2565)
	Coolant	Lite	40,200.00	33.44	0.17	0.83	TGO (Ecoinvent 2.2, IPCC 2007
	ก๊าซไนโตรเจน	kg	3,396,120.00	1,687.87	8.80	0.49	GWP 100a)
หมวดที่ 5	การกำจัดมูลฝอยทั่วไปจากการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น	kg	21,560.00	12.31	0.06	0.57	T-VER-TOOL-02-02 Version1 การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากหลุมฝังกลบขยะมูลฝอยชุมชน
กิจกรรมขององค์กร	การกำจัดขยะอันตรายด้วยการเผาไหม้	kg	556,747.30	285.77	0.04	0.01	Thai National LCI Database, TIIS-MTEC-NSTDA (with TGO

ประเภท	แหล่งปล่อย	หน่วย	ปริมาณ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (tCO ₂ e/year)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)	ค่า EF (Emission Factor)	แหล่งอ้างอิง
							electricity 2016-2018) (CFP)
หมวดที่ 7 จาก	น้ำมันเชื้อเพลิง (รถตู้โดยสาร)	Lite	95,608.27	262.03	1.37	2.74	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
การเดินทาง	น้ำมันเชื้อเพลิง (รถบัส)	Lite		124.10	0.65	2.74	
ของพนักงาน			45,281.26				
ผลรวม			15,286,698.48	7,641.81	100		

จากตารางที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม หมวดที่ 1 การซื้อวัตถุดิบและบริการ คำนวณจากบันทึกปริมาณการสั่งซื้อและการใช้จากหน่วยงานวางแผนการผลิตรวม หมวดที่ 5 การกำจัดของเสียที่เกิดจากการดำเนินงานกิจกรรมขององค์กร ด้วยบันทึกปริมาณน้ำหนัการเกิดของเสีย ถูกนำมาคำนวณ 2 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ การกำจัดมูลฝอยทั่วไปจากการฝังกลบด้วยการส่งผ่านองค์การบริหารส่วนตำบล ปริมาณ 21,560 กิโลกรัม/ปี และการกำจัดขยะอันตราย ได้แก่ วัสดุปนเปื้อน ภาชนะปนเปื้อน สารเคมี ด้วยการส่งกำจัดบริษัทภายนอกด้วยวิธีการเผาไหม้

ส่วนประเภทอื่น ๆ ไม่ถูกนำมาคิด ได้แก่ การกำจัดขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหาร โรงงานจัดส่งให้ชุมชนนำไปเป็นอาหารปลา ไม่มีการนำไปฝังกลบหรือนำมาทำปุ๋ย และการกำจัดของเสียประเภทรีไซเคิล ได้แก่ กระดาษ พลาสติก อะลูมิเนียม เหล็ก และโลหะผสม ส่งจำหน่าย เพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือเป็นวัตถุดิบใหม่ และหมวดที่ 7 การเดินทางของพนักงานด้วยรถโดยสารประเภทรถบัส และรถตู้ที่โรงงานจ้างเหมา แต่ดำเนินการรับผิดชอบค่าเชื้อเพลิง ด้วยการคำนวณระยะทางตามสายรถจากหน่วยงานบุคคลและกิจการทั่วไป หารกับอัตราค่าโดยสารเชื้อเพลิงของรถรับส่ง แบ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทรถตู้โดยสาร และน้ำมันเชื้อเพลิงรถบัสโดยสาร

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรจากกิจกรรมการใช้ทรัพยากรตามโครงสร้างการดำเนินการ พบว่าองค์กรมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 32,268 tCO₂e/ year โดยสัดส่วนการปล่อยสูงสุดคือขอบเขตที่ 3 (การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ) ปริมาณ 19,188 tCO₂e/ year คิดเป็นร้อยละ 59.46 ได้แก่ เหล็กและท่อทองเหลือง รองลงมาคือขอบเขตที่ 2 (การปล่อยทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า) ปริมาณ 7,642 tCO₂e/year คิดเป็นร้อยละ 23.68 และขอบเขตที่ 1 (การปล่อยทางตรง) ปริมาณ 5,438 tCO₂e/year คิดเป็นร้อยละ 16.85 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2

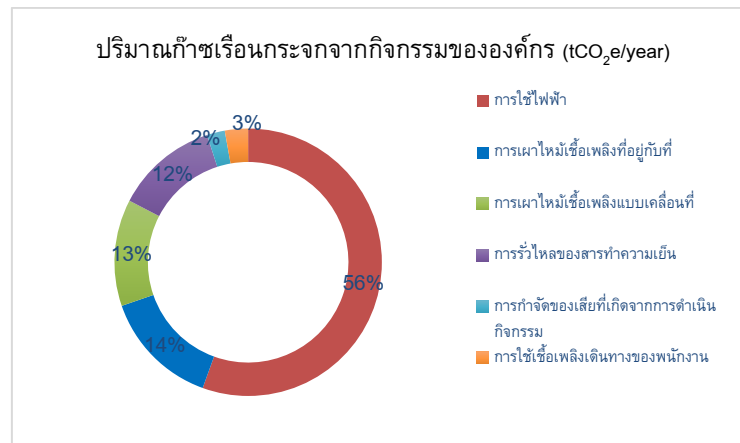


รูปที่ 2 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร โรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์กรณีศึกษา (tCO₂e/year)

สำหรับแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรมาจากกิจกรรมทางอ้อมในห่วงโซ่อุปทาน การจัดหาวัตถุดิบโลหะที่ใช้ในกระบวนการผลิตหลักของคอมเพรสเซอร์ ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก สอดคล้องกับแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรตามมาตรฐานการประเมินก๊าซเรือนกระจกขององค์กร องค์กรต้องแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่อยู่รวมในขอบเขตกิจกรรมการรายงานทั้ง 3 ประเภท แม้ประเภทที่ 3 ทางอบก.อนุโลมให้รายงานตามความสมัครใจขององค์กร เพราะขอบเขตนี้เกี่ยวข้องกับกิจกรรมในห่วงโซ่อุปทานจากผู้ผลิตตามวัฏจักร และอาจจะรายงานซ้ำกับทางโรงงานต้นน้ำที่มีการรายงานปริมาณไปแล้วตามที่เข้าข่าย ทั้งนี้ขึ้นกับอิทธิพลของประเภทที่ 3 ที่มีนัยสำคัญต่อองค์กร [7]

สอดคล้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประเภทที่ 3 จากกิจกรรมการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ขวดแก้วสีชาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม [14] การปล่อยก๊าซเรือนกระจกประเภทที่ 3 จากการได้มาซึ่งวัสดุสำหรับงานหล่อคอนกรีตและงานติดตั้งเหล็กเสริมโรงหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป [15] บริบทของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ยังไม่พบการประเมินก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ส่วนมาก CFP พบว่าอุตสาหกรรมโลหะและเหล็กซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบ [16] และการได้มาซึ่งวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์ในการผลิตคอมเพรสเซอร์ ประเภทที่ 3 [17] เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในประเภทที่ 1 และประเภทที่ 2 มีสัดส่วนสูงกว่า จากขอบเขตกิจกรรมขององค์กรใช้เชื้อเพลิง และไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน ที่ส่งผลต่อปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรง มากกว่าประเภทที่ 3 ต่างจากโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์มีความเฉพาะทางเทคนิคสูง กิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงเน้นไปการผลิต ประกอบชิ้นงาน การใช้วัตถุดิบจากลูกค้าในห่วงโซ่อุปทาน และการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรและอุปกรณ์เป็นหลัก [18], [19] จึงแตกต่างจากอุตสาหกรรมที่เน้นประเมินขอบเขตของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งอาคารสำนักงานเป็นหลัก

เมื่อเทียบกับการใช้ทรัพยากร พลังงาน และการขนส่ง ตามขอบเขตการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร โดยแยกขอบเขตที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อม จากการซื้อวัตถุดิบและบริการออก เทียบเฉพาะกิจกรรมที่องค์กรควบคุมดำเนินการ พบว่ามีการปล่อยพบว่ามีปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรทั้งหมด 13,763.41 kgCO₂e/year โดยการใช้พลังงานไฟฟ้าขององค์กร มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 55.53 ของปริมาณทั้งหมด รองลงมาเป็นการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบอยู่กับที่ คิดเป็นร้อยละ 14.19 และการใช้เชื้อเพลิงเผาไหม้แบบเคลื่อนที่จากการขนส่งภายในองค์กร ร้อยละ 12.89 ตามลำดับ



รูปที่ 3 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการควบคุมดำเนินการขององค์กร

4.2 วิเคราะห์ SWOT โดยบูรณาการ McKinsey 7-S (บริบทภายใน) และ PESTEL (บริบทภายนอก)

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์บริบทขององค์กร

ปัจจัยภายใน / ภายนอก	ปัจจัยบวก	ปัจจัยลบ
ปัจจัยภายใน	Strengths (จุดแข็ง) - องค์กรกำหนดกลยุทธ์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมชัดเจน - ได้รับรองระบบ ISO 9001, 14001, 45001 - มีหน่วยงานดูแลด้านสิ่งแวดล้อม - บุคลากรมีประสบการณ์และผู้บริหารสนับสนุน	Weaknesses (จุดอ่อน) - ไม่มี KPI ลดก๊าซเรือนกระจก และผู้รับผิดชอบคาร์บอนโดยตรง - การเก็บข้อมูล GHG ไม่ต่อเนื่อง - เครื่องจักรเก่า ใช้พลังงานสูง และยังใช้ R22 - ขาดความรู้ด้านคาร์บอนองค์กร
ปัจจัยภายนอก	Opportunities (โอกาส) - มีกลไกรับรองคาร์บอน เพิ่มโอกาสทางการตลาด - ลงทุนพลังงานสะอาดช่วยลดต้นทุนระยะยาว - ผู้บริโภคใส่ใจสิ่งแวดล้อมมากขึ้น - เทคโนโลยีใหม่ช่วยลดการปล่อยคาร์บอน	Threats (อุปสรรค) - มาตรการภาษีคาร์บอน เช่น European Union CBAM - ราคาพลังงานและวัตถุดิบผันผวน - เทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงมีต้นทุนสูง - ภัยธรรมชาติส่งผลต่อการผลิต

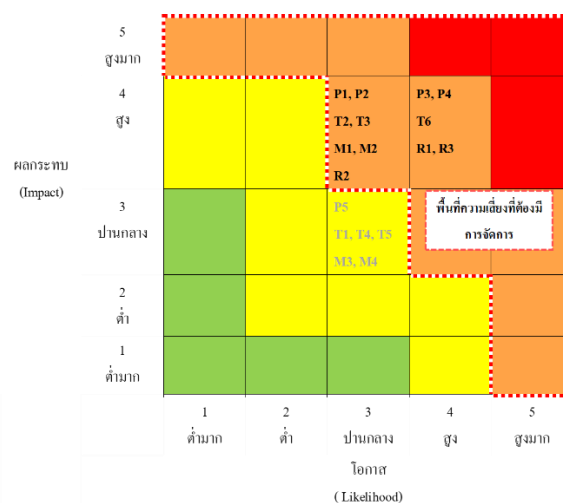
ตารางที่ 4 จากการวิเคราะห์บริบทองค์กรโดยบูรณาการกรอบ McKinsey 7S และ PESTEL พบว่า องค์กรมีความพร้อมในเชิงโครงสร้างและนโยบาย โดยมีการกำหนดกลยุทธ์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน รวมถึงได้รับการรับรองมาตรฐานระบบบริหาร เช่น ISO 9001, ISO 14001 และ ISO 45001 อีกทั้งยังมีหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะ และได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหารระดับสูง อย่างไรก็ตาม องค์กรยังมีข้อจำกัดสำคัญในด้านการบริหารจัดการคาร์บอน เช่น การไม่มีตัวชี้วัดผลการดำเนินงาน (KPI) ด้านการลดก๊าซเรือนกระจก การขาดบุคลากรที่รับผิดชอบด้านคาร์บอนโดยตรง และการจัดเก็บข้อมูลก๊าซเรือนกระจกที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการติดตามและประเมินผลการดำเนินงาน นอกจากนี้ การใช้เครื่องจักรที่มีอายุการใช้งานยาวนานและการใช้สารทำความเย็นประเภท R-22 ยังสะท้อนถึงข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีและประสิทธิภาพพลังงาน

ในด้านปัจจัยภายนอก พบว่า องค์กรมีโอกาสจากแนวโน้มความต้องการสินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและกลไกการรับรองคาร์บอน ซึ่งสามารถสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันในตลาด อย่างไรก็ตาม องค์กรยังต้องเผชิญกับความเสี่ยงจากมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศ เช่น มาตรการปรับคาร์บอนก่อนเข้าพรมแดนของสหภาพยุโรป (CBAM) รวมถึงความผันผวนของราคาพลังงานและวัตถุดิบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างต้นทุนและความสามารถในการแข่งขันในระยะยาว

ซึ่งการวิเคราะห์ SWOT ตามบริบทของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ สามารถระบุความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน (Transition Risks) ตามกรอบ TCFD ได้ 4 ด้าน ได้แก่ นโยบายและกฎหมาย ตลาด เทคโนโลยี และชื่อเสียงองค์กร องค์กรยังมีข้อจำกัดด้านระบบการจัดการข้อมูลก๊าซเรือนกระจก โครงสร้างศักยภาพบุคลากร และเครื่องจักรที่ล้าสมัย ขณะที่ปัจจัยภายนอก ได้แก่ กำแพงภาษี ร่างกฎหมายด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการแข่งขันด้านการตลาดผลิตภัณฑ์คาร์บอนต่ำ ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการปรับตัวขององค์กร ดังนั้น การวิเคราะห์ SWOT จึงเป็นเครื่องมือสำหรับการเชื่อมโยงบริบทขององค์กรสู่การระบุความเสี่ยงเชิงกลยุทธ์ เป็นข้อมูลการประเมินโอกาสและผลกระทบสำหรับการประเมินด้านการเปลี่ยนผ่าน

4.3 การวิเคราะห์ประเมินความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่แนวทางการลดก๊าซเรือนกระจก

การประเมินความเสี่ยงและโอกาสทางธุรกิจของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ จากข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและบริบทองค์กรโดยผู้เชี่ยวชาญภายนอก พบว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภคและผู้ประกอบการตามกระแสเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่าน (Transition Risks) ต่อองค์กรที่ต้องดำเนินการจัดการความเสี่ยงแผนภาพความเสี่ยง (Risk Matrix) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพความเสี่ยง (Risk Matrix) ด้านการเปลี่ยนผ่าน (Transition Risks) ของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์

จากรูปที่ 4 แผนภาพความเสี่ยง (Risk Matrix) พบว่า องค์กรมีความเสี่ยง 12 ประเด็น โดยความเสี่ยงระดับสูงมาก (ผลกระทบ 4 × โอกาสเกิด 4) ได้แก่ ด้านนโยบายและกฎหมาย เทคโนโลยี และชื่อเสียง ดังนี้

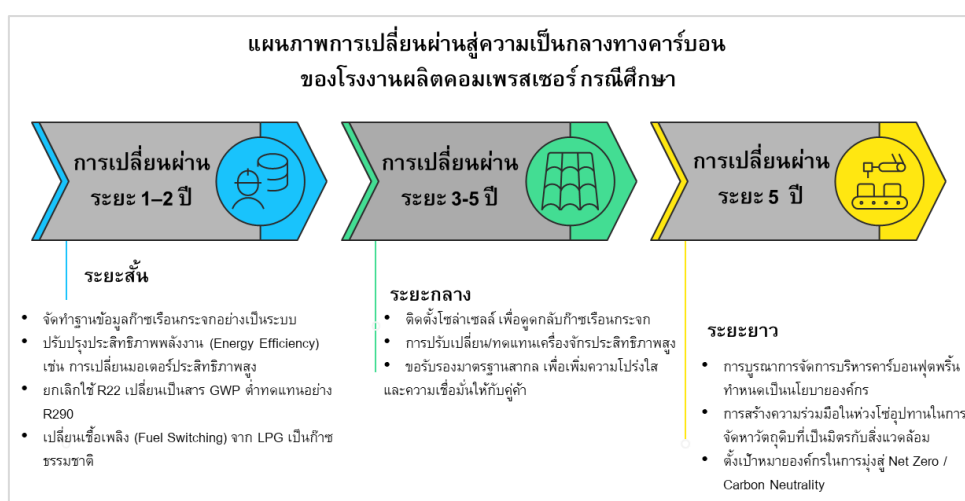
P3 ขาดข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์และตัวชี้วัดชัดเจน เสี่ยงต่อสภาพคล่องธุรกิจ ต้องเตรียมพร้อมรายงานข้อมูลตามกรอบความโปร่งใสขั้นสูง (ETF), P4 บุคลากรและทีมงานขาดความรู้เฉพาะทาง ต้องมีทีมรับผิดชอบตรงและพัฒนาศักยภาพ ลดความเสี่ยงจากแรงกดดันทางกฎหมาย (P2) และติดตามการเปลี่ยนแปลงจาก (P1), T6 การล่าช้าในการเปลี่ยนเทคโนโลยีรองรับมาตรฐานใหม่, R1 การขาดความโปร่งใสด้านข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ R3 ด้านวัฒนธรรมองค์กร

ความเสี่ยงระดับสูง (ผลกระทบ 4 × โอกาสเกิด 3) ครอบคลุมทั้ง 4 ด้าน ได้แก่ (1) ด้านนโยบายและกฎหมาย P1 กำแพงภาษีคาร์บอน ส่งผลกับอุตสาหกรรมปล่อย GHG สูง อาจได้รับผลกระทบทางอ้อม, แรงกดดันด้านกฎหมาย หากเข้าข่ายอยู่ในกลุ่มที่จำเป็นต้องรายงานและได้รับผลทางอ้อมจากการใช้พลังงานสูง (2) ด้านเทคโนโลยี T2 การใช้สารทำความเย็น GWP สูง ต้องหาสารทดแทน, T3 การลงทุนเทคโนโลยีใหม่ขาดงบประมาณสนับสนุน อาจทำให้การลดก๊าซเรือนกระจกล่าช้า มีการแข่งขันสูง (3) ด้านการตลาด M1 อุปสงค์ผู้บริโภคลดลง ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับบรรทัดฐานและกระบวนการที่เป็นมิตรสิ่งแวดล้อม ราคายังคงมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อ M2 ความผันผวนราคาวัตถุดิบ เช่น เหล็ก ทองเหลือง น้ำมัน ส่งผลต่อโครงสร้างต้นทุนและความไม่แน่นอนของตลาด มีโอกาสเกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกด้านเศรษฐกิจและตลาดโลก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วส่งผลกระทบค่อนข้างสูง และถูกกีดกันทางการค้า ต้องติดตามตลาดและผลกระทบจาก P1 (4) ด้านชื่อเสียง R2 ปริมาณการปล่อย GHG สูงและการใช้สารอันตรายจากเครื่องจักรเก่า เมื่อมีการสื่อสารกับลูกค้า และซัพพลายเออร์นั้น ภาพลักษณ์อาจส่งผลกระทบต่อตัดสินใจร่วมลงทุนและความเชื่อถือ

ความเสี่ยงองค์กรด้านการเปลี่ยนผ่าน เกี่ยวข้องกับมาตรการด้านนโยบาย เช่น ภาษีคาร์บอน การปรับตัวด้านเทคโนโลยีและการจัดการข้อมูลคาร์บอน รวมถึงการลงทุนในเทคโนโลยีลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างต้นทุนและรูปแบบการดำเนินธุรกิจในระยะยาว ขณะเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศยังเป็นการคุกคามสำคัญระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคม โดยความถี่และความรุนแรงของเหตุการณ์สภาพอากาศสุดขั้วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียในหลายภาคส่วน โดยเฉพาะกลุ่มเปราะบาง ดังนั้น การประเมินความเสี่ยงจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Risk Assessment: CRA) จึงมีบทบาทสำคัญในการระบุ วิเคราะห์ และจัดลำดับความเสี่ยง เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการวางแผนการปรับตัวอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแนวทางดังกล่าวเน้นการวิเคราะห์ “ห่วงโซ่ผลกระทบ” (impact chains) เชื่อมโยงระหว่างปัจจัยและผลกระทบในบริบทเฉพาะพื้นที่ ควบคู่กับการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อให้การบริหารจัดการความเสี่ยงมีความครอบคลุมและยั่งยืน [20], [21]

4.4 การบริหารจัดการขององค์กร เพื่อตอบสนองการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน

องค์กรควรกำหนดมาตรการสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนเป็นระยะ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน ของโรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์ กรณีศึกษา [22], [23], [24], [25]

มาตรการลดก๊าซเรือนกระจกเหล่านี้ ตอบโจทย์ลดความเสี่ยงสูง ขององค์กรได้ทั้ง 4 ด้าน ด้านนโยบายและกฎหมาย ด้านเทคโนโลยี ด้านการตลาด และด้านชื่อเสียง จากโครงสร้างการบริหารจัดการบุคลากรภายใน ผ่านการกำหนดวิธีการทำงานด้วยหลักการวิศวกรรม ทางปฏิบัติปัจจุบันกรอบการบริหารจัดการความเสี่ยงด้านสภาพภูมิอากาศมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงานเพื่อรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ อย่างบริษัท บีทีเอส กรุ๊ป โฮลดิ้งส์ จำกัด (มหาชน)กำหนดตัวชี้วัดผลการดำเนินงานด้านการลดก๊าซเรือนกระจก (KPI) และมีการรายงานการประเมินความเสี่ยงด้านสภาพภูมิอากาศผ่านเครื่องมือ TCFD รวมถึงการประยุกต์ใช้การกำหนดราคาคาร์บอนภายในองค์กร (Internal Carbon Pricing: ICP) ประเมินและจัดการต้นทุนที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกวางแผนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและช่วยในการตัดสินใจ (ลงทุน จัดซื้อจัดจ้าง การวิจัยและพัฒนา และการดำเนินการ) เพื่อสนับสนุนเป้าหมายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการลดความเสี่ยงและสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [26] ขณะเดียวกันบริษัท บี.กริม เพาเวอร์ จำกัด (มหาชน)ได้รายงานการดำเนินงานด้านความยั่งยืนผ่านรายงาน Sustainability Report โดยมีการบูรณาการกรอบ TCFD ใช้เป็นเครื่องมือในการบริหารต้นทุนและกำหนดทิศทางการลงทุนด้านเทคโนโลยีที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำ [27] และบริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) มีการรายงานการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศผ่าน TCFD Report โดยระบุความเสี่ยงด้านนโยบาย เทคโนโลยี และกลไกด้านราคาคาร์บอนอย่างชัดเจน ด้วยการบูรณาการตัวชี้วัดด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้ากับตัวชี้วัดผลงานขององค์กร (Corporate KPI) ในสัดส่วนประมาณ 10–25% [28]

5. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์และอภิปราย สามารถสรุปผลการศึกษิตตามวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์ที่ 1 พบว่า โรงงานผลิตคอมเพรสเซอร์กรณีศึกษามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก รวม 32,268 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยมีสัดส่วนการปล่อยสูงสุดในขอบเขตที่ 3 รองลงมาคือขอบเขตที่ 2 และขอบเขตที่ 1 ซึ่งแหล่งกำเนิดหลักมาจากการจัดหาวัตถุดิบในห่วงโซ่อุปทานและการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิต

5.2 ผลการศึกษาวัตถุประสงค์ที่ 2 การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน พบว่า องค์กรมีความเสี่ยงสำคัญในด้านนโยบาย เทคโนโลยี ตลาด และชื่อเสียงองค์กร โดยเฉพาะการขาดระบบข้อมูลและตัวชี้วัดด้านก๊าซเรือนกระจก รวมถึงข้อจำกัดด้านบุคลากรและเทคโนโลยี ดังนั้น องค์กรควรกำหนดแนวทางเชิงกลยุทธ์ที่เน้นการพัฒนากระบวนการจัดการคาร์บอน การกำหนดตัวชี้วัด (KPI) การพัฒนาศักยภาพบุคลากร และการลงทุนในเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำ เพื่อรองรับการเปลี่ยนผ่านและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในระยะยาว

6. ข้อจำกัดในการศึกษา

1. งานวิจัยนี้จำนวนผู้บริหารที่ให้สัมภาษณ์มีจำกัด การศึกษาจึงวิเคราะห์เอกสารองค์กรควบคู่เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการวิเคราะห์เชิงยุทธศาสตร์ให้มีความครบถ้วนยิ่งขึ้น
2. เนื่องจากการประเมินความเสี่ยงตามกรอบ Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) ยังมีข้อจำกัดของงานวิจัยรองรับ การศึกษาจึงประยุกต์หลักการดังกล่าวควบคู่กับการวิเคราะห์รายงานความยั่งยืนขององค์กรอื่นเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล

7. ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งถัดไป

1. งานวิจัยนี้เน้นการประเมินในระดับองค์กร (CFO) แต่ความต้องการของตลาดโลกและมาตรการ CBAM เน้นการเรียกเก็บภาษีตามปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย การศึกษาครั้งถัดไปวิเคราะห์วงจรชีวิต (Life Cycle

Assessment: LCA) ของคอมเพรสเซอร์ เพื่อระบุค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วย (Carbon Intensity) ซึ่งจะช่วยให้การวางแผนรับมือกับความเสี่ยงด้านจากกำแพงภาษีได้แม่นยำ

2. การศึกษาผลกระทบทางการเงินในระยะยาว ภายใต้การกำหนดราคาคาร์บอน (Carbon Pricing) จากวัตถุดิบและราคาพลังงาน เพื่อให้ผู้บริหารเห็นภาพความเสี่ยงเชิงปริมาณที่ชัดเจนขึ้น

3. เนื่องจากงานวิจัยพบความเสี่ยงสูงด้านต้นทุนพลังงานและการใช้ LPG ในปริมาณมาก ควรมีการศึกษาความคุ้มค่าของการลงทุนเปลี่ยนผ่านจากระบบเดิมไปสู่เทคโนโลยีใหม่

4. ในประเด็นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยนี้เสนอการใช้สารทำความเย็น R290 (Propane) มาใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจำเป็นต้องพิจารณาข้อจำกัดและปัจจัยด้านความปลอดภัย เนื่องจาก R290 จัดอยู่ในกลุ่มสารทำความเย็นประเภท A3 ซึ่งมีคุณสมบัติไวไฟสูง (High Flammability)

การใช้งาน R290 จึงต้องมีการออกแบบระบบให้สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยสากล เช่น การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล การระบายอากาศที่เหมาะสม และการควบคุมแหล่งกำเนิดประกายไฟ นอกจากนี้ บุคลากรที่เกี่ยวข้องต้องได้รับการฝึกอบรมเฉพาะทางในการจัดการสารทำความเย็นไวไฟ รวมถึงการบำรุงรักษาและการซ่อมแซมระบบอย่างถูกต้อง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] UNFCCC. (n.d.). Nationally Determined Contributions (NDCs). United Nations Framework Convention on Climate Change. Retrieved February 18, 2026, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>
- [2] ชโลธร แก่นสันติสุขมงคล, อนิณ อรุณเรืองสวัสดิ์, และ สิทธิเดช พงศ์กิจวรสิน. (2554). การประเมินผลกระทบจากมาตรการการปรับคาร์บอนก่อนข้ามพรมแดน (Border Carbon Adjustment) และการเตรียมความพร้อมของไทยเพื่อรักษาขีดความสามารถการแข่งขันในการค้าระหว่างประเทศ (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). สถาบันธรรมรัฐเพื่อการพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม.
- [3] สถาบันวิจัยเศรษฐกิจป๋วย อึ๊งภากรณ์. (2565, 4 ตุลาคม). โลกร้อนกับเสถียรภาพระบบการเงิน: ความเสี่ยงที่หลีกเลี่ยงไม่ได้. PIER. Retrieved February 18, 2026, <https://www.pier.or.th/blog/2022/1001/>
- [4] Environmental Protection Agency. (2025). Climate Risks and Opportunities Defined. <https://www.epa.gov/climateleadership/climate-risks-and-opportunities-defined>
- [5] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2560, 6 ธันวาคม). Smart electronics: อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์. สืบค้นเมื่อ 26 มิถุนายน 2568, จาก <https://www.econ.go.th/>
- [6] Land and Houses Bank. (2026, January). Economic and industry analysis 2026: CBAM impact analysis. https://www.lhbank.co.th/getattachment/d4490245-c969-4248-a024-83eef7d982dd/economic-analysis-Economic-and-Industry-Analysis-2026-CBAM-Impact-Analysis_Jan2026
- [7] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2565). แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร.
- [8] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2563). แนวทางการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) (พิมพ์ครั้งที่ 3). <https://ghgreduction.tgo.or.th>
- [9] B2U – Business-to-you. (2017, April 14). SWOT Analysis: Bringing internal and external factors together. Business-to-you. สืบค้นจาก <https://www.business-to-you.com/swot-analysis/>; Sumbane, G. O., Mothiba, T. M., Modula, M. J., Mutshatshi, T. E., & Manamela, L. E. (2023).

- [10] The McKinsey's 7-S model framework for assessment of challenges faced by teachers of children with autism spectrum disorders in the Limpopo province, South Africa. *South African Journal of Childhood Education*, 13(1), a1129. สืบค้นจาก <https://sajce.co.za/index.php/sajce/article/view/1129>
- [11] Environmental Protection Agency. (2025). Climate Risks and Opportunities Defined. สืบค้นจาก <https://www.epa.gov/climateleadership/climate-risks-and-opportunities-defined>
- [12] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). คู่มือการดำเนินงานสู่เป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Journey Guideline version 2023). บริษัท เดอะครีนิก จำกัด.
- [13] สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ. (2565). คู่มือการบริหารความเสี่ยงของสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (ฉบับปรับปรุง ธันวาคม 2565). สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ.
- [14] นวพร เหลืองยวง และ สุพรรณนิกา วัฒนะ. (2565). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเครื่องดื่ม ในการประชุมวิชาการระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 23 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [15] นที สุริยานนท์, และ รัชชานนท์ สุขสวัสดิ์. (2566). คาร์บอนฟุตพริ้นต์องค์กร: กรณีศึกษาโรงหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูป บริษัท กาญจน์กนกพร็อพเพอร์ตี้ จำกัด. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28.
- [16] Juntueng, S., Towprayoon, S., & Chiarakorn, S. (2014). Energy and carbon dioxide intensity of Thailand's steel industry and greenhouse gas emission projection toward the year 2050. *Resources, Conservation & Recycling*, 87, 46–56.
- [17] อลงกต สุดคุณสันติการ, เสรีย์ ตูประกาย, ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช, มงคล รัชชะ, โกวิท สุวรรณหงษ์, และ สิริวัลภ์ เรืองช่วย ตูประกาย. (2567). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากขบวนการผลิตคอมเพรสเซอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม. *วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อม และสุขภาพชุมชน*, 9(1), 1-9.
- [18] Rewlay-ngoen, C., & Papong, S. (2020). Environmental impact assessment of a rotary compressor in Thailand based on life cycle assessment methodology. *SN Applied Sciences*, 2, 1–12. สืบค้นจาก <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03278-w>
- [19] McNelly, M., & Choi, J.-K. (2024). Pathway to decarbonization through industrial energy efficiency: Micro and macro perspectives from compressed air usage. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11, 1575–1591. <https://doi.org/10.1007/s40684-024-00638-4>
- [20] Zebisch, M., et al. (2023). *Climate Risk Sourcebook*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. สืบค้นจาก https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2023/10/giz_2023_Climate_Risk_Sourcebook.pdf
- [21] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2566). คู่มือการดำเนินงานสู่เป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Journey Guideline version 2023). บริษัท เดอะครีนิก จำกัด.
- [22] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2565). แผนระยะยาวการพัฒนาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำของประเทศ ไทย (LT-LEDS ฉบับปรับปรุง). สืบค้นจาก https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Thailand%20LT-LEDS%20%28Revised%20Version%29_08Nov2022.pdf
- [23] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2565). คู่มือการลดก๊าซเรือนกระจกสำหรับประชาชน. สืบค้นจาก <https://hub.mnre.go.th/th/knowledge/detail/65512>
- [24] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2561). *แผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2561–2580 (Energy Efficiency Plan: EEP 2018–2037)*. สืบค้นจาก <https://www.eppo.go.th/images/policy/PDF/EEP2018.pdf>

<http://jeet.siamtechu.net>

- [25] Patel, H., & Prajapati, B. (2021). Performance investigation of R290 as a substitute to R22 refrigeration system. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 10(9). สืบค้นจาก <https://www.ijert.org/research/performance-investigation-of-r290-as-a-substitute-to-r22-refrigeration-system-IJERTV10IS090016.pdf>
- [26] บริษัท บีทีเอส กรุ๊ป โฮลดิ้งส์ จำกัด (มหาชน). (2568). รายงานความยั่งยืนประจำปี 2567/68 (Sustainability Report 2024/25). สืบค้นจาก <https://www.btsgroup.co.th/th/sustainability/sustainability-report>
- [27] บริษัท บี.กริม เพาเวอร์ จำกัด (มหาชน). (2567). รายงานความยั่งยืนประจำปี 2566 (Sustainability Report 2023) และ แนวทางการจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามกรอบ TCFD. สืบค้นจาก <https://www.bgrimpower.com/th/sustainability/sustainability-report>
- [28] บริษัท ปตท.สำรวจและผลิตปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). (2024). รายงานการบริหารจัดการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามกรอบ TCFD (PTTEP TCFD Report 2023). สืบค้นจาก <https://www.pttep.com/th/Sustainability/Climatechangemanagement.aspx>

การเปรียบเทียบผลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากเครื่องวัดแสงที่ได้มาตรฐานและที่ได้จากแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ กรณีศึกษาในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา

COMPARISON OF ILLUMINANCE MEASUREMENTS BETWEEN A STANDARD LUX METER AND A SMARTPHONE APPLICATION: A CASE STUDY OF A SMALL-SCALE GARMENT FACTORY IN PHAYAO PROVINCE

ณัฐพงศ์ ม้าเทศ* ฤทธิจักร สมปาน และพรรณวดี สิงห์แก้ว

Nutthaphong Mated ,Rittikorn Sompan and Pannawadee Singkaew

สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

*Corresponding author, E-mail: Nutnutnut19667@gmail.com

Received: February 24, 2026 Revised: April 8, 2026 Accepted: May 21, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงพรรณนาแบบตัดขวางนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความเข้มแสงสว่างในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็ก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องวัดแสงมาตรฐานกับแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน เพื่อจัดทำแผนผังแสดงระดับแสงสำหรับการบริหารจัดการความปลอดภัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจวัดความเข้มแสงสว่างรวม 24 จุด ตามแนวทางการแบ่งพื้นที่แบบตึกกริด ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มแสงสว่างเฉลี่ยจากเครื่องวัดมาตรฐานเท่ากับ 441.04 ± 296.65 ลักซ์ ในขณะที่แอปพลิเคชันวัดได้เพียง 111.43 ± 64.95 ลักซ์ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) โดยแอปพลิเคชันมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 74.74 และแสดงผลต่ำกว่าความเป็นจริงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วย Bland-Altman Plot ยืนยันความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ โดยพบว่ามีค่าอคติเฉลี่ยเท่ากับ 329.61 ลักซ์ และพบแนวโน้มความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มแสง แผนผังแสดงระดับแสงที่ได้จากแอปพลิเคชันจึงขาดความถูกต้องเชิงตำแหน่งและการกระจายตัว และไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนไม่มีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะใช้ทดแทนเครื่องมือมาตรฐานในการตรวจรับรองความปลอดภัยทางด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรม ตามกฎหมายได้ จึงควรจำกัดการใช้งานเพียงเพื่อการสำรวจเบื้องต้นเท่านั้น เพื่อป้องกันการประเมินความเสี่ยงที่ผิดพลาดอันจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพสายตาของผู้ปฏิบัติงานในระยะยาว

คำสำคัญ: ความเข้มแสงสว่าง แผนผังแสดงระดับแสง แอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน ความสอดคล้องของเครื่องมือสุขศาสตร์อุตสาหกรรม

ABSTRACT

This cross-sectional descriptive study aimed to assess illuminance levels in a small-scale garment factory and compare the performance of a standard light meter with a smartphone application to develop contour map for safety management. A total of 24 measurement points were assessed using a grid-based sampling method. The results revealed that the mean illuminance recorded by the standard light meter was 441.04 ± 296.65 lux, whereas

the smartphone application recorded significantly lower values of 111.43 ± 64.95 lux ($p < .001$). The application exhibited a high mean percentage error of 74.74% and significantly underestimated the actual light intensity. Furthermore, Bland-Altman analysis confirmed a systematic bias, with a mean bias of 329.61 lux and a trend showing increased deviation at higher illuminance levels. Consequently, the illuminance map generated by the application lacked spatial accuracy and distribution precision, failing to reflect actual conditions. This study concludes that smartphone applications currently lack the sufficient precision to replace standard, legally mandated industrial hygiene instruments for safety certification. Their use should be restricted to preliminary surveys only, in order to prevent inaccurate risk assessments that could adversely affect workers' ocular health in the long term.

Keywords: Light intensity, Contour map, Smartphone application, Agreement analysis, Industrial hygiene

1. บทนำ

ความเข้มแสงสว่างถือเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อกิจกรรมในชีวิตประจำวันและมีบทบาทหลักต่อประสิทธิภาพการทำงานของมนุษย์ [1] โดยแสงสว่างที่เหมาะสมจะช่วยรักษาคุณภาพชีวิตและสุขภาพในการทำงานในทางตรงกันข้าม สภาพแวดล้อมที่มีแสงสว่างไม่เหมาะสมย่อมส่งผลกระทบต่อสุขภาพสายตาและระบบประสาท หากแสงสว่างน้อยเกินไปจะบังคับให้กล้ามเนื้อตาทำงานหนักขึ้นเพื่อเปิดรูม่านตาให้กว้างขึ้น ส่งผลให้เกิดอาการเมื่อยล้า ตา น้ำตา ปวดตาและปวดศีรษะ ขณะที่แสงสว่างที่มากเกินไปหรือแสงจ้าจะก่อให้เกิดความไม่สบายตา ตา น้ำตา มีอาการพร่ามัว กล้ามเนื้อหนังตากระตุก และนำไปสู่ความเหนื่อยล้าทางจิตใจ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ไม่เพียงแต่ลดสมรรถภาพในการทำงาน แต่ยังเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดอุบัติเหตุในสถานประกอบการ [2]

ข้อมูลจากสถิติการประสบอันตรายหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงานของประเทศไทย ปี 2562 – 2566 สะท้อนให้เห็นความสำคัญของปัญหานี้ โดยพบว่าโรคจากสาเหตุทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับแสง (อาทิ แสงอัลตราไวโอเลต และการรับสัมผัสแสงสว่างที่ไม่เหมาะสม) ยังคงมีอุบัติการณ์อย่างต่อเนื่อง โดยมีลูกจ้างที่ได้รับผลกระทบจนถึงขั้นต้องหยุดงานประเมินเป็นรายปี [3] ปัญหานี้ทวีความรุนแรงยิ่งขึ้นในกลุ่มแรงงานนอกระบบ ซึ่งเป็นกลุ่มที่ภาครัฐยังไม่สามารถคุ้มครองด้านสุขภาพและสวัสดิการได้อย่างทั่วถึง โดยเฉพาะกลุ่มผู้รับงานไปทำที่บ้านที่ต้องเผชิญกับสภาพการจ้างงานที่เสียเปรียบและสภาพแวดล้อมการทำงานที่มีความเสี่ยงสูงโดยขาดสิทธิและการเข้าถึงการตรวจสอบความปลอดภัยตามกฎหมายแรงงาน [4]

ในบริบทของโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กในชุมชนจังหวัดพะเยา กระบวนการทำงานจำเป็นต้องใช้ทักษะการมองในระดับสูง โดยการเพ่งเล็งสายตาผ่านการใช้จักรเย็บผ้าและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อจัดการกับวัสดุที่มีรายละเอียดขนาดเล็ก เช่น เส้นด้ายและเนื้อผ้า ทั้งนี้ยังพบว่าพื้นที่การทำงานส่วนใหญ่มักมีแสงจำกัดและความเข้มแสงสว่างต่ำกว่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนด ตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารจัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 [5] ซึ่งกำหนดให้นายจ้างต้องจัดให้มีการวัดความเข้มแสงสว่างไม่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเพื่อความปลอดภัยของลูกจ้าง

ถึงแม้การตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างจะเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินความเสี่ยงและจัดทำแผนผังแสดงระดับแสง (Contour map) เพื่อการจัดการและดำเนินการด้านความปลอดภัยตามกฎหมาย [5] แต่ในปัจจุบันด้วยข้อจำกัดด้านงบประมาณและการเข้าถึงเครื่องมือมาตรฐานของโรงงานขนาดเล็ก จึงมีความพยายามนำแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนมาใช้ในการตรวจวัดระดับแสงอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ยังขาดหลักฐานทางวิชาการที่ยืนยันความถูกต้องแม่นยำของแอปพลิเคชันเหล่านี้เมื่อเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานในบริบทของอุตสาหกรรมเย็บผ้า ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะประเมินความเข้มแสงสว่างและทดสอบความเที่ยงตรงของเทคโนโลยีดังกล่าว เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงพื้นที่การทำงานและจัดทำข้อเสนอแนะในการควบคุมป้องกันอันตรายจากแสงสว่างที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับบริบทของโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กในชุมชนอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างในสภาพแวดล้อมการทำงานในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา

2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างที่ได้จากเครื่องวัดแสงที่ได้มาตรฐานและที่ได้จากแอปพลิเคชันในโทรศัพท์

2.3 เพื่อจัดทำแผนผังแสดงระดับแสงในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาแบบภาคตัดขวาง (Cross-sectional study) ที่ศึกษาในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา เพื่อดำเนินการตรวจวัดและประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างในการทำงานและนำข้อมูลมาจัดทำแผนผังแสดงระดับแสง พร้อมทั้งออกแบบการตรวจวัดระดับความเข้มของแสงสว่าง โดยใช้เครื่องมือทั้ง 2 ประเภท อันได้แก่ เครื่องวัดแสงที่ได้มาตรฐานตามกฎหมายประเทศไทยกำหนด (Lux Meter) และการใช้แอปพลิเคชันในโทรศัพท์ (Light Meter LM-3000) เพื่อตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่าง ทั้งนี้ มีการคำนวณจากขนาดของพื้นที่ในโรงงานเย็บผ้าและนำมาจัดแบ่งพื้นที่โดยการตีกติ

3.1 กลุ่มตัวอย่าง

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา โดยวางแผนการตรวจวัดให้ครอบคลุมในพื้นที่เย็บผ้า และในพื้นที่กองผ้า ทั้งนี้ ได้ดำเนินการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างรวมทั้งหมด 24 จุด แบ่งการตรวจวัดซ้ำเป็น 3 ครั้ง เพื่อได้ค่าแสงที่ได้คุณภาพและนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละจุด

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

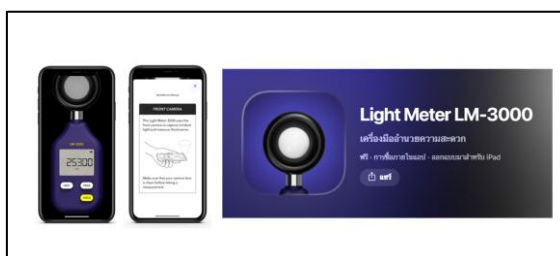
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างในพื้นที่การทำงาน คือ เครื่องวัดแสง (Lux Meter) ยี่ห้อ EXTECH รุ่น 407026 หมายเลขเครื่อง (Serial Number) A.067462 มาตรฐานเครื่อง CIE 1931 ซึ่งเครื่องมือที่ใช้เป็นไปตามมาตรฐาน ตามแนวทางการตรวจวัดและประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงานและการดำเนินการตามพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 [2] ทั้งนี้ เครื่องวัดแสงยังถือว่ามีความแม่นยำสูงในการตรวจวัดและการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับแสง ดังรูปที่ 1 ทั้งนี้ เครื่องวัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยยังมีระบบเซนเซอร์และการตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Sensor and Spectral Response) และใช้เซนเซอร์แบบ Precision Photo Diode ร่วมกับตัวกรองสี (Color Correction Filter) ซึ่งออกแบบให้มีการตอบสนองต่อแสงตามมาตรฐาน C.I.E. Photopic Curve ที่มีความใกล้เคียงกับการมองเห็นของดวงตามนุษย์ และมีระบบ Cosine Correction เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากแสงตกกระทบในมุมเฉียง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการตรวจวัดแสงสว่างภายในโรงงานเย็บผ้าที่มีแหล่งกำเนิดแสงจากหลายทิศทาง โดยช่วงการวัดและความละเอียด (Measurement Range and Resolution): ตัวเครื่องรองรับการวัดความเข้มแสงในหน่วย ลักซ์ (Lux) และฟุตแคนเดิล (Foot-candle) โดยแบ่งช่วงการวัดออกเป็น 3 ระดับ (2,000 / 20,000 / 50,000 Lux) ครอบคลุมความต้องการตามมาตรฐานแสงสว่างในสถานประกอบการ มีความละเอียดสูงสุดที่ 1 Lux และมีค่าความแม่นยำ (Accuracy) อยู่ที่ $\pm (5\% + 2 \text{ digits})$ ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยทางอาชีวอนามัย [8], [9]

รวมทั้ง ผู้วิจัยได้ดำเนินการให้สอดคล้องเป็นไปตามประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2561 [6]



รูปที่ 1 เครื่องวัดแสง (Lux Meter) รุ่น EXTECH รุ่น 407026

3.2.2 การใช้แอปพลิเคชันในโทรศัพท์ Light Meter LM-3000 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสงสว่าง สำหรับสมาร์ทโฟน (iOS) โดยใช้โทรศัพท์ iPhone 13 เป็นสมาร์ทโฟนจาก Apple ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แอปพลิเคชันในโทรศัพท์ Light Meter LM-3000

3.3 ขั้นตอนในการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.3.1 การสำรวจเบื้องต้น เป็นการสำรวจพื้นที่การทำงานของโรงงานทั้งหมด เพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้น โดยการเดินสำรวจบริเวณพื้นที่ภายใน (Walk through survey) [6] และดำเนินการจดบันทึกรายละเอียดของผู้ปฏิบัติงานที่ได้รับแสงสว่างในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงาน รวมถึงลักษณะแสงที่เกิดขึ้น และระยะเวลาการสัมผัสความเข้มแสงสว่าง พร้อมทั้งพิจารณาข้อมูลสภาพแวดล้อมในการทำงาน อีกทั้ง การวางผังของหลอดไฟ การศึกษาอุปกรณ์คุ้มครองความปลอดภัยส่วนบุคคล รายละเอียดพื้นที่ กระบวนการผลิต ขนาด แผนผังการจัดวางเครื่องจักร และสภาพของเครื่องจักรที่ใช้เย็บผ้า

3.3.2 วางแผนกำหนดจุดตรวจวัดระดับแสงในกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 3 จะดำเนินการโดยการตีกริดในพื้นที่จริง โดยใช้ตลับเมตร (Tape measure) ซึ่งกำหนดระยะการตรวจวัด โดยทำการแบ่งพื้นที่ทุกระยะ 6.5 ฟุต หรือแบ่งพื้นที่ให้มีขนาดความห่างประมาณ 2 เมตร และทำการตรวจวัดแสงตรงจุดตัดของตารางที่ทำการตีกริดไว้ [7] ทั้งนี้ การแบ่งพื้นที่แบบตีกริดขนาด 2x2 เมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้จุดตรวจวัดที่เป็นตัวแทนของพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ ครอบคลุมบริเวณการทำงานทั้งหมดตามหลักมาตรฐานการตรวจวัด และเพื่อให้ได้ข้อมูลความละเอียดของพิกัดที่เพียงพอต่อการนำไปสร้างแผนผังแสดงระดับแสง (Contour map) ที่มีความแม่นยำ โดยรวมแล้วมีจุดการตรวจวัดทั้งหมดจำนวน 24 จุด อีกทั้งได้ติดตั้งหลอดไฟในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4

3.3.3 วิธีการตรวจระดับแสงเพื่อนำผลมาวิเคราะห์และจัดทำแผนผังแสดงระดับแสง ซึ่งก่อนเริ่มการตรวจวัดต้องปรับให้เครื่องวัดแสงอ่านค่าที่ศูนย์ (Photometer Zeroing) [4] เพื่อปรับเทียบความถูกต้องและให้เครื่องเกิดความแม่นยำในการตรวจวัดมากขึ้น โดยการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างบริเวณพื้นที่ทั่วไป ตามหลักรูปแบบของการตรวจวัดแสงแบบพื้นที่ (Area Illuminance Measurement) อีกทั้ง จะดำเนินการตรวจวัดในแนวระนาบสูง

จากพื้น 75 เซนติเมตร โดยวัดค่าความเข้มของแสงสว่างทุกๆ 2 x 2 ตารางเมตร ตรวจวัดจำนวน 3 ครั้ง และวัดไปตามแนวระดับการตีกริดตามแถว ดังรูปที่ 5

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้

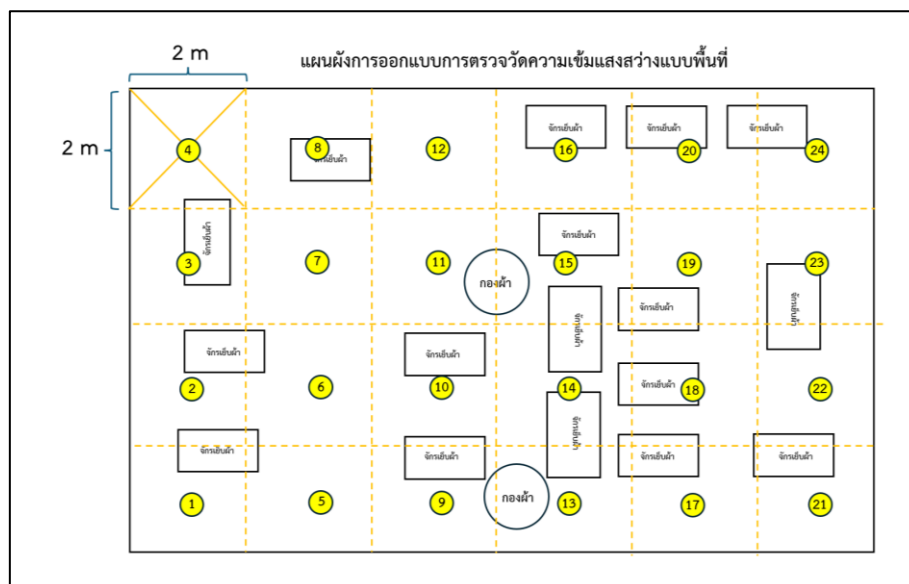
ภายหลังจากการรวบรวมข้อมูลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่าง ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (SPSS version 21) และโปรแกรมสำหรับการประมวลผลเชิงพื้นที่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ผู้วิจัยใช้ สถิติค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ในการอธิบายระดับความเข้มแสงสว่างเฉลี่ยในแต่ละจุดตรวจวัด รวมทั้งคำนวณหาร้อยละของความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) ระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานและแอปพลิเคชันในโทรศัพท์

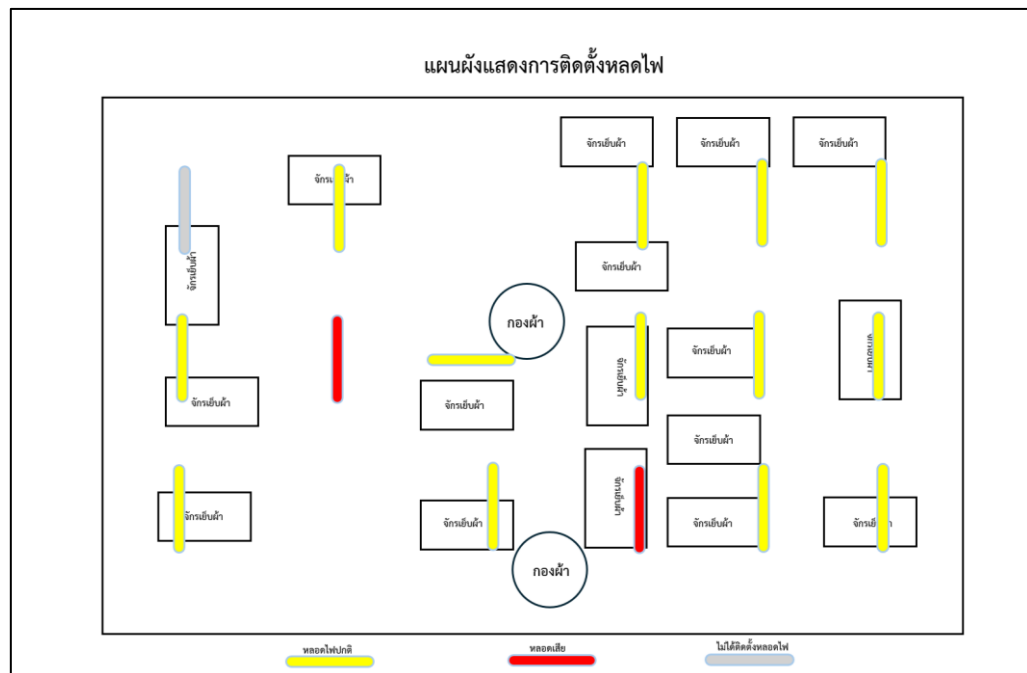
3.4.2 สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) ผู้วิจัยใช้ สถิติทดสอบทีแบบจับคู่ (Paired Samples T-Test) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มแสงสว่างที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวัดแสงมาตรฐานและแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($p < .05$)

3.4.3 การวิเคราะห์ความสอดคล้องของเครื่องมือ (Agreement Analysis) ผู้วิจัยใช้ สถิติ Bland-Altman Plot ในการประเมินความสอดคล้องและตรวจสอบความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ (Systematic Error) ระหว่างเครื่องมือทั้งสองชนิด โดยประเมินจากค่าอคติเฉลี่ย (Mean Bias) และขอบเขตความตกลง (95% Limits of Agreement: LoA)

3.4.4 การจัดทำแผนผังแสดงระดับแสง (Contour Map) ผู้วิจัยนำข้อมูลพิกัดและค่าความเข้มแสงสว่างที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจุดตารางกริด มาประมวลผลและสร้างแผนผังแสดงระดับแสง (Contour Map) ของพื้นที่โรงงานเย็บผ้าโดยใช้โปรแกรม Surfer version 19 เพื่อแสดงลักษณะการกระจายตัวของระดับความเข้มแสงสว่างเชิงพื้นที่ และเปรียบเทียบความแตกต่างด้านประสิทธิภาพการแสดงผลเชิงพื้นที่ระหว่างเครื่องวัดแสงมาตรฐานกับแอปพลิเคชันในโทรศัพท์



รูปที่ 3 วางแผนกำหนดจุดตรวจวัดแสงโดยการตีกริด 2 x 2 ตารางเมตร



รูปที่ 4 ลักษณะการติดตั้งหลอดไฟในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็ก



รูปที่ 5 ลงพื้นที่เก็บข้อมูลโดยการวัดแสงโดยใช้เครื่องวัดแสงที่ได้มาตรฐานและที่ได้จากแอปพลิเคชันในโทรศัพท์

4. ผลการวิจัย

ตารางที่ 1 การประเมินระดับความเข้มของแสงสว่าง (ลักซ์) ในสภาพแวดล้อมการทำงานในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา ระหว่างเครื่องวัดมาตรฐานและแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ (n = 24)

จุดที่ตรวจวัด	เครื่องวัดแสง มาตรฐาน (□) (หน่วย Lux)	SD	แอปพลิเคชัน ในโทรศัพท์ (□) (หน่วย Lux)	SD	ส่วนต่าง (Lux)	ความคลาด เคลื่อน (%)
1	1,399.33	25.10	272.00	12.50	1,127.33	80.56%
2	742.00	15.40	170.00	8.20	572.00	77.09%
3	612.33	12.00	293.33	10.50	319.00	52.10%
4	577.33	11.20	273.33	9.80	304.00	52.66%
5	852.00	18.30	82.00	5.40	770.00	90.38%
6	581.67	10.50	101.67	6.10	480.00	82.52%
7	623.67	14.20	87.67	4.80	536.00	85.94%
8	550.67	11.00	114.67	7.30	436.00	79.18%
9	315.67	8.40	83.33	5.20	232.34	73.60%
10	234.00	6.50	72.00	4.10	162.00	69.23%
11	202.33	5.80	68.67	3.90	133.66	66.06%
12	283.33	7.20	74.00	4.50	209.33	73.88%
13	167.33	4.90	107.67	6.20	59.66	35.65%
14	223.33	6.10	59.67	3.50	163.66	73.28%
15	242.00	7.00	74.67	4.20	167.33	69.14%
16	207.67	5.50	72.33	4.00	135.34	65.17%

จุดที่ตรวจวัด	เครื่องวัดแสง มาตรฐาน (□) (หน่วย Lux)	SD	แอปพลิเคชัน ในโทรศัพท์ (□) (หน่วย Lux)	SD	ส่วนต่าง (Lux)	ความคลาด เคลื่อน (%)
17	351.67	9.20	163.33	8.80	188.34	53.56%
18	271.33	6.80	79.00	4.60	192.33	70.88%
19	261.67	6.50	66.00	3.80	195.67	74.78%
20	282.67	7.40	75.00	4.30	207.67	73.47%
21	381.00	10.10	100.00	6.00	281.00	73.75%
22	222.33	6.30	84.00	4.90	138.33	62.22%
23	249.00	7.10	89.33	5.20	159.67	64.12%
24	253.67	7.00	79.67	4.60	174.00	68.59%
รวมเฉลี่ย	441.04	296.65	111.43	64.95	329.61	74.74%

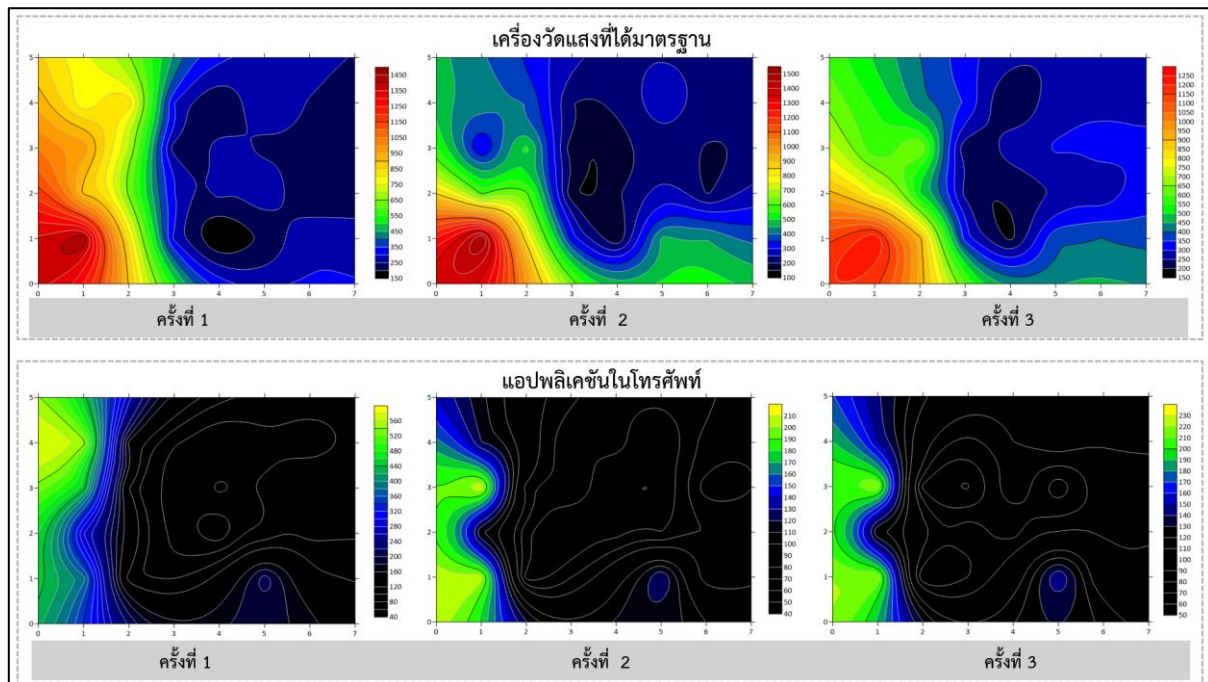
จากตารางที่ 1 พบว่าค่าความเข้มแสงสว่างที่ตรวจวัดได้จากเครื่องวัดมาตรฐานมีค่าสูงกว่าแอปพลิเคชันในโทรศัพท์อย่างมีนัยสำคัญในทุกจุดการตรวจวัด โดยมี ร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 74.74% และในจุดที่ 5 ยังพบค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดถึง 90.38% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) พบว่าแอปพลิเคชันมีค่า SD ที่ต่ำกว่าความเป็นจริงในเกือบทุกจุด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเซนเซอร์ของสมาร์ทโฟนไม่สามารถตรวจจับความผันแปรของความเข้มแสงได้อย่างละเอียดและแม่นยำเท่าเครื่องมือมาตรฐาน ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นชัดเจนว่าการใช้แอปพลิเคชัน LM-3000 ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างรุนแรง (Significant Underestimation) และไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดแทนในการประเมินความปลอดภัยและอาชีวอนามัยในสถานประกอบการ

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มแสงสว่าง (Paired Samples T-Test)

เครื่องมือวัดแสง	N	Mean (Lux)	SD	t	p-value
เครื่องวัดแสงมาตรฐาน (Lux Meter)	24	441.04	296.65	5.561	< .001*
แอปพลิเคชัน (LM-3000)	24	111.43	64.95		

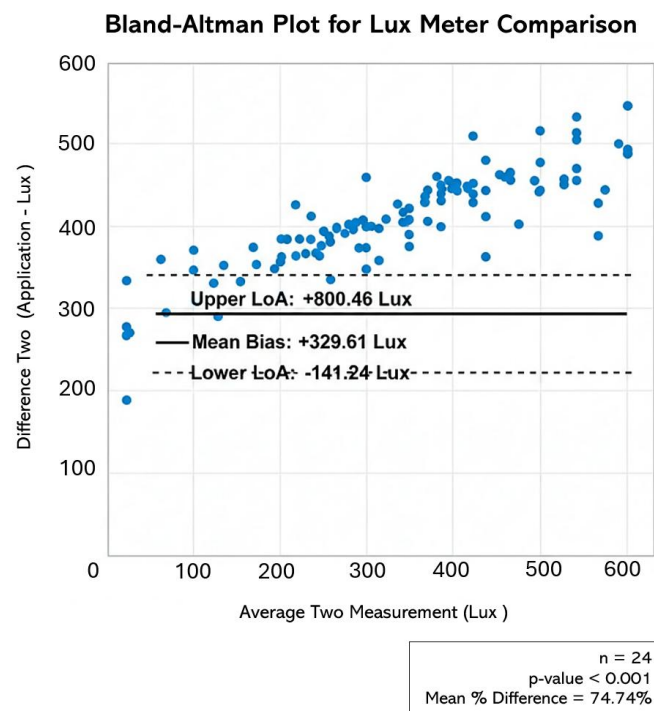
หมายเหตุ: * มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ยความเข้มแสงสว่างที่ได้จากเครื่องวัดแสงมาตรฐาน (Mean = 441.04, SD = 296.65) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับค่าที่ได้จากแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ (Mean = 111.43, SD = 64.95) ที่ระดับ .05 ($t = 5.561$, $p < .001$) โดยค่าที่ได้จากแอปพลิเคชันมีค่าต่ำกว่าเครื่องวัดแสงมาตรฐานอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 6 ผลการจัดทำแผนผังแสดงระดับแสงในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในชุมชนจังหวัดพะเยา

จากรูปที่ 6 เป็นการจัดทำแผนผังแสดงระดับแสง (Contour Map) เพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มแสงในพื้นที่โรงงานเย็บผ้า พบความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยในแผนผังที่ได้จาก เครื่องวัดแสง Lux Meter ที่ได้มาตรฐาน แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ส่วนใหญ่ที่มีความเข้มแสงครอบคลุมตามค่ามาตรฐาน ที่กฎหมายกำหนด มีการไล่เฉดสีที่สะท้อนถึงความสว่างจริงจากแหล่งกำเนิดแสงในพื้นที่ได้อย่างละเอียด ซึ่งในทางตรงกันข้าม แผนผังแสดงระดับแสงที่ได้จากการใช้แอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000 ในการตรวจวัดความเข้มแสงสว่าง แสดงพื้นที่เป็นโทนสีที่บ่งบอกถึงระดับความเข้มแสงต่ำเกือบทั้งหมด (Under-reported intensity) ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงในพื้นที่หน้างาน ลักษณะของแผนผังมีความคลาดเคลื่อนสูงและสูญเสียรายละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Detail) ของการกระจายแสง เนื่องจากเซนเซอร์ของสมาร์ตโฟนมีข้อจำกัดในการรับสัญญาณแสงที่มีความเข้มสูงและความไวต่อช่วงคลื่นแสงที่จำกัด ทั้งนี้ ข้อแตกต่างที่ปรากฏในแผนผังแสดงระดับแสงทั้งสองชุดนี้ ยืนยันว่าการใช้แอปพลิเคชันในโทรศัพท์มีอิทธิพลให้เกิดการแปลความหมายของสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ไม่สอดคล้องกับข้อเท็จจริง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกรวางแผนการบริหารจัดการทางด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย และการบริหารจัดการระดับแสงสว่างให้เหมาะสมกับสภาวะความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่การทำงาน



รูปที่ 7 กราฟ Bland-Altman แสดงความสอดคล้องระหว่างค่าความเข้มแสงสว่างที่ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดแสง Lux Meter มาตรฐาน และแอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000

ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้อง (Agreement Analysis) ด้วยสถิติ Bland-Altman Plot ดังรูปที่ 7 พบว่าเครื่องมือวัดแสงทั้งสองชนิดมีความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ (Systematic Error) อย่างชัดเจน โดยมีค่าอคติเฉลี่ย (Mean Bias) อยู่ที่ 329.61 ลักซ์ แสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันในโทรศัพท์มือถือมีแนวโน้มในการวัดค่าความเข้มแสงสว่างต่ำกว่าเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Underestimation) ในเกือบทุกระดับของความเข้มของแสงสว่าง และเมื่อพิจารณาขอบเขตความตกลง (95% Limits of Agreement: LoA) พบว่า ค่าความเข้มของแสงสว่างมีช่วงที่กว้าง อยู่ระหว่าง -141.24 ถึง 800.46 ลักซ์ ซึ่งแสดงถึงความผันแปรของส่วนต่างที่สูงเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้ในงานทางด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัยและการเก็บตัวอย่างทางด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรม นอกจากนี้ ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความเข้มแสงเฉลี่ย (Proportional Bias) แสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันจะมีความคลาดเคลื่อนรุนแรงมากขึ้นเมื่อนำไปใช้ในบริเวณที่มีความสว่างสูง ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า แอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000 มีความเที่ยงตรง (Accuracy) ต่ำ และไม่สามารถนำมาใช้ตรวจวัดทดแทนเครื่องมือมาตรฐานในการประเมินสภาวะแวดล้อมในการทำงานตามเกณฑ์มาตรฐานทางกฎหมายได้

5. อภิปรายผล

จากการศึกษาเปรียบเทียบผลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างระหว่างเครื่องวัดแสง Lux Meter มาตรฐาน และแอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000 กรณีศึกษา ในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็ก มีนัยสำคัญและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัย ซึ่งนำมาอภิปรายผลได้ดังนี้

5.1 ความเที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

ผลการศึกษาพบว่าแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนให้ค่าความเข้มแสงต่ำกว่าเครื่องวัดมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงถึง 74.74% อีกทั้งผลจากกราฟ Bland-Altman ที่พบค่าอคติเฉลี่ย (Mean Bias) สูงถึง 329.61 ลักซ์ เป็นการยืนยันถึงความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากสมาร์ทโฟนไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานทางมาตรวิทยาหรือการตรวจวัดแสงโดยเฉพาะ โดยทั่วไปเซนเซอร์แสง (Ambient Light Sensor) ในโทรศัพท์ที่มีหน้าที่หลักเพื่อปรับความสว่างหน้าจออัตโนมัติเท่านั้น ต่างจากเครื่องวัดแสงมาตรฐานที่มีระบบ Cosine Correction และ Color Correction Filter เพื่อกรองแสงให้ใกล้เคียงกับการมองเห็นของมนุษย์ตามมาตรฐาน CIE (International Commission on Illumination) [13] ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของราดา แก้วประเสริฐ, 2565 [10] ที่กล่าวว่า แอปพลิเคชันสำหรับวัดแสงสว่างมีข้อจำกัดในการใช้งานมากมาย โดยเฉพาะกับชนิดของแหล่งกำเนิดแสง หากต้องการวัดให้ได้ค่าที่ถูกต้อง จะต้องเลือกแหล่งกำเนิดแสงในแอปพลิเคชันให้ตรงกับการใช้งานจริง

5.2 ผลกระทบต่อการประเมินความเสี่ยงและแผนผังแสดงระดับแสง (Contour Map)

แผนผังแสดงระดับแสง (Contour Map) ที่ได้จากแอปพลิเคชันแสดงพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นระดับแสงต่ำ (Under-reported intensity) และยังพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปแบบ Proportional Bias ที่พบในงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Roberts et al., 2016 [12] ซึ่งระบุว่าค่าความสว่างที่สูงเกินความสามารถของเซนเซอร์สมาร์ทโฟนจะทำให้ผลการวัดเข้าสู่จุดอิ่มตัว (Saturation) หรือเกิดความเบี่ยงเบนจากค่าจริงอย่างมีนัยสำคัญ

5.3 ข้อจำกัดในการใช้ทดแทนตามกฎหมาย

เมื่อพิจารณาตามกฎหมายกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน เกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559 และประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ ที่ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2561 [5], [6] พบว่าแอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000 ไม่สามารถนำมาใช้ตรวจวัดเพื่อรับรองผลอย่างเป็นทางการตามกฎหมายได้ เนื่องจากแอปพลิเคชันดังกล่าวยังขาดความเที่ยงตรงและความแม่นยำ (Accuracy) ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานสากล ซึ่งกำหนดให้เครื่องมือวัดแสงที่ใช้ในงานทางด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรมต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ ± 5 สำหรับเครื่องวัดแสงขั้นคุณภาพสูง (CIE, 2014; JIS, 2006) [14], [15] ในขณะที่ผลจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าแอปพลิเคชันมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมอย่างมาก

ดังนั้น การนำแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนมาใช้จึงเหมาะสมเพียงเพื่อการสำรวจเบื้องต้น (Screening Survey) เท่านั้น แต่ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการจัดทำแผนผังแสดงระดับแสงเพื่อการรับรองความปลอดภัยหรือการประเมินสภาวะแวดล้อมในการทำงานตามเกณฑ์มาตรฐานทางกฎหมายได้ ซึ่งข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ International Labour Organization (2020) [11] ที่ให้ความสำคัญเป็นลำดับแรก ของการใช้เครื่องมือตรวจวัดสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ผ่านการสอบเทียบตามมาตรฐานสากล (Calibration) เพื่อการคุ้มครองสุขภาพและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในกลุ่มแรงงานนอกระบบที่มักมีความเสี่ยงจากการเข้าถึงเครื่องมือมาตรฐานที่จำกัด

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงสว่างที่ตรวจวัดได้จริงในพื้นที่เย็บผ้า พบว่ามีหลายจุดที่ยังไม่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ ณัฐพงศ์ ม้าเทศ, 2568 [16] ที่ระบุว่าการประเมินความเข้มแสงสว่างในสถานประกอบกิจการต้องดำเนินการให้เป็นไปตามมาตรฐานของกฎหมาย เพื่อนำไปสู่การกำหนดมาตรการปรับปรุงหรือแก้ไขพื้นที่การทำงานให้เหมาะสม โดยการตรวจวัดที่แม่นยำจะช่วยในการวางแผนจัดการแหล่งแสงและพื้นที่ทำงานให้เพียงพอต่อการป้องกันอันตรายต่อสุขภาพสายตาของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างแท้จริง

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเปรียบเทียบผลการตรวจวัดระดับความเข้มแสงสว่างในโรงงานเย็บผ้าขนาดเล็กแห่งหนึ่งในจังหวัดพะเยา โดยใช้เครื่องวัดแสงมาตรฐาน (Lux Meter) และแอปพลิเคชันในโทรศัพท์ (Light Meter LM-3000) สามารถสรุปผลได้ดังนี้

6.1 การประเมินระดับความเข้มแสงสว่างในพื้นที่ทำงาน

จากการตรวจวัดทั้งหมด 24 จุด พบว่าระดับความเข้มแสงสว่างที่วัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 441.04 ลักซ์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กฎหมายกำหนดสำหรับงานเย็บผ้า แต่เมื่อพิจารณาจากแผนผังแสดงระดับแสง พบว่ามีการกระจายตัวของแสงที่ไม่สม่ำเสมอในบางพื้นที่ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงาน

6.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด

ผลการเปรียบเทียบพบว่า แอปพลิเคชันในโทรศัพท์เกิดค่าคลาดเคลื่อนที่เกินจริง โดยมีค่าเฉลี่ยเพียง 111.43 ลักซ์ ซึ่งต่ำกว่าค่าจริงจากเครื่องมือมาตรฐานถึง 329.61 ลักซ์ (คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 74.74%) สอดคล้องกับผลสถิติ Paired Samples T-Test ที่ยืนยันความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) และผลจาก Bland-Altman Plot ที่ชี้ให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องกันของเครื่องมือทั้งสองชนิด โดยพบว่ายิ่งระดับความเข้มแสงสูงขึ้น แอปพลิเคชันยังมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้น

6.3 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่า แอปพลิเคชัน Light Meter LM-3000 ในโทรศัพท์สมาร์ทโฟนไม่มีคุณภาพและความเที่ยงตรงเพียงพอ ที่จะใช้เป็นเครื่องมือทดแทนเครื่องวัดแสงมาตรฐานในการประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงานตามกฎหมายได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเซนเซอร์ที่ไม่ได้มาตรฐาน CIE [14]

ดังนั้นผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงาน ที่จะต้องใช้เครื่องมือทางด้านสุขศาสตร์อุตสาหกรรมในการเก็บตัวอย่าง และผู้ที่มีหน้าที่บริหารจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พิจารณากำหนดนโยบายการตรวจวัดความเข้มแสงสว่างโดยยึดหลักมาตรฐานวิทยาศาสตร์ที่สำคัญ โดยควรหลีกเลี่ยงการใช้แอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟนเพื่อการตัดสินใจในระบบการจัดการความปลอดภัยและอาชีวอนามัย ทั้งนี้ เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพการวัดสากล อีกทั้ง การประเมินเพื่อรับรองสถานะการทำงานจะต้องใช้เครื่องมือมาตรฐานที่ได้รับการสอบเทียบประจำปีจากห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) และความเที่ยงของเครื่องมือ (Precision) ตามที่กฎหมายกำหนด ซึ่งการใช้แอปพลิเคชันควรจำกัดขอบเขตอยู่เพียงในขั้นตอนการสำรวจเบื้องต้นเท่านั้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดเชิงระบบในการประเมินความเสี่ยงซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพสายตาและสมรรถภาพในการทำงานของผู้ปฏิบัติงานในระยะยาว

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พีรพล ภูแย้ม, เสรีย์ ตู๊ประกาย, วัฒนา จันทะโคตร และมงคล รัชชะ, “การประเมินระดับแสงสว่างภายในอาคารศูนย์ฝึกอบรม”, วารสารอนามัยสิ่งแวดล้อมและสุขภาพชุมชน, 8(3), 2566. หน้า 27-33.
- [2] กองความปลอดภัยแรงงาน. (2569, มกราคม. 15). แนวทางการตรวจวัดและประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงาน และการดำเนินการตามพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา:
https://osh.labour.go.th/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=27&Itemid=220

- [3] สำนักงานกองทุนเงินทดแทน สำนักงานประกันสังคม กระทรวงแรงงาน (2569, มกราคม. 13). สถานการณ์การประสบอันตรายหรือเจ็บป่วย เนื่องจากการทำงาน ปี 2562 – 2566 [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/1675d2a95c38687dd649989003beb08a.pdf
- [4] สุวิทย์ อินนามมา, “แรงงานนอกระบบ วิถีชีวิตการทำงาน การดูแลสุขภาพและสังคม กรณีศึกษากลุ่มเย็บผ้าตำบลบ้านเม็ง อำเภอนองเรือ จังหวัดขอนแก่น”, *วารสารวิจัยสาธารณสุขศาสตร์*, 4(3), 2553. หน้า 379-392.
- [5] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, “กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและ สภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559”, ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเมื่อวันที่ 17 ตุลาคม 2559, เล่ม 133 ตอนที่ 91 ก.
- [6] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน, “ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัดและการวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้อง ดำเนินการ”, ประกาศในราชกิจจานุเบกษาเมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2561, เล่ม 135 ตอนพิเศษ 57 ง.
- [7] ณัฐพงศ์ ม้าเทศ, ปุณณิสา ผุดผ่อง, พรณวดิ สิงห์แก้ว และรัชกร ช่งกุล “การตรวจวัดและวิเคราะห์สภาวะการทำงานเกี่ยวกับเสียงและการจัดทำแผนผังแสดงระดับเสียงในโรงงานผลิตแผ่นป้ายแท็กและทรานส์ฟอนเดอร์ จังหวัดลำพูน”, *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม*, 11(1), 2567. หน้า 68-77.
- [8] Extech Instruments. (2023). *User Manual: Heavy Duty Light Meter with PC Interface Model 407026*. FLIR Commercial Systems. [Online]. Available: [Extech Official Website].
- [9] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2022). *Section III: Chapter 7 - Industrial Hygiene: Lighting*. In OSHA Technical Manual (OTM).
- [10] ราดา แก้วประเสริฐ. (2565). (2569, มกราคม. 30). เราสามารถใช้ Smart Phone วัดแสงสว่าง ได้หรือไม่?. *METROLOGY info*, 24(W1), 1-6. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://mx.nimt.or.th/>
- [11] International Labour Organization. (2020). *Safety and health at the heart of the future of work: Building on over 100 years of experience*. ILO.
- [12] Roberts, I., et al. (2016). Assessment of smartphone apps for measuring light levels in the workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(12), 945-952.
- [13] International Commission on Illumination. (2019). *CIE S 008/E:2019: Lighting of Work Places - Part 1: Indoor* (2nd ed.). CIE.
- [14] International Commission on Illumination. (2014). *CIE S 023/E:2013: Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters*. CIE.
- [15] Japanese Industrial Standards. (2006). *JIS C 1609-1: Illuminance meters Part 1: General measuring instruments*. Japanese Standards Association.
- [16] ณัฐพงศ์ ม้าเทศ, ดารินทร์ วีระชัย, ชลธิชา มุ่งดี, ธนาพร เทียมใจ, จิราภรณ์ ลาพิงค์, รมีดา อุประ และฤทธิติกร สมปาน, “การเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างจากนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟและประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท”, *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม*, 12(2), 2568. หน้า 37-49.

การศึกษาอัตราส่วนตัวประสานมันสำปะหลังที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและประสิทธิภาพ
เชิงความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลผสมกะลามะพร้าว

A STUDY ON THE EFFECT OF CASSAVA BINDER RATIO ON THE HEATING VALUE AND THERMAL EFFICIENCY OF BIOMASS AND COCONUT SHELL FUEL BRIQUETTES

ยุทธชัย จารุจิตร* และตั้งเฮง ยนต์สติดิกุล

Yuttachai Jarujitr* and Thanghang Yonsatidkun

สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์

Branch Automotive Engineering Department Engineering, Tel. 044-955121

*Corresponding author E-mail: yuttachai52@gmail.com

Received: February 5, 2026 Revised: May 30, 2026 Accepted: June 17, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพเชิงความร้อนชีวมวล โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน และมีถ่านกะลามะพร้าวและชีวมวลเป็นส่วนประกอบหลัก ทำการทดลองโดยแปรผันอัตราส่วนผสมของ ตัวประสาน : ชีวมวล : ถ่านกะลามะพร้าว และกำหนดอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวประสานต่อน้ำ (B:W) ที่ระดับ 90:10 และ 80:20 เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter ตามมาตรฐาน ASTM และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการต้มน้ำ ผลการทดลองพบว่า ค่าความร้อนและประสิทธิภาพการใช้ความร้อนมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณชีวมวล และพบว่าอัตราส่วนตัวประสานต่อน้ำที่ 90:10 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าอัตราส่วน 80:20 ในทุกสัดส่วนผสม โดยอัตราส่วนผสมที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ 1.5 : 6 : 1 (ตัวประสาน : ชีวมวล : ถ่านกะลามะพร้าว) ที่ความเข้มข้นตัวประสาน 90:10 ซึ่งให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 21.43 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนสูงสุดที่ร้อยละ 30.55 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของส่วนผสมมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางความร้อน และสูตรดังกล่าวมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

คำสำคัญ : แท่งเชื้อเพลิงชีวมวล แป้งมันสำปะหลัง ค่าความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

Abstract

The objective of this study was to investigate the properties and thermal efficiency of biomass fuel briquettes using cassava starch as a binder, with biomass and coconut shell charcoal as primary components. The experiment involved varying the mixing ratios of Binder : Biomass : Coconut Shell Charcoal, and setting the Binder-to-Water (B:W) concentration ratios at 90:10 and 80:20. The heating values were analyzed using an Oxygen Bomb Calorimeter in accordance with ASTM standards, and thermal efficiency was evaluated through water boiling tests. The results indicated that both heating value and thermal efficiency were directly correlated with the quantity of biomass. Furthermore, the B:W ratio of 90:10 consistently yielded higher performance compared to the 80:20 ratio across all mixing proportions. The optimal mixing ratio was found to be 1.5 : 6 : 1 (Binder : Biomass : Coconut Shell Charcoal) with a B:W ratio of 90:10. This formulation provided the maximum heating value of 21.43 MJ/kg and the highest thermal efficiency of 30.55%. These findings demonstrate that the proportion of ingredients

significantly affects thermal properties, and the identified formula shows potential for development as a high-efficiency biomass fuel briquette.

Keywords : Biomass Fuel Briquettes, Cassava Starch, Heating Value, Thermal Efficiency

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการดำรงชีวิต โดยเฉพาะในระดับครัวเรือนที่นิยมใช้ "ถ่านไม้" เป็นเชื้อเพลิงหลักในการประกอบอาหาร เช่น การนึ่ง ปิ้ง ย่าง และทอด ซึ่งต้องใช้ความร้อนต่อเนื่องเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตาม แหล่งวัตถุดิบหลักอย่างไม้พื้นเริ่มประสบปัญหาขาดแคลนจากการบุกรุกทำลายป่า ส่งผลให้ถ่านไม้ในท้องตลาดมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ แนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนจึงได้รับความสนใจ เพื่อลดต้นทุนและลดปัญหามลภาวะจากการกำจัดขยะชีวมวล การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและขยะจากครัวเรือนมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในการจัดการขยะและสร้างมูลค่าเพิ่ม[11]

วิวัฒนาการของการผลิตถ่านอัดแท่งได้พัฒนาจากการใช้วิธีการทำด้วยมือ มาสู่การใช้เครื่องจักรเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต โดยทั่วไปกระบวนการอัดขึ้นรูปแบ่งออกเป็นกระบวนการอัดด้วยไฮดรอลิก (Hydraulic Press) และกระบวนการเอ็กส์ทรูชัน (Extrusion) ซึ่งกระบวนการเอ็กส์ทรูชันแบบ "ฮอตพรีสซิ่ง (Hot Pressing)" แม้จะให้แท่งเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือต้องใช้พลังงานความร้อนและแรงอัดสูง ทำให้มีต้นทุนการผลิตสูง ในขณะที่การ "อัดเย็น (Cold Screw Press)" เป็นทางเลือกที่ต้นทุนต่ำและทำงานได้ต่อเนื่องกว่า แต่ยังคงเผชิญข้อจำกัดทางวิศวกรรมที่สำคัญ (Pain Point) คือ แท่งเชื้อเพลิงมักเปราะแตกง่าย และการใช้ตัวประสานที่มีปริมาณน้ำมากเกินไปจะส่งผลให้มีความชื้นสะสมสูง ซึ่งไปลดทอนค่าความร้อนสุทธิ (Heating Value) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเมื่อนำไปใช้งานจริง[7]

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ตัวประสาน และกรรมวิธีการอัด[8] ได้ศึกษาพบว่าอัตราการผลิตและการต้านทานแรงกดแปรผันตรงกับสัดส่วนโมลาส (กากน้ำตาล) ในขณะที่ พบว่าการใช้วัสดุผสมระหว่างฟางข้าวและแกลบ[2] โดยมีผักตบชวาเป็นตัวประสานในอัตราส่วน 1:3 ด้วยกรรมวิธีอัดเปียก ให้ค่าความร้อนสูงถึง 3,956 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม แต่อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้ยังก่อให้เกิดก๊าซ CO เกินค่ามาตรฐาน นอกจากนี้ การศึกษาการอัดแท่งกากอ้อยผสมกากน้ำตาลด้วยกรรมวิธีอัดเย็น พบว่าให้ค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับไม้พืชนิยบาลิปตัส แต่กระบวนการผลิตยังเผชิญปัญหาความล่าช้าในขั้นตอนการอัด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ส่วนผสมของชีวมวลและถ่านหินเพื่อลดก๊าซเรือนกระจก[3] แต่อย่างไรก็ตาม การเผาไหม้ยังก่อให้เกิดก๊าซ CO เกินค่ามาตรฐาน นอกจากนี้ การศึกษาการอัดแท่งกากอ้อยผสมกากน้ำตาลด้วยกรรมวิธีอัดเย็น พบว่าให้ค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับไม้พืชนิยบาลิปตัส แต่กระบวนการผลิตยังเผชิญปัญหาความล่าช้าในขั้นตอนการอัด นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ส่วนผสมของชีวมวลและถ่านหินเพื่อลดก๊าซเรือนกระจกตลอดจนการศึกษานำชีวมวลมาใช้ร่วมกับถ่านหินในกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification) เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดมลภาวะ[9] รวมถึงมีการศึกษานำสาหร่ายมาผ่านกระบวนการอัดแท่งและคาร์บอนในเซชันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง รวมถึงมีการศึกษานำสาหร่ายมาผ่านกระบวนการอัดแท่งและคาร์บอนในเซชันเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง[1] นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว[4] และการผลิตน้ำส้มควันไม้จากกระบวนการคาร์บอนในเซชันเศษเหลือชีวมวล[13]

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนชนิดของวัสดุตั้งต้นหรือตัวประสานเป็นหลัก ยังขาดการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับอิทธิพลของความเข้มข้นในอัตราส่วนตัวประสานต่อน้ำ (Binder-to-Water Ratio) ในกระบวนการอัดเย็น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการระเหยของความชื้นและค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงเพื่อแก้ปัญหาและเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกระบวนการอัดรูปแบบสกรูอัดเย็น (Cold Screw Press) โดยดึงจุดเด่นของกะลามะพร้าวและขี้เลื่อยเผามาใช้เป็นมวลพลังงานหลัก ร่วมกับการใช้ "แป้งมันสำปะหลัง" เป็นตัวประสาน โดยมีความใหม่ (Novelty) คือ การมุ่งเน้นศึกษาหาจุดสมดุลที่เหมาะสมที่สุดของอัตราส่วนความเข้มข้นระหว่างตัวประสานต่อน้ำ (ที่ระดับ 90:10 และ 80:20) เพื่อขจัดปัญหาความชื้นส่วนเกินที่บั่นทอนค่าความร้อน พร้อมทั้งสร้างแรงยึดเกาะที่แข็งแรง อันจะเป็นแนวทางในการ

ยกระดับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลให้ก้าวข้ามข้อจำกัดเดิม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนได้อย่างยั่งยืน

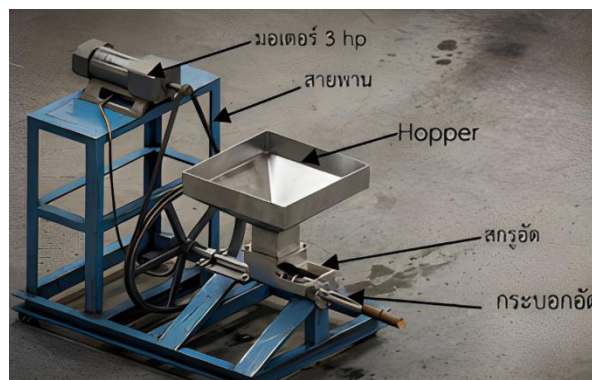
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนผสมระหว่างตัวประสาน (แป้งมันสำปะหลัง) ชีวมวล (ขี้เลื่อยเผา) และถ่าน
กะลามะพร้าว ที่มีต่อความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นในอัตราส่วนตัวประสานต่อน้ำ (Binder-to-Water Ratio) ที่ระดับ 90:10 และ
80:20 ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดเย็น (Cold Screw Press)
3. เพื่อหาอัตราส่วนผสมและสัดส่วนความเข้มข้นของตัวประสานที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Formulation) ที่ให้ค่า
ความร้อนและประสิทธิภาพการใช้งานเชิงความร้อนสูงสุด สำหรับเป็นแนวทางในการพัฒนาเชื้อเพลิงอัดแท่งประสิทธิภาพ
สูงในระดับชุมชนต่อไป

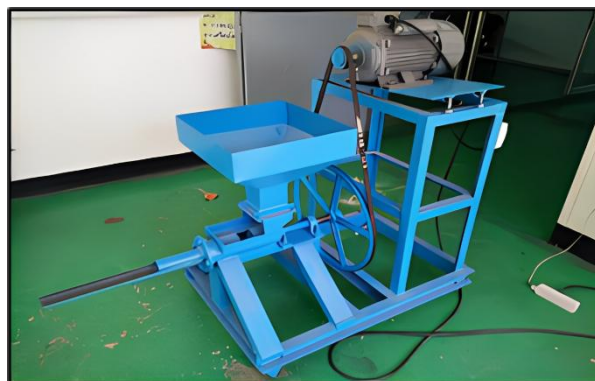
3. ทฤษฎี อุปกรณ์และการทดลอง

3.1 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งชนิดสกรูอัดเย็น

เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแข็งชนิดสกรูอัดที่ใช้ในการศึกษานี้ มีมิติภายนอก (กว้าง x ยาว x สูง) เท่ากับ 65 x 95 x 105 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2 ระบบขับเคลื่อนใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ขนาด 3 แรงม้า ที่ความเร็วรอบสูงสุด 1,475 รอบต่อนาที สำหรับชุดสกรูอัดมีคุณลักษณะทางเรขาคณิตประกอบด้วยเพลากลางรัศมี 20 มิลลิเมตร รัศมีเกลียวบ่อน 25 มิลลิเมตร และระยะพิทช์เกลียว (Screw Pitch) 50 มิลลิเมตร ในกระบวนการขึ้นรูปเพื่อให้ได้แท่งเชื้อเพลิงที่มีความยาวเฉลี่ย 10 เซนติเมตร ใช้ระยะเวลาในการอัดประมาณ 240 วินาที



รูปที่ 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดสกรูอัดเย็น



รูปที่ 2 เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดสกรูอัดเย็น

3.2 วัตถุดิบและตัวประสาน

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุชีวมวลและตัวประสานที่มีคุณสมบัติเหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) ไม้เลื่อย (Sawdust) ไม้เลื่อยเป็นชีวมวลที่เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้หรือโรงเลื่อย ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาอุตสาหกรรมและการผลิตชีวมวลอัดแท่ง นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำไม้เลื่อยไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อาทิ การทำความสะอาดคราบน้ำมัน การใช้คลุมดินแทนหญ้า วัสดุปูรองนอนสำหรับสัตว์เลี้ยง และวัสดุปลูกต้นไม้ เป็นต้น โดยทั่วไปไม้เลื่อยมีคุณสมบัติพื้นฐานทางเชื้อเพลิง ดังนี้ค่าความร้อน (Heating Value) ไม่ต่ำกว่า 2,600 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ความชื้น (Moisture): ประมาณร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้า (Ash): น้อยกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม การนำไม้เลื่อยมาอัดขึ้นรูปโดยตรงจำเป็นต้องใช้กระบวนการอัดร้อน (Hot Pressing) ซึ่งต้องใช้แรงอัดสูงและมีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้น ในกระบวนการแปรรูปไม้เลื่อยสำหรับงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้วิธีการอัดเย็น โดยอาศัย "ตัวประสาน" เข้ามาช่วยในการยึดเกาะ เพื่อลดขนาดของแรงอัดที่ต้องใช้และช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงไม่แตกหักง่าย

(2) กะลามะพร้าว (Coconut Shell) เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สำคัญ โดยเป็นส่วนเปลือกแข็งชั้นในของผลมะพร้าว ในอดีตกะลามะพร้าวถูกมองว่าเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ มักถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนหรือแปรรูปเป็นภาชนะอย่างง่าย เช่น กระบวย หรือถ้วยชามกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติเด่นทางกายภาพ คือ มีความแข็งแรงทนทานสูง เนื้อวัสดุมีความหนาแน่น และสามารถขัดผิวให้เกิดความเงางามได้ดี ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ ปัจจุบันจึงมีการนำกะลามะพร้าวมาเพิ่มมูลค่าผ่านงานหัตถกรรมและอุตสาหกรรมของตกแต่ง เช่น โคมไฟ เครื่องประดับ และเครื่องแต่งกาย สำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำกะลามะพร้าวมาประยุกต์ใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากคุณสมบัติความแข็งแรงและการให้ความร้อนที่ดี

(3) ตัวประสาน (Binder) มีบทบาทสำคัญในการขึ้นรูปแท่งเชื้อเพลิง โดยช่วยประสานอนุภาคของไม้เลื่อยและกะลามะพร้าวเผาให้ยึดเกาะกันแน่น ผู้วิจัยเลือกใช้ แป้งมันสำปะหลัง เป็นตัวประสานหลัก เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น ราคาต้นทุนต่ำ และมีคุณสมบัติในการยึดเกาะ (Adhesion) ที่ดีเยี่ยมเมื่อผ่านความร้อน ซึ่งเหมาะสมต่อการนำมาเตรียมแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล



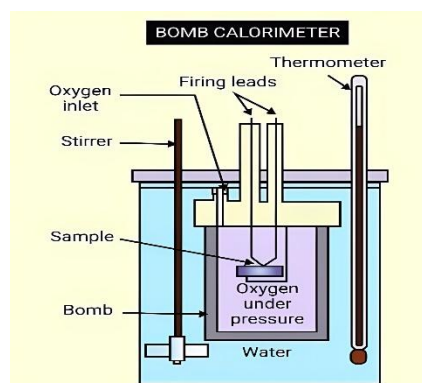
รูปที่ 3 กะลามะพร้าว

3.3 คุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิง

ในการวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนที่สำคัญของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตได้ 2 ประการ ได้แก่ ค่าความร้อน (Heating Value) และประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Thermal Efficiency) โดยมีรายละเอียดวิธีการทดสอบดังนี้

3.3.1 การหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (Heating Value) การหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล ดำเนินการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อนระบบปิด (Oxygen Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ ESSOM โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM มีขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมตัวอย่าง นำตัวอย่างแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐาน มวลประมาณ 1 กรัม บรรจุลงในถ้วยทดลอง (Capsule) และติดตั้งลวดจุดชนวน (Fuse wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร
2. การเตรียมระบบ นำถ้วยตัวอย่างใส่ลงในระเบิด (Bomb) ทำการอัดก๊าซออกซิเจนให้มีความดันภายใน 25-35 บรรยากาศ (atm) เพื่อให้เพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ จากนั้นนาระเบิดลงแช่ในถังน้ำ (Calorimeter bucket) ที่บรรจุน้ำกลั่นปริมาตร 2 ลิตร พร้อมติดตั้งระบบกวนน้ำและเทอร์โมมิเตอร์
3. การทดสอบ เริ่มเดินเครื่องไปกวนน้ำเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อน (Thermal Equilibrium) เป็นเวลาประมาณ 5 นาที พร้อมบันทึกอุณหภูมิเริ่มต้น จากนั้นทำการจุดระเบิด (Ignition) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ บันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 15-30 วินาที ในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และบันทึกต่อเนื่องจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่เป็นเวลา 5 นาที
4. การวิเคราะห์ผล เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบ นำสารละลายที่ตกค้างภายในระเบิดไปไทเทรต (Titrate) ด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ความเข้มข้น 0.0725 N โดยใช้สีน้ำยาเมทิลเรด (Methyl Red) หรือ เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) เป็นอินดิเคเตอร์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความร้อนสุทธิของแท่งเชื้อเพลิงต่อไป



รูปที่ 4 กระบวนการวิเคราะห์พลังงานความร้อนระบบปิด

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Thermal Efficiency)
การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อนำไปใช้งานจริงกับเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง โดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) มีขั้นตอนและสมการคำนวณดังนี้การเตรียมเชื้อเพลิง ใช้แท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นจนแห้งสนิท ปริมาณ 250 กรัม สำหรับแต่ละอัตราส่วนผสมการทดสอบ นำเชื้อเพลิงไปเผาไหม้ในเตาประสิทธิภาพสูงเพื่อต้มน้ำปริมาตร 1,000 กรัม (1 ลิตร) จนกระทั่งน้ำเดือดและเชื้อเพลิงมอดดับการคำนวณ บันทึกค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \left[\frac{m_1 c (T_2 - T_1) + (m_1 - m_2) L}{MH} \right] \times 100 \quad (1)$$

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา (%)

m_1 = มวลของน้ำเริ่มต้น (กรัม)

m_2 = มวลของน้ำที่เหลือหลังจากการต้ม (กรัม)

c = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)

L = ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (cal/g)

T_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ ($^\circ\text{C}$)

T_2 = อุณหภูมิสุดท้ายของน้ำ (จุดเดือด) ($^\circ\text{C}$)

M = มวลของแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ (g)

H = ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (cal/g)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและลำดับการทดลองแสดงรูปที่ 5 โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้



รูปที่ 5 ขั้นตอนการทดลอง

4.1 แผนภาพและขั้นตอนการดำเนินการวิจัย เพื่อให้กระบวนการผลิตและทดสอบแท่งเชื้อเพลิงเป็นไปตามมาตรฐาน ได้กำหนดขั้นตอนการทำงานตามลำดับดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation): นำชี้เลื่อยไม้ไปผ่านเตาเผาชีวมวล (Gasifier Stove) เพื่อให้ได้ชี้เลื่อยเผา และจัดเตรียมกะลามะพร้าวที่ผ่านการบดให้มีขนาดเหมาะสม
2. การเตรียมตัวประสาน (Binder Preparation): ผสมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำในอัตราส่วน B:W (แป้งมันสำปะหลัง ต่อ น้ำ) ที่ระดับ 90:10 และ 80:20 เพื่อปรับสภาพความเหนียว
3. กระบวนการผสม (Mixing Process): นำชี้เลื่อยเผา กะลามะพร้าว และตัวประสาน มาคลุกเคล้าตามอัตราส่วนที่กำหนดให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียว
4. การอัดขึ้นรูป (Briquetting): นำส่วนผสมเข้าเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชนิดสกรูอัดเย็น (Cold Press Briquetting Machine) เพื่ออัดเป็นแท่งทรงกระบอก
5. การอบแห้ง (Drying): นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปลดความชื้นด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (Oven/Sun Drying) จนแห้งสนิท
6. การทดสอบสมบัติ (Testing) นำเชื้อเพลิงอัดแท่งไปทดสอบค่าความร้อน (Heating Value) ด้วยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter และทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency) ด้วยวิธีต้มน้ำ

4.2 การเตรียมวัตถุดิบและข้อมูลค่าความร้อนของส่วนผสม ผู้วิจัยได้คัดเลือกวัตถุดิบโดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและค่าความร้อนพื้นฐาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อนำมารวมกัน ดังนี้

ขี้เลื่อยเผา (Charcoal Sawdust) ขี้เลื่อยปกติมีค่าความร้อนพื้นฐานไม่ต่ำกว่า 2,600 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม แต่เมื่อนำมาผ่านกระบวนการเผาเป็นถ่าน (Carbonization) ค่าความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้น (ประมาณ 5,000 - 6,000 cal/g) ทำหน้าที่เป็นมวลหลักของเชื้อเพลิงที่ช่วยให้ติดไฟได้ดีและให้ความร้อนสม่ำเสมอ

กะลามะพร้าว (Coconut Shell) มีความแข็งแรงทนทาน เนื้อวัสดุมีความหนาแน่นสูง และมีค่าความร้อนพื้นฐานสูงมาก (ประมาณ 6,000 - 7,000 cal/g) การผสมกะลามะพร้าวลงไปจะช่วยให้เพิ่มค่าความร้อนรวม (Heating Value) และช่วยยืดระยะเวลาการเผาไหม้ให้ยาวนานขึ้น

ตัวประสาน (Cassava Starch Binder) แม้แป้งมันสำปะหลังจะมีค่าความร้อนที่ต่ำกว่าวัสดุหลัก (ประมาณ 3,500 cal/g หรือ 14.7 MJ/kg) แต่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างแรงยึดเกาะ (Adhesion) ช่วยให้ผงชีวมวลเกาะตัวกันเป็นแท่งที่แข็งแรงทนทาน ไม่แตกหักง่ายในกระบวนการอัดเย็น

4.3 การกำหนดอัตราส่วนผสมและเหตุผลในการเลือกสัดส่วน ผู้วิจัยกำหนดอัตราส่วนผสมโดยมวลระหว่าง ตัวประสาน : ขี้เลื่อยเผา : กะลามะพร้าว จำนวน 6 อัตราส่วนหลัก โดยมีหลักการในการออกแบบสัดส่วนดังนี้

การแปรผันปริมาณชีวมวล (ขี้เลื่อยเผา) ปรับเพิ่มจากระดับ 2 ถึง 6 ส่วน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างปริมาณสารตั้งต้นหลักกับปริมาณความร้อนที่จะได้รับ

การตรึงและปรับสัดส่วนกะลามะพร้าว/ตัวประสาน ปรับสัดส่วนให้สัมพันธ์กับปริมาณขี้เลื่อย เพื่อรักษาสสมดุลระหว่างความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิง (คุณสมบัติของตัวประสาน) และความร้อนที่ยาวนาน (คุณสมบัติของกะลามะพร้าว)

การแปรผันความเข้มข้นตัวประสาน (B:W Ratio) กำหนดอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำที่ 90:10 และ 80:20 เพื่อศึกษาสภาพความชื้นที่มีผลต่อประสิทธิภาพการให้ความร้อน

อัตราส่วนผสมในการทดลองได้แก่:

ชุดที่1 1 : 2 : 0.5

ชุดที่2 1 : 4 : 0.5

ชุดที่3 1 : 6 : 0.5

ชุดที่4 1.5 : 2 : 1

ชุดที่5 1.5 : 4 : 1

ชุดที่6 1.5 : 6 : 1

4.4. การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานทางความร้อน (Thermal Efficiency) การทดสอบนี้มุ่งประเมินประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากแท่งเชื้อเพลิงสู่ภาชนะ โดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงานดังในสมการที่ (1)

5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

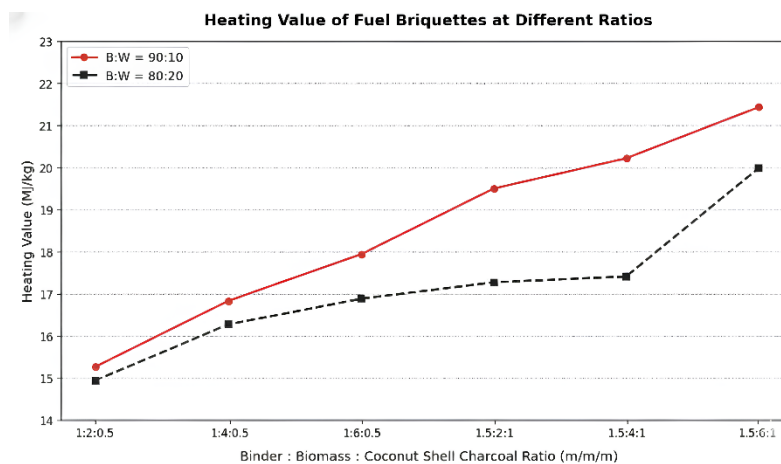
ผลจากการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเย็น โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน สามารถวิเคราะห์ผลลัพท์ได้ดังนี้

5.1 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (Heating Value)

ผลการทดสอบหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงด้วยเครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อนระบบปิด (Oxygen Bomb Calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM ปรากฏผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

ตัวประสาน:ชีวมวล:กะลามะพร้าว (kg)	ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง(MJ/kg)	
	B:W=90:10	B:W=80:20
1:2:0.5	15.26	14.93
1:4:0.5	16.83	16.27
1:6:0.5	17.94	16.88
1.5:2:1	19.50	17.27
1.5:4:1	20.22	17.41
1.5:6:1	21.43	19.98



รูปที่ 6 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

รูปที่ 6 แสดงแนวโน้มค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อแปรผันอัตราส่วนผสม พบว่าค่าความร้อนมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณชีวมวล โดยเมื่อเพิ่มปริมาณชีวมวลจาก 2 เป็น 6 กิโลกรัม ค่าความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับมาตรฐาน SS-ISO1928 โดยจุดที่ให้ค่าความร้อนสูงสุดคืออัตราส่วนผสม 1.5:6:1 (ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.43 MJ/kg และจุดที่มีค่าความร้อนต่ำสุดคือ 14.93 MJ/kg แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของชีวมวลและตัวประสานมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาแท่งเชื้อเพลิงจากไบโสนประดิษฐ์ผสมลิกไนต์[10] และการศึกษาผลของสัดส่วนผสมต่อสมบัติทางกลและทางความร้อน[5]

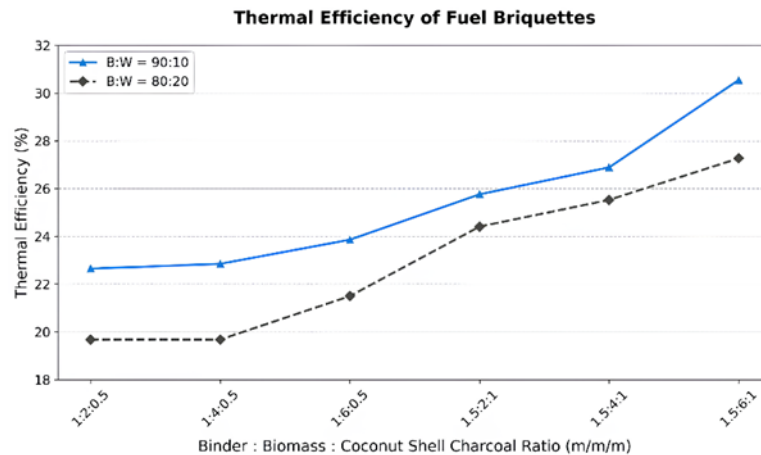
5.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงโดยสามารถทำได้ด้วยการนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปต้มน้ำเดือดซึ่งมีขั้นตอนพร้อมทั้งสมการในการคำนวณแสดงไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำเสนอในตารางที่ 2 และรูปที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตัวประสาน:ชีวมวล:กะลามะพร้าว (kg)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน(%)	
	B:W=90:10	B:W=80:20
1:2:0.5	22.65	19.68
1:4:0.5	22.85	19.68

1:6:0.5	23.86	21.50
1.5:2:1	25.76	24.41
1.5:4:1	26.89	25.53
1.5:6:1	30.55	27.27



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำ (B:W) ที่ 90:10 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าอัตราส่วน 80:20 ในทุกสัดส่วนผสม นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณชีวมวลที่เพิ่มขึ้น โดยค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30.55 ในอัตราส่วนตัวประสานต่อชีวมวลต่อถ่านกะลามะพร้าว (หรือซีเลื้อยเผา)* เท่ากับ 1.5:6:1 และมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 19.68 ในอัตราส่วน 1:2:0.5 ทั้งนี้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพหลายประการ โดยเฉพาะค่าความหนาแน่นซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนต่อหน่วย อย่างไรก็ตาม หากเชื้อเพลิงมีอัตราการเผาไหม้ที่รวดเร็วเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อนและลดประสิทธิภาพการใช้งานจริงลง ดังนั้น การพัฒนาแท่งเชื้อเพลิงให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม ปัจจัยด้านการถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างการอบแห้งชีวมวลก็มีส่วนสำคัญต่อคุณภาพเชื้อเพลิง[6] เช่นเดียวกับความคุ้มค่าเชิงต้นทุนในการผลิตระดับชุมชน[12]

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและทดลองคุณสมบัติและประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ผสมกับชีวมวล(ซีเลื้อยเผา) และถ่านกะลามะพร้าว งานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ตัวประสานหากนำวัตถุดิบ (ซีเลื้อย) มาอัดขึ้นรูปโดยตรงโดยไม่ใช้ตัวประสาน จะต้องใช้ กระบวนการอัดร้อน (Hot Pressing) ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงอัดสูงมากและทำให้ต้นทุนการผลิตสูงตามไปด้วย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้กระบวนการอัดเย็น (Cold Screw Press) และนำ "แป้งมันสำปะหลัง" มาทำหน้าที่เป็นตัวประสานเพื่อช่วยในการยึดเกาะแทน ซึ่งจะช่วยลดขนาดของแรงอัดที่ต้องใช้ลง และช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีความแข็งแรง ไม่แตกหักง่าย สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 อิทธิพลของอัตราส่วนความเข้มข้นตัวประสานต่อน้ำ (B:W Ratio): อัตราส่วนของตัวประสานต่อน้ำส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การใช้ความเข้มข้นของตัวประสานต่อน้ำที่ 90:10 ให้ค่าความร้อนสูงกว่า 80:20 ในทุกอัตราส่วนผสม สาเหตุหลักมาจากอัตราส่วน 80:20 มีปริมาณความชื้นที่สูงกว่า ซึ่งความชื้นในแท่งเชื้อเพลิงจะไปดูดซับพลังงานความร้อนบางส่วนเพื่อใช้ในการระเหยน้ำ (Latent Heat of Vaporization) ทำให้ค่าความร้อนสุทธิที่ได้น้อยลง

6.2 อิทธิพลของอัตราส่วนปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวล: ค่าความร้อนมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาณชีวมวล เมื่อพิจารณาในกลุ่มความเข้มข้น B:W 90:10 การเพิ่มปริมาณชีวมวลจาก 2 ส่วน เป็น 6 ส่วน ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

6.3 จุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Point): แท่งเชื้อเพลิงที่ให้อัตราการเผาไหม้และค่าความร้อนสูงสุดคือ อัตราส่วนตัวประสาน : ชีวมวล : ถ่านกะลามะพร้าว ที่ 1.5 : 6 : 1 ภายใต้ความเข้มข้นตัวประสาน 90:10 ซึ่งให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 21.43 MJ/kg

6.4 ผลกระทบของตัวประสานต่อประสิทธิภาพการใช้งาน: สอดคล้องกับผลของค่าความร้อน การใช้อัตราส่วนแบ่งมันสำปะหลังต่อน้ำที่ 90:10 ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่า 80:20 อย่างชัดเจนในทุกชุดการทดลอง การที่ตัวประสานมีความเข้มข้นสูงและกักเก็บความชื้นน้อย ช่วยให้แท่งเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นและสูญเสียพลังงานระหว่างการเผาไหม้น้อยลง

6.5 ความสมดุลระหว่างปริมาณชีวมวลและตัวประสาน: ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30.55 เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วนผสม 1.5 : 6 : 1 (B:W 90:10) ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่า การเพิ่มสัดส่วนของตัวประสานขึ้นเป็น 1.5 ส่วน (เมื่อเทียบกับชุด 1 ส่วน) ควบคู่ไปกับการใช้กะลามะพร้าว 1 ส่วน ช่วยสร้างโครงสร้างแท่งเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นเหมาะสม ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สม่ำเสมอ ไม่ลุกไหม้เร็วเกินไปจนสูญเสียความร้อนทิ้ง และสามารถถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะต้มน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่อัตราส่วน 1 : 2 : 0.5 (B:W 80:20) ให้ประสิทธิภาพต่ำสุดเพียงร้อยละ 19.68

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า แม้ "ปริมาณของเชื้อเพลิงชีวมวล" จะเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น แต่ "อัตราส่วนและสภาวะของตัวประสาน" คือตัวแปรควบคุมที่สำคัญที่สุด หากจัดการความเข้มข้นของตัวประสานไม่เหมาะสม (เช่น มีน้ำมากเกินไป) จะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงอย่างมาก ดังนั้น สูตร 1.5 : 6 : 1 ที่ระดับ B:W 90:10 จึงเป็นจุดสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างความสามารถในการยึดเกาะและการให้พลังงานความร้อน

7. ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาและศึกษาต่อไปในอนาคต ดังนี้

7.1 การศึกษาอัตราการเผาไหม้: แม้ค่าความร้อนสูงจะส่งผลดี แต่ควรมีการศึกษาเรื่อง "ระยะเวลาในการเผาไหม้" (Burning Rate) เพิ่มเติม เนื่องจากหากเชื้อเพลิงเผาไหม้เร็วเกินไปอาจทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนทิ้งและลดความคุ้มค่าในการใช้งานจริง

7.2 การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ: ควรมีการศึกษาเรื่องความหนาแน่น (Density) และความชื้นของแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มเติม เพื่อหาจุดสมดุลระหว่างความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิงและการติดไฟ

7.3 การทดสอบกับตัวประสานชนิดอื่น: อาจมีการเปรียบเทียบแบ่งมันสำปะหลังกับตัวประสานธรรมชาติชนิดอื่นๆ เพื่อหาวัสดุที่ช่วยลดต้นทุนหรือเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะได้ดียิ่งขึ้น

8. References

- [1] A. Amarasekara, F. S. Tanyildizi, and E. Asmatulu, "The briquetting and carbonization processes of naturally grown algae biomass collected from regional lakes," *Fuel*, 208, 2017, pp. 612–617.
- [2] P. Charoenroy, *Fuel Briquettes from Agricultural Waste*, Master's thesis, Mahasarakham University, Mahasarakham, 2008. (in Thai)
- [3] M. Faizal, "Utilization biomass and coal mixture to produce alternative solid fuel for reducing emission of green house gas," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2017, pp. 950–956.

- [4] M. Hoque, M. Ota, and S. C. Bhattacharya, "Activated charcoal from coconut shell using ZnCl_2 activation," *Biomass and Bioenergy*, 22(5), 2002, pp. 397–400.
- [5] A. Kumboon, S. Worapot, P. Luesak, and R. Sirirak, "A study of the effect of mixture material in coconut shell charcoal briquette on mechanical and thermal properties," *Thai Industrial Engineering Network Journal*, 5, 2019, pp. 67–75. (in Thai)
- [6] G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoiy, N. A. Nigay, V. I. Maksimov, and N. Y. Gutareva, "Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass," *Renewable Energy*, 169, 2020, pp. 498–511.
- [7] K. Namwong and M. Khathaphan, "Design and development of a briquette machine for briquettes production from dried neem leaves and burned sawdust," *Proceedings of the 31st National Mechanical Engineering Conference*, 2017, pp. 65–73. (in Thai)
- [8] P. Sathitruangsak, S. Sangworakan, and T. Methiyanon, "Design of an extrusion screw and solid fuel produced from coconut shell," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 28(2), 2006, pp. 387–401. (in Thai)
- [9] M. Shahabuddin and S. Bhattacharya, "Enhancement of performance and emission characteristics by co-gasification of biomass and coal using an entrained flow gasifier," *Energy*, 95, 2016, pp. 166–178.
- [10] A. Srinoun and A. Chainawa, "A study of fuel briquettes from Casuarina Junghuhniana Miq. leaf - lignite blends," *Kasem Bundit Engineering Journal*, 3, 2018, pp. 128–151. (in Thai)
- [11] N. Tangmankongworakoon, "The production of fuel briquettes from agricultural wastes and household wastes," *Science and Technology*, 6(1), 2014, pp. 66–77. (in Thai)
- [12] K. Tippayawong, S. Santiteerakul, S. Ramingwong, and N. Tippayawong, "Cost analysis of community scale smokeless charcoal briquette production from agricultural and forest residues," *Energy Procedia*, 160, 2019, pp. 310–316.
- [13] Q. Wu, S. Zhang, and B. Hou, "Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process," *Bioresource Technology*, 179, 2015, pp. 98–103.

การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM_{2.5} ของประเทศไทย

GEOSPATIAL MODELING MAP CHARTS FOR ASSESSING PM_{2.5} CONCENTRATION LEVELS IN THAILAND

จาตุรนต์ กันทะธง¹ พรรณวดี สิงห์แก้ว¹ ฤทธิติกร สมปาน¹ และณัฐพงศ์ ม้าเทศ^{1*}

Jaturon Kantathong¹, Pannawadee Singkaew¹ Rittikorn Sompan¹ and Nutthaphong Mated^{1*}

¹ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

* Corresponding author E-mail: Nutnutnut19667@gmail.com

Received: March 5, 2026 Revised: June 8, 2026 Accepted: June 17, 2026

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นละออง ขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) ในช่วงวันที่เกิดสถานการณ์วิกฤตสูงสุด (Peak Day) ระหว่างปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569 และประเมินการกระจายตัวเชิงพื้นที่ด้วยแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) วิจัยดำเนินการวิจัยเป็นการศึกษาข้อมูลทุติยภูมิจาก 77 จังหวัดทั่วประเทศไทย โดยใช้สถิติพรรณนา การทดสอบ Paired Samples t-test การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบวัดซ้ำ (Two-way Repeated Measures ANOVA) ผลการวิจัยพบว่า ฝุ่น PM_{2.5} ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุดที่ $\bar{X} = 51.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, S.D. = $22.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ โดยพบว่าค่าความเข้มข้นสูงสุดรายจังหวัด มีระดับสูงถึง $103.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ การทดสอบความแตกต่างเชิงเวลาแสดงให้เห็นว่า ระดับฝุ่น PM_{2.5} ในปี พ.ศ. 2568 มีความรุนแรงกว่าปี พ.ศ. 2569 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ ($p < .01$) ในขณะที่การวิเคราะห์จำแนกตามลักษณะภูมิศาสตร์พบว่า พื้นที่ภาคกลางและปริมณฑลมีความเข้มข้นของมลพิษสูงกว่าภูมิภาคอื่นอย่างมีนัยสำคัญในช่วงต้นปี ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สถิติที่ยืนยันการมีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยด้านเดือนและปี พ.ศ. อย่างมีนัยสำคัญ ($F = 8.14$, $p < .01$) ข้อค้นพบนี้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝุ่น PM_{2.5} มีความผันแปรตามเงื่อนไขเฉพาะของแต่ละปี มิได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางฤดูกาลเพียงอย่างเดียว ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับแผนภูมิรูปแบบจำลอง Map Chart ที่แสดงให้เห็นพื้นที่วิกฤต (Hotspots) ของฝุ่น PM_{2.5} ซึ่งกระจุกตัวหนาแน่นในพื้นที่ที่มีกิจกรรมทางเศรษฐกิจสูง สรุปได้ว่าการบูรณาการสถิติเชิงลึก ร่วมกับแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ช่วยให้สามารถระบุความเปลี่ยนแปลงที่มีนัยสำคัญได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย การจัดการด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม และการเฝ้าระวังทางสาธารณสุขของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ฝุ่น PM_{2.5} แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ อิทธิพลร่วม

ABSTRACT

This research aimed to comparatively analyze the differences in mean PM2.5 concentrations during peak critical days between 2025 and 2026, and to assess spatial distribution patterns utilizing geospatial modeling (Map Charts). The methodology entailed a secondary data analysis encompassing all 77 provinces across Thailand. Statistical analyses included descriptive statistics, Paired Samples t-tests, One-way Analysis of Variance (ANOVA), and Two-way Repeated Measures ANOVA. The findings revealed that the highest mean PM2.5 concentration occurred in January 2025 ($\bar{X} = 51.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, S.D. = $22.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), with the maximum provincial concentration reaching a level of $103.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Temporal comparisons indicated that PM2.5 pollution levels in 2025 were significantly more severe than in 2026 during January and February ($p < .01$). Concurrently, geographical analysis demonstrated that the Central Region and the Bangkok Metropolitan Region exhibited significantly higher pollutant concentrations compared to other regions during the early months of the year. These results align with advanced statistical evidence confirming a significant interaction effect between the "month" and "year" factors ($F = 8.14$, $p < .01$). Such findings suggest that PM2.5 variation patterns are driven by year-specific conditions rather than relying solely on seasonal factors. This phenomenon is further substantiated by the geospatial models, which identified critical PM2.5 hotspots densely clustered in zones of high economic activity. In conclusion, the integration of rigorous statistical analysis with geospatial modeling facilitates the precise identification of significant environmental shifts. This integrated approach effectively supports evidence-based policy decision-making, environmental health management, and public health surveillance in Thailand.

Keywords: PM2.5, Geospatial Modeling Map Charts, Interaction Effect

1. บทนำ

วิกฤตการณ์มลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เป็นปัญหาสำคัญด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมที่ประเทศไทยเผชิญอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงรอยต่อระหว่างฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจและเพิ่มอัตราการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรจากโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (NCDs) [1] ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินแม้จะมีความแม่นยำสูง แต่อาจไม่ครอบคลุมพื้นที่ห่างไกลหรือพื้นที่ที่มีข้อจำกัดเชิงภูมิประเทศ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการคาดการณ์และประเมินระดับมลพิษได้อย่างครอบคลุมเชิงพื้นที่มากขึ้น [2]

จากรายงานของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) พบว่าสถานการณ์ฝุ่น PM2.5 ในประเทศไทยมีความผันแปรตามปัจจัยเชิงพื้นที่และกาลเวลา โดยเฉพาะในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ความกดอากาศสูงแผ่ปกคลุมและมีกิจกรรมการเผาในที่โล่งเพิ่มขึ้น [3] ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยในระดับสากลที่แสดงให้เห็นว่า ข้อมูลจากดาวเทียมและการทำแผนภูมิรูปแบบจำลองสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเฝ้าระวังทางสาธารณสุขและช่วยในการตัดสินใจเชิงนโยบายเพื่อป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพประชากรได้อย่างมีนัยสำคัญ [4]

เพื่อประเมินและพยากรณ์ระดับฝุ่น PM2.5 ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูงเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และกาลเวลา อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นในพื้นที่เขตเมืองที่มีความซับซ้อน

เฉพาะจุดอย่างกรุงเทพมหานคร ผ่านการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) ร่วมกับข้อมูลย้อนหลัง [5] ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างของการวิจัยในด้านการนำเครื่องมือทางภูมิสารสนเทศที่สามารถแสดงผลได้ครอบคลุมระดับประเทศในรูปแบบที่เข้าถึงง่ายและนำไปใช้งานได้จริงสำหรับการเฝ้าระวังในระดับภูมิภาค นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมายังขาดการศึกษาที่เปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่แบบเจาะจงเฉพาะช่วงวันที่เกิดสภาวะวิกฤตสูงสุด (Peak Period) ระหว่างปี พ.ศ. ที่ต่อเนื่องกัน เพื่อทำความเข้าใจความผันแปรของมลพิษในระดับรายจังหวัดที่มีลักษณะเฉพาะตัว ดังเช่นสถิติในปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569

เหตุผลเชิงวิชาการที่ผู้วิจัยเลือกใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบต่อเนื่องเชิงพื้นที่ ซึ่งแตกต่างและแก้ข้อจำกัดของวิธีดั้งเดิมที่พึ่งพาเพียงข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่มีลักษณะเป็นจุด ซึ่งมักเกิดจุดบอดในพื้นที่ห่างไกล นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรืออัลกอริทึมขั้นสูงที่ต้องอาศัยทรัพยากรการประมวลผลสูง แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์มีความโดดเด่นในด้านความเหมาะสมต่อการนำไปปฏิบัติจริง โดยสามารถแปลงชุดข้อมูลสถิติจำนวนมากให้เป็นภาพแสดงพื้นที่วิกฤต (Hotspots) ที่ชัดเจนและเข้าใจง่าย ซึ่งช่วยให้เห็นการกระจุกตัวและการเคลื่อนตัวของมลพิษข้ามเขตแดนได้อย่างเป็นรูปธรรม

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในการแสดงภาพรวมของการกระจายตัวของฝุ่นระดับประเทศ จึงมีความสนใจที่จะนำแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) มาวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ใน 77 จังหวัดทั่วประเทศ เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้ม ระบุพื้นที่เสี่ยงภัย (Hotspots) และสนับสนุนการวางแผนจัดการเชิงรุกของหน่วยงานด้านอนามัยสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยพัฒนาเกณฑ์การเตือนภัยที่สอดคล้องกับบริบทพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ [6] ตลอดจนเป็นการยกระดับคุณภาพงานวิจัยให้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ในระดับสากล โดยเฉพาะเป้าหมายที่ 3 ด้านสุขภาพและความเป็นอยู่ที่ดี (Good Health and Well-being) และเป้าหมายที่ 13 ด้านการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างเป็นรูปธรรม

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อประเมินและวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของฝุ่นละออง PM2.5 ในประเทศไทย โดยใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์จากข้อมูลดาวเทียมในช่วงวันที่เกิดค่าวิกฤตของปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569

2.2 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับฝุ่น PM2.5 รายจังหวัดและรายภูมิภาค ระหว่างช่วงเวลาเดียวกันของปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569 เพื่อระบุแนวโน้มและปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสถานการณ์มลพิษทางอากาศในเชิงกาลเวลา

3. การทบทวนวรรณกรรม

3.1 ปัญหาและแหล่งกำเนิดฝุ่น PM2.5

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ในประเทศไทยมีแหล่งกำเนิดที่ซับซ้อนและแปรผันตามบริบทของพื้นที่ โดยเฉพาะในเขตเมืองใหญ่ที่มีกิจกรรมการคมนาคมหนาแน่น รวมถึงพื้นที่เฝ้าระวังพิเศษที่ได้รับผลกระทบจากการเผาในที่โล่ง ซึ่งการจัดการปัญหาดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยการเฝ้าระวังผลกระทบต่อสุขภาพอย่างเป็นระบบ ในหลายมิติ [7] เพื่อให้สามารถระบุความเสี่ยงและเตรียมความพร้อมด้านบริการสาธารณสุขได้อย่างครอบคลุม ทั้งในมิติด้านสิ่งแวดล้อม พฤติกรรมสุขภาพ และอุบัติการณ์ของโรคที่สัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่ ในขณะที่พื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปัญหาส่วนใหญ่เกิดจากการเผาในที่โล่ง และไฟฟ้า ซึ่งความรุนแรงจะเพิ่มขึ้นในช่วงหน้าแล้งเนื่องจากสภาพอากาศที่นิ่งสนิทและกระแสลมที่อ่อนตัวลง ทำให้ฝุ่นไม่สามารถระบายออกไปได้ [8]

3.2 ผลกระทบและอันตรายของฝุ่น PM2.5 ต่อสุขภาพ

ด้วยขนาดที่เล็กมากของ PM2.5 ทำให้สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนลึกและกระแสเลือดได้โดยตรง ส่งผลให้เกิดการอักเสบในระดับเซลล์ [9] งานวิจัยทางระบาดวิทยายืนยันว่าการสัมผัสฝุ่นในระยะยาวเพิ่มความเสี่ยงต่อโรคระบบหัวใจและหลอดเลือด โรคทางเดินหายใจอุดกั้นเรื้อรัง และโรคมะเร็งปอด นอกจากนี้ในกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็กและผู้สูงอายุ ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างระดับฝุ่นที่เพิ่มขึ้นกับอัตราการเข้าโรงพยาบาลแบบเฉียบพลัน [10]

3.3 การเฝ้าระวังและการใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์

การเฝ้าระวังคุณภาพอากาศแบบดั้งเดิมที่อาศัยเพียงสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) และแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Geospatial Modeling) จึงเป็นนวัตกรรมสำคัญที่ช่วยประเมินความเข้มข้นของฝุ่นละอองในพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัด ควบคู่ไปกับการใช้เทคโนโลยีการแสดงผลข้อมูลเชิงภาพ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และนำเสนอระดับมลพิษให้มีความชัดเจนและเข้าใจง่าย [11] ซึ่งช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการวางแผนจัดการมลพิษทางอากาศในเขตพื้นที่ที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันการใช้โปรแกรมประมวลผลพื้นฐานอย่าง Microsoft Excel ผ่านฟังก์ชัน Map Chart สามารถสร้างแผนภูมิรูปแบบจำลองที่แสดงผลภาพการกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้สามารถนำมายิงแวดล้อมหรือนักวิชาการทางด้านสาธารณสุขมองเห็นพื้นที่วิกฤต (Hotspots) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ได้อย่างรวดเร็ว [12]

3.4 กฎหมายและมาตรการป้องกันระดับประเทศ

ประเทศไทยได้มีการยกระดับมาตรฐานฝุ่น PM2.5 ในบรรยากาศโดยทั่วไป โดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้ปรับเกณฑ์มาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมง จาก 50 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) เป็น 37.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางขององค์การอนามัยโลก [13] นอกจากนี้ รัฐบาลยังได้กำหนดให้ การแก้ไขปัญหาหมอกพิษด้านฝุ่นละอองเป็นวาระแห่งชาติ โดยมีมาตรการป้องกันที่เข้มงวด เช่น การห้ามเผาในที่โล่งในช่วงฤดูวิกฤต การควบคุมไอเสียจากภาคอุตสาหกรรม และการส่งเสริมการใช้นาพาหนะไฟฟ้า [14]

3.5 การติดตามและการป้องกันอันตรายทางด้านสาธารณสุข

มาตรการทางสาธารณสุขเน้นการสร้างความรู้ด้านสุขภาพให้แก่ประชาชนในการประเมินความเสี่ยงรายวันผ่านแอปพลิเคชัน เช่น Air4Thai หรือระบบดาวเทียมจาก GISTDA [15] การป้องกันในระดับบุคคลประกอบด้วยการสวมหน้ากากชนิด N95 ในวันที่มีค่าฝุ่นเกินมาตรฐาน และการติดตั้งระบบฟอกอากาศในอาคาร (Clean Room) โดยเฉพาะในศูนย์เด็กเล็กและโรงพยาบาล ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมาตรการเชิงรุกในการลดภาระโรคจากสิ่งแวดล้อม [16]

4. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 แหล่งข้อมูลและการรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ซึ่งเป็นข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM2.5 รายวันระดับจังหวัด ทั้ง 77 จังหวัดทั่วประเทศ โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) หรือ GISTDA ข้อมูลดังกล่าวถูกคัดเลือกเฉพาะช่วงเวลาที่เกิดสถานการณ์ฝุ่นละอองสูงสุด (Peak Period) ในระยะเวลา 3 เดือน ตั้งแต่ช่วงเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ และมีนาคม ของปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและการสร้างแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์

ผู้วิจัยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการจัดการฐานข้อมูลและสร้างแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) เพื่อประเมินระดับฝุ่นละอองตามขั้นตอนดังนี้

4.2.1 Data Cleaning: จัดระเบียบข้อมูลรายจังหวัดและตรวจสอบความถูกต้องของค่าความเข้มข้น ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

4.2.2 Geographic Coding: เชื่อมโยงรายชื่อจังหวัดกับฐานข้อมูลภูมิศาสตร์สากลใน Excel

4.2.3 Map Chart Generation: สร้างแผนที่ความเข้มข้น (Choropleth Map) โดยใช้ระดับสี (Color Scale) เพื่อแสดงความแตกต่างของระดับ PM2.5 ในแต่ละภูมิภาค ซึ่งช่วยให้เห็นการกระจายตัวเชิงพื้นที่ (Spatial Distribution) ได้อย่างชัดเจน

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยโปรแกรมทางสถิติ SPSS version 26.0 เพื่อทดสอบสมมติฐานและสรุปผลการวิจัย โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($p < 0.05$) ดังนี้

4.3.1 สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics): วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 โดยแสดงผลในรูปแบบของ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.), ค่าสูงสุด (Max) และค่าต่ำสุด (Min) เพื่ออธิบายภาพรวมสถานการณ์ฝุ่นในทั้ง 77 จังหวัด

4.3.2 การทดสอบความแตกต่างระหว่างปี: ใช้การทดสอบ Paired Samples t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 รายจังหวัดในวันที่เกิดสถานการณ์สูงสุด (Peak Day) ระหว่างปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569 ในแต่ละเดือน

4.3.3 การเปรียบเทียบความแตกต่างรายภูมิภาค: ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ระหว่างภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย และทำการทดสอบรายคู่ด้วยวิธี Post Hoc Comparison เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

4.3.4 การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมและแนวโน้มเชิงกาลเวลา: ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบวัดซ้ำ (Two-way Repeated Measures ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยด้านเดือน และปี พ.ศ. ที่มีต่อความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5

4.3.5 การวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงพื้นที่: นำค่าสถิติที่ได้มาบูรณาการร่วมกับแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขทางสถิติและลักษณะการกระจุกตัวของมลพิษที่ปรากฏบนแผนที่ภูมิศาสตร์

5. ผลการวิจัย

ตารางที่ 1 สรุปค่าสถิติพรรณนาของระดับฝุ่น PM2.5 ในประเทศไทย รายเดือน (ปี พ.ศ. 2568 – 2569)

ช่วงเวลาที่ศึกษา (Peak Day)	จำนวน (จังหวัด)	ค่าต่ำสุด (Min)	ค่าสูงสุด (Max)	ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
ปี พ.ศ. 2568					
มกราคม (23 มกราคม พ.ศ. 2568)	77	15.65	103.63	51.52	22.14
กุมภาพันธ์ (15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568)	77	14.88	75.12	40.85	13.56
มีนาคม (12 มีนาคม พ.ศ. 2568)	77	10.12	68.45	32.74	12.44
ปี พ.ศ. 2569					
มกราคม (16 มกราคม พ.ศ. 2569)	77	18.22	62.45	38.65	10.87
กุมภาพันธ์ (6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569)	77	14.15	45.32	31.02	7.95
มีนาคม (3 มีนาคม พ.ศ. 2569)	77	12.56	65.18	34.18	11.23

หมายเหตุ: ค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง PM2.5 มีหน่วยเป็น ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ข้อมูลทุติยภูมิรวบรวมจากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) หรือ GISTDA

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่น PM2.5 ในช่วงวันที่เกิดสถานการณ์วิกฤต (Peak Day) ของปี พ.ศ. 2568 มีค่าสูงที่สุดในเดือนมกราคม ($\bar{X} = 51.52 \pm 22.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) โดยพบค่าความเข้มข้นสูงสุดมีระดับสูงถึง $103.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งจัดอยู่ในระดับที่เริ่มส่งผลกระทบต่อสุขภาพอย่างรุนแรงตามเกณฑ์มาตรฐานอนามัยสิ่งแวดล้อม

เมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2569 ในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่าค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในเดือนมกราคมมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ($\bar{X} = 38.65 \pm 10.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) อย่างไรก็ตาม ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2569 กลับพบว่าค่าเฉลี่ยฝุ่น ($\bar{X} = 34.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) มีระดับที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยในเดือนเดียวกันของปี พ.ศ. 2568 ซึ่งสะท้อนถึงความผันแปรเชิงกาลเวลาของมลพิษทางอากาศที่อาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่แตกต่างกันในแต่ละปี

นอกจากนี้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ที่มีค่าสูงในเดือนมกราคม 2568 ($22.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของฝุ่นที่มีความแตกต่างกันอย่างมากในเชิงพื้นที่ โดยพบการกระจุกตัวของฝุ่นหนาแน่นในบางจังหวัด ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ที่แสดงผลการกระจายตัวแบบกระจุกตัวในพื้นที่ภาคกลางและปริมณฑล

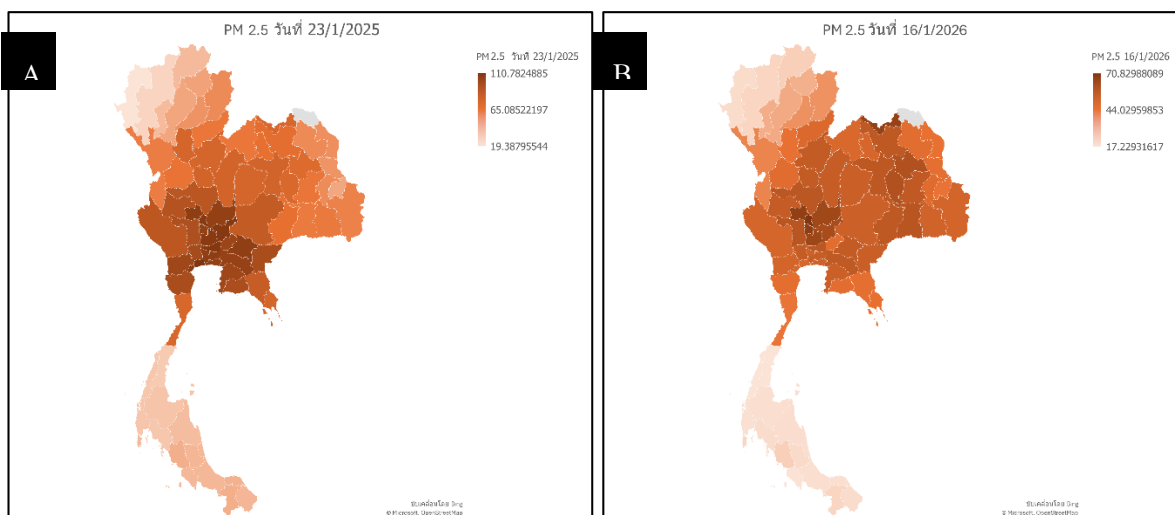
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 (Peak Day) ระหว่างปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569 รายเดือน (N = 77)

เดือนที่เปรียบเทียบ ของฝุ่น PM2.5	ปี พ.ศ. 2568 (Peak Day) ($\bar{X} \pm S.D.$)	ปี พ.ศ. 2569 (Peak Day) ($\bar{X} \pm S.D.$)	Mean Diff.	t-value	p-value
มกราคม	51.52 $\pm$ 22.14 (23 มกราคม พ.ศ. 2568)	38.65 $\pm$ 10.87 (16 มกราคม พ.ศ. 2569)	12.87	5.421	.000**
กุมภาพันธ์	40.85 $\pm$ 13.56 (15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568)	31.02 $\pm$ 7.95 (6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569)	9.83	6.154	.000**
มีนาคม	32.74 $\pm$ 12.44 (12 มีนาคม พ.ศ. 2568)	34.18 $\pm$ 11.23 (3 มีนาคม พ.ศ. 2569)	-1.44	-0.985	0.327

หมายเหตุ: ** นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01, หน่วยของค่าฝุ่นคือ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

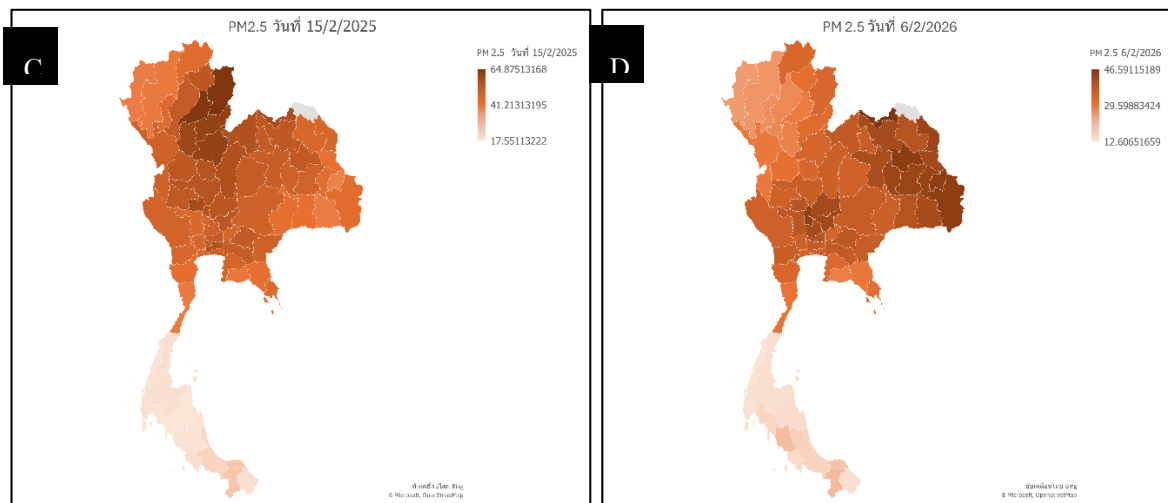
จากตารางที่ 2 ผลการทดสอบทางสถิติด้วย Paired Samples t-test พบว่า ในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ระหว่างปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยค่าฝุ่นในปี พ.ศ. 2569 มีแนวโน้มลดลงกว่าปี พ.ศ. 2568 อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมมลพิษหรือการผันแปรของสภาพอากาศในช่วงต้นปี

ในเดือนมีนาคม ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ระหว่างทั้งสองปี โดยนำ Peak Day ของฝุ่น PM2.5 ในรอบ 3 เดือน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > .05$) แม้ว่าในปี พ.ศ. 2569 จะมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อยก็ตาม สะท้อนให้เห็นว่าสภาวะวิกฤตในช่วงเดือนมีนาคมที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับปัจจัยด้านไฟฟ้าและการเผาในที่โล่งในระดับภูมิภาค ยังคงมีความรุนแรงใกล้เคียงกันทั้งสองปีที่ศึกษา



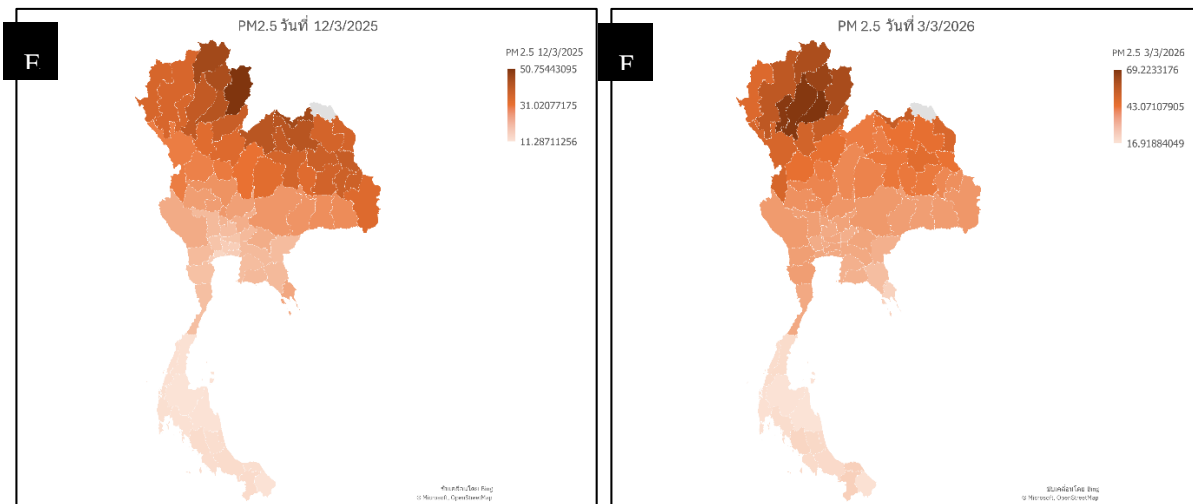
ภาพที่ 1 (A) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2568 (B) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2569

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์แสดงค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ณ วันที่ 23 มกราคม 2568 ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าฝุ่นสูงสุด (Peak Day) ของเดือน พบการกระจุกตัวของมลพิษในระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญ (สีแดงเข้ม) ครอบคลุมพื้นที่ภาคกลาง ภาคตะวันออก และปริมณฑล โดยมีค่าความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่จังหวัดปทุมธานี $103.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และสุพรรณบุรี $91.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สะท้อนถึงสภาวะอากาศปิดที่ส่งผลต่อการสะสมตัวของมลพิษในระดับผิวพื้น และแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์แสดงค่าความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ณ วันที่ 16 มกราคม 2569 พบว่าความรุนแรงของการกระจายตัวของฝุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันของปีที่ผ่านมา โดยค่าความเข้มข้นส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในระดับปานกลาง (สีส้ม-เหลือง) ครอบคลุมพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง โดยมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $50\text{-}60 \mu\text{g}/\text{m}^3$



ภาพที่ 2 (C) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568
(D) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นแผนภูมิแสดงระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 พบว่าสภาวะมลพิษยังคงทรงตัวในระดับที่ต้องเฝ้าระวัง โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ซึ่งปรากฏแถบสีแดงแสดงค่าความเข้มข้นสูงกระจายตัวเป็นวงกว้าง ($\bar{X} = 40.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$) สอดคล้องกับช่วงฤดูกาลที่มีกิจกรรมการเตรียมพื้นที่เกษตรกรรมและการสะสมตัวของมลพิษ อีกทั้งการแพร่กระจายมลพิษข้ามเขตแดน และแผนภูมิแสดงผลการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 ในต้นเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 พบว่าความรุนแรงของมลพิษในภาพรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับปีที่ผ่านมา โดยระดับความเข้มข้นเฉลี่ยทั่วประเทศลดลงเหลือ $31.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และการกระจายตัวของพื้นที่วิกฤต (Hotspots) มีลักษณะจะจัดกระจายไม่หนาแน่นเท่าปี พ.ศ. 2568 สะท้อนถึงสภาวะที่ก่อหนุนจากสภาวะอุตุนิยมวิทยาหรือการบังคับใช้มาตรการควบคุมมลพิษที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพที่ 3 (E) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2568

(F) การใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ในการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 วันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2569

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นแผนภูมิแสดงระดับความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ในช่วงกลางเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 พบลักษณะการกระจายตัวของมลพิษที่มีความเข้มข้นปานกลางครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ โดยเฉพาะในเขตภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ซึ่งปรากฏแถบสีแดงเข้มแสดงค่ามลพิษที่สะท้อนถึงการสะสมตัวของฝุ่นละอองในพื้นที่แอ่งกระทะ ($\bar{X} = 32.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$) รวมถึงสถานการณ์ในเขตภาคกลางและปริมณฑลเริ่มมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับช่วงต้นไตรมาส และแผนภูมิแสดงผลการประเมินระดับฝุ่น PM2.5 ในต้นเดือนมีนาคม พ.ศ. 2569 พบว่ารูปแบบการกระจายตัวเชิงพื้นที่ มีความใกล้เคียงกับปี พ.ศ. 2568 แต่ปรากฏกลุ่มก้อนมลพิษ (Aerosol Clusters) ที่มีความเข้มข้นสูงชันในบางจังหวัดของภาคเหนือตอนบน ($\bar{X} = 34.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) แสดงให้เห็นถึงสภาวะวิกฤตที่ยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงรอยต่อฤดูกาล ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางสถิติที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสองปีในเดือนนี้ ($p > .05$) สะท้อนถึงความคงตัวของแหล่งกำเนิดมลพิษและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาในระยะยาว

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 (Peak Day) ระหว่างภูมิภาคในปี พ.ศ. 2568 (One-way ANOVA)

ภูมิภาค	จำนวน (N)	มกราคม ($\bar{X} \pm \text{S.D.}$)	กุมภาพันธ์ ($\bar{X} \pm \text{S.D.}$)	มีนาคม ($\bar{X} \pm \text{S.D.}$)
ภาคเหนือ	9	38.42 $\pm$ 15.20	46.12 $\pm$ 8.45	39.54 $\pm$ 7.12
ภาคกลางและปริมณฑล	26	74.15 $\pm$ 18.30	42.35 $\pm$ 10.12	28.45 $\pm$ 9.34
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	20	52.60 $\pm$ 12.45	48.90 $\pm$ 7.56	40.12 $\pm$ 8.22
ภาคใต้	14	25.34 $\pm$ 8.12	19.45 $\pm$ 4.30	15.82 $\pm$ 3.15
ภาคตะวันออก	8	45.10 $\pm$ 10.25	35.40 $\pm$ 6.80	24.60 $\pm$ 5.40
รวมทั้งประเทศ	77	—	—	—
F-ratio		18.452	22.108	25.641
p-value		.000**	.000**	.000**

หมายเหตุ: ** นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01, หน่วย $\mu\text{g}/\text{m}^3$

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ระหว่าง 5 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย (รวม 77 จังหวัด) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ($p < .01$) ในทุกช่วงเดือนที่ทำการศึกษ ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยเชิงพื้นที่และสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อระดับมลพิษทางอากาศแตกต่างกันในแต่ละเขตภูมิศาสตร์ โดยในลักษณะการกระจุกตัวของมลพิษในภาคกลางและปริมณฑล (N=26) ในเดือนมกราคม พบว่าภาคกลางมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของฝุ่นสูงที่สุดอย่างเด่นชัด ($\bar{X} = 74.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และมีความแตกต่างจากภูมิภาคอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงสภาวะอากาศปิดร่วมกับการสะสมมลพิษจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจ การจราจรที่หนาแน่น และแหล่งกำเนิดจากภาคอุตสาหกรรมในพื้นที่ ในสภาวะการเปลี่ยนแปลงสู่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เมื่อเข้าสู่เดือนมีนาคม รูปแบบพื้นที่วิกฤตมีการเคลื่อนตัวอย่างชัดเจน โดยภาคเหนือ (N=9) และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (N=20) มีค่าเฉลี่ยฝุ่นสูงกว่าภาคกลางและภาคใต้ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับกิจกรรมการเผาในที่โล่ง ในช่วงฤดูกาลเตรียมพื้นที่เกษตรกรรม ประกอบกับปัจจัยด้านภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นแอ่งกระทะในภาคเหนือ ซึ่งลดประสิทธิภาพการระบายอากาศในช่วงเวลาดังกล่าว ในด้านความเสถียรภาพของอากาศบริสุทธิ์ในภาคใต้ (N=14) จากการเปรียบเทียบพบว่า ภาคใต้มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลาที่ศึกษาและมีความแตกต่างจากภูมิภาคอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีปัจจัยเกื้อหนุนทางอุตุนิยมวิทยาที่เป็นลักษณะพื้นที่เปิดและได้รับอิทธิพลจากลมทะเลทั้งสองฝั่งซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแพร่กระจายและระบายมลพิษออกจากพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างเดือน และ ปี พ.ศ. (N = 77)

แหล่งความแปรปรวน (Source)	df	MS	F	p-value	η^2 (Partial Eta Squared)
อิทธิพลของเดือน	2	4512.34	28.45	.000**	0.272
อิทธิพลของปี	1	1856.12	15.82	.000**	0.172
อิทธิพลร่วม (เดือน $\times$ ปี)	2	984.56	8.14	.001**	0.097
Error	152	120.45			

จากตารางที่ 4 ผู้วิจัยใช้สถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบวัดซ้ำ (Two-way Repeated Measures ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมของปัจจัยด้านเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ซึ่งจากการวิเคราะห์สถิติในด้านอิทธิพลร่วม พบว่ามีอิทธิพลร่วมระหว่าง เดือน และ ปี พ.ศ. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 8.14, p < .01$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของฝุ่น PM2.5 ในแต่ละเดือนนั้นขึ้นอยู่กับปีที่ทำการศึกษา โดยในปี พ.ศ. 2568 มีการลดลงของฝุ่นอย่างรวดเร็วจากมกราคมไปมีนาคม ในขณะที่ปี พ.ศ. 2569 มีความคงตัวของระดับฝุ่นมากกว่า ในด้านอิทธิพลหลัก ทั้งปัจจัยด้านเดือนและปี พ.ศ. ต่างส่งผลต่อระดับฝุ่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า Partial Eta Squared ($\eta^2 = 0.272$) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านช่วงเวลา (เดือน) มีอิทธิพลต่อความผันแปรของค่าฝุ่นสูงกว่าปัจจัยด้านปี พ.ศ. และการวิเคราะห์ในด้านขนาดอิทธิพล พบว่า ค่า η^2 ของอิทธิพลร่วมที่ระดับ 0.097 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลร่วมระหว่างเวลาและปีสามารถอธิบายความผันแปรของฝุ่นได้ประมาณร้อยละ 9.7 ของความผันแปรทั้งหมด

6. สรุปและอภิปรายผล

6.1 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาและประเมินระดับความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) ครอบคลุมพื้นที่ 77 จังหวัดของประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวเชิงพื้นที่ด้วยแผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ และเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับฝุ่น PM2.5 ระหว่างช่วงเวลาที่เกิดสถานการณ์สูงสุด (Peak Period) ในเดือนมกราคมถึงมีนาคม ของปี พ.ศ. 2568 และ พ.ศ. 2569

ผลการวิจัยพบว่า ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่น PM2.5 และระดับสูงสุดในเดือนมกราคม พ.ศ. 2568 โดยเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปีพบว่า ระดับมลพิษในช่วงเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 มีความรุนแรงกว่าช่วงเวลาเดียวกันของปี พ.ศ. 2569 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .01$) ในขณะที่เดือนมีนาคมของทั้งสองปีไม่พบความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในด้านการกระจายตัวเชิงพื้นที่พบความแตกต่างระหว่างภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยพื้นที่ภาคกลางและปริมณฑลมีความเข้มข้นของฝุ่นสูงที่สุดในช่วงต้นปี ก่อนที่พื้นที่วิกฤตจะเคลื่อนตัวไปยังภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือในเดือนมีนาคม

ผลการศึกษาครั้งนี้ยืนยันว่า แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการระบุพื้นที่วิกฤต (Hotspots) และแสดงให้เห็นรูปแบบการแปรเปลี่ยนของความเข้มข้นฝุ่นในระดับประเทศได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way Repeated Measures ANOVA ยังตรวจพบอิทธิพลร่วมระหว่างช่วงเวลา เดือนและ ปี พ.ศ. อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 8.14, p < .01$) ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้สำคัญที่แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการกระจายตัวของมลพิษทางอากาศในประเทศไทยมีความซับซ้อนและมีการแปรผันตามเงื่อนไขบริบทเฉพาะของแต่ละปี มิได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางฤดูกาลเพียงอย่างเดียว

การประยุกต์ใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ถือเป็นนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ช่วยยกระดับการประเมินความเสี่ยงทางด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมได้อย่างเป็นรูปธรรม เทคโนโลยีนี้ช่วยก้าวข้ามข้อจำกัดของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ทำให้สามารถวิเคราะห์และคาดการณ์ระดับมลพิษได้ครอบคลุมในทุกมิติเชิงพื้นที่ การแปลงข้อมูลสถิติที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบการแสดงผลภาพที่ชัดเจน ช่วยให้นักวิชาการและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถระบุพื้นที่วิกฤต (Hotspots) ของฝุ่นละอองได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้ ยังเอื้อต่อการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่และกาลเวลา ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนเฝ้าระวังด้านสุขภาพอย่างเป็นระบบ ในเชิงปฏิบัติข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการกำหนดนโยบายและการจัดการด้านสาธารณสุขเชิงรุกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การจัดสรรทรัพยากรทางการแพทย์และเวชภัณฑ์เพื่อรองรับผู้ป่วยโรคระบบทางเดินหายใจให้ตรงกับพื้นที่วิกฤต การพัฒนาระบบแจ้งเตือนภัยสุขภาพที่แม่นยำและเจาะจงระดับพื้นที่สำหรับกลุ่มเปราะบาง ตลอดจนการใช้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ให้แก่องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในการบริหารจัดการและควบคุมแหล่งกำเนิดมลพิษแบบจำเพาะเจาะจงช่วงเวลา แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์นี้ จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่สนับสนุนการบูรณาการข้อมูลเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิต ช่วยปกป้องประชาชน และพัฒนางานด้านอนามัยสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างยั่งยืน

6.2 อภิปรายผล

ความผันแปรเชิงพื้นที่ที่ตรวจพบในพื้นที่ภาคกลางและปริมณฑลช่วงต้นปี พ.ศ. 2568 สอดคล้องกับหลักการของ Frumkin [16] ที่ระบุว่า การจัดการอนามัยสิ่งแวดล้อมในระดับท้องถิ่นต้องคำนึงถึงปัจจัยทางกายภาพและกิจกรรมของมนุษย์ที่ส่งผลต่อคุณภาพอากาศในระดับผิวพื้น ซึ่งสอดคล้องกับข้อค้นพบของ Chen และคณะ [17] ที่ว่าโครงสร้างพื้นฐานของเมืองมีอิทธิพลโดยตรงต่อการกักตัวของมลพิษในสภาวะอุณหภูมิผกผัน (Temperature Inversion)

นอกจากนี้ ข้อมูลจาก กรมควบคุมมลพิษ [20] ยังสนับสนุนว่าอิทธิพลของมวลอากาศเย็นมีส่วนสำคัญในการเพิ่มความเข้มข้นของมลพิษในเขตพื้นที่ต่ำ

สำหรับสถานการณ์ในภาคเหนือช่วงเดือนมีนาคมที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > .05$) แม้จะมีการเปลี่ยนปี พ.ศ. สะท้อนถึงปัญหาเชิงโครงสร้างจากการเผาชีวมวลและมลพิษข้ามพรมแดน ดังที่ Zhang และคณะ [18] อธิบายถึงความยากลำบากในการจัดการมลพิษในระดับภูมิภาคที่มีลักษณะภูมิประเทศซับซ้อน ซึ่งในข้อมูลงานวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [21] ที่ระบุว่าแหล่งกำเนิดมลพิษจากภายนอกประเทศเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ระดับ PM2.5 สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศที่เข้าถึงง่ายตามแนวทางของ Miller และ Garcia [19] จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้หน่วยงานสาธารณสุขสามารถคาดการณ์พื้นที่เสี่ยงภัยได้อย่างแม่นยำและทันเหตุการณ์

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการบริหารจัดการ

7.1.1 หน่วยงานภาครัฐควรบูรณาการใช้แผนภูมิรูปแบบจำลองเชิงภูมิศาสตร์ (Map Chart) ร่วมกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน เพื่อยกระดับระบบเฝ้าระวังทางสาธารณสุขให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัด โดยเน้นการจัดการเชิงรุกในพื้นที่ภาคกลางช่วงต้นไตรมาส และภาคเหนือในช่วงเปลี่ยนผ่านฤดูกาล

7.1.2 ควรเร่งขับเคลื่อนมาตรการป้องกันมลพิษข้ามเขตแดน โดยเฉพาะในเดือนมีนาคมซึ่งเป็นช่วงที่มีความคงตัวของแหล่งกำเนิดมลพิษสูง ผ่านกลไกความร่วมมือระหว่างจังหวัดและระดับภูมิภาคเพื่อลดกิจกรรมการเผาในที่โล่ง

7.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

7.2.1 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ร่วมกับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาเชิงลึก เช่น ความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ และพีดานการผสมตัวของอากาศ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างเวลาและพื้นที่

7.2.2 การวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังกลุ่มจังหวัดที่มีค่าฝุ่นเกินมาตรฐานอย่างต่อเนื่อง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับมลพิษเชิงภูมิศาสตร์กับอัตราการป่วยด้วยโรคระบบทางเดินหายใจของประชากรในพื้นที่นั้นๆ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, “รายงานสถานการณ์และผลกระทบต่อสุขภาพจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ในประเทศไทย ประจำปีงบประมาณ 2567”, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://anamai.moph.go.th>
- [2] T. Lončarić and M. Šantić, “Geospatial modeling of air pollutants for environmental health assessment: A review of recent techniques”, *Journal of Environmental Public Health*, 15(2), 2023, pp. 45-58.
- [3] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน). (2569, มีนาคม). รายงานสรุปข้อมูลสถานการณ์ฝุ่นรายวันจากระบบดาวเทียม, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.gistda.or.th>
- [4] S. K. Gupta and M. El-Fadel, “Satellite-based monitoring of particulate matter: Spatial modeling and health implications in developing countries”, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 16(4), 2023, pp. 789-805.

- [5] ศรีรักษ์ ศรีทองชัย, “แบบจำลองการพยากรณ์ค่า PM2.5 โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบ LSTM ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร”, *Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)*, 10(1), 2565, หน้า 1-9.
- [6] World Health Organization (WHO). (2021, Sept. 22). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, [Online] Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [7] ภาสินี ม่วงใจเพชร, พูลทรัพย์ โพนสิงห์. “การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนาการแผ่กระจายผลกระทบต่อสุขภาพจากมลพิษทางอากาศ 5 มิติ กรณีฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) เขตสุขภาพที่ 8 ปี พ.ศ. 2565”, *วารสารวิชาการป้องกันควบคุมโรคที่ 8 จังหวัดอุดรธานี*, 10(2), 2565, หน้า 28-43
- [8] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, “รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2567”, *กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ*, 2567.
- [9] World Health Organization (WHO), “Compendium of WHO guidance on health and environment”, [Online] Available: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-EFP-2022.1>, 2024.
- [10] S. Rajagopalan and P. J. Landrigan, “The health effects of particulate matter: A global perspective”, *New England Journal of Medicine*, 385(12), 2021, pp. 1113-1122.
- [11] วันมงคล พิกุลแย้ม, ปราณี มณีรัตน์ และ นิเวศ จิระวิชัย, “การพัฒนาระบบแสดงผลภาพเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก 2.5 ไมโครเมตร (PM2.5) ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร”, *Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi*, 20(1), 2564, หน้า 157-164.
- [12] Microsoft Support, “Create a Map chart in Excel”, [Online] Available: <https://support.microsoft.com/en-us/office/create-a-map-chart-in-excel>, 2024.
- [13] กรมควบคุมมลพิษ, “ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เรื่อง กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ในบรรยากาศโดยทั่วไป”, *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 139 ตอนพิเศษ 161 ง, 2565.
- [14] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, “แนวทางการดำเนินงานด้านสาธารณสุขกรณีฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ประจำปี 2567”, *โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ*, 2567.
- [15] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), “คู่มือการใช้งานระบบติดตามฝุ่นละอองรายชั่วโมงผ่านดาวเทียม”, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.gistda.or.th>, 2568.
- [16] H. Frumkin, “Environmental Health: From Global to Local”, 4th Edition, John Wiley & Sons, San Francisco, 2023.
- [17] L. Chen, Y. Wang, and J. Smith, “Urban morphology and its impact on PM2.5 spatial distribution: A comparative study of Asian megacities”, *Environmental Pollution*, 312, 2024, pp. 119-134.
- [18] X. Zhang, Q. Li, and H. Tanaka, “Transboundary air pollution and biomass burning: Regional challenges in air quality management”, *Atmospheric Environment*, 298, 2024, 119623.
- [19] J. Miller and R. Garcia, “Integrating geospatial modeling in public health surveillance: Future directions for air quality monitoring”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 21(3), 2025, pp. 412-428.

- [20] กรมควบคุมมลพิษ, “รายงานสถานการณ์มลพิษทางอากาศของประเทศไทย และแนวทางการจัดการปี 2568”, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 2568.
- [21] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, “แผนจัดการคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2566-2570: ประเด็นการจัดการมลพิษทางอากาศข้ามพรมแดน”, [Online], Available: <https://www.onep.go.th>, 2567.

การประเมินและการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กรเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์: กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร

ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL CARBON FOOTPRINT FOR SUSTAINABLE GREENHOUSE GAS EMISSION REDUCTION IN THE CHEMICAL INDUSTRY: A CASE STUDY OF A CHEMICAL COMPANY IN BANGKOK, THAILAND

ศุภกร สุวรรณพันธ์¹ กวินเวทย์ พิพิธนาชนยธร^{1*} วรณลักษณ์ อภินาวิน² และรัชฎ์ลักษณ์ สุภาเนตร¹

Supakorn Suwannapan¹, Kawinwet Pipitthanathunyathorn^{1*}, Wannaluk Apinawin² and Tanyaluk Suphanate¹

¹คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการbin มหาวิทยาลัยเซาท์อีสต์ยางกอก

²คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

E-mail: flukesbc@gmail.com¹

*Corresponding author, E-mail: prachak@sbu.southeast.ac.th

Received: May 8, 2026 Revised: June 17, 2026 Accepted: June 20, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ประเมินและระบุแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2) เสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ 3) เสนอแนวทางการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร การวิจัยเป็นกรณีศึกษาเชิงประยุกต์ โดยรวบรวมข้อมูลด้านการใช้พลังงาน วัตถุดิบ การขนส่ง และการจัดการของเสียจากเอกสารภายในองค์กรร่วมกับการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำข้อมูลมาประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) ตามแนวทางของมาตรฐาน ISO 14064-1 และ GHG Protocol ซึ่งครอบคลุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งทางตรงและทางอ้อมในขอบเขต Scope 1, Scope 2 และ Scope 3 โดยใช้ค่า Emission Factor จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และฐานข้อมูลอ้างอิงที่สอดคล้องกับแนวทางของ GHG Protocol ผลการวิจัยพบว่า องค์กรมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 236,518 tCO₂eq/ปี โดยการปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ (Scope 3) มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 99.18 รองลงมาคือ การปล่อยทางอ้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้า (Scope 2) ร้อยละ 0.59 การปล่อยทางตรงจากการใช้เชื้อเพลิง (Scope 1) ร้อยละ 0.19 และแหล่งปล่อยอื่น ๆ ร้อยละ 0.06 โดยพบว่าแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญขององค์กรส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมในห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งครอบคลุมการจัดการวัตถุดิบ การขนส่ง การใช้บรรจุภัณฑ์ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับลูกค้า แนวทางลดการปล่อยที่เหมาะสม ได้แก่ การจัดซื้อสีเขียว การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ การลดการใช้บรรจุภัณฑ์ การอนุรักษ์พลังงาน การใช้พลังงานหมุนเวียน การปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และการจัดการของเสียตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ตลอดจนการกำหนดตัวชี้วัดด้านสิ่งแวดล้อมและการติดตามประเมินผลการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กรอย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร (CFO), ก๊าซเรือนกระจก, อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์, ISO 14064-1, GHG Protocol

ABSTRACT

This research aimed to 1) assess and identify the major sources of greenhouse gas (GHG) emissions, 2) propose approaches for reducing GHG emissions, and 3) recommend environmental management strategies for

the chemical industry through a case study of a chemical company located in Bangkok, Thailand. The study employed an applied case study approach by collecting data on energy consumption, raw materials, transportation, and waste management from internal organizational records, together with interviews with relevant personnel. The collected data were used to assess the organization's Carbon Footprint for Organization (CFO) in accordance with ISO 14064-1 and the GHG Protocol. The assessment covered both direct and indirect greenhouse gas emissions under Scope 1, Scope 2, and Scope 3, using emission factors provided by the Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization) and reference databases consistent with the GHG Protocol guidelines.

The results revealed that the organization generated a total of 236,518 tCO₂e per year. Other indirect emissions (Scope 3) accounted for the largest proportion at 99.18%, followed by indirect emissions from purchased electricity (Scope 2) at 0.59%, direct emissions from fuel combustion (Scope 1) at 0.19%, and other emission sources at 0.06%. The findings indicated that the major sources of greenhouse gas emissions originated primarily from supply chain activities, including raw material procurement, transportation, packaging utilization, and activities associated with business partners. Appropriate emission reduction measures include green procurement, logistics optimization, packaging reduction, energy conservation, the adoption of renewable energy, replacement of fossil fuel-based equipment, and waste management based on circular economy principles. In addition, the establishment of environmental performance indicators and continuous monitoring and evaluation are essential to enhance systematic greenhouse gas emission management at the organizational level.

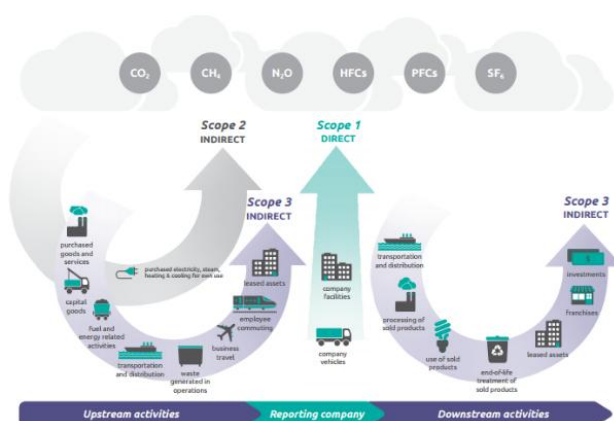
Keywords: Carbon Footprint for Organization (CFO), Greenhouse Gas Emissions, Chemical Industry, ISO 14064-1, GHG Protocol

1. บทนำ

ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) และภาวะโลกร้อน (Global Warming) นับเป็นประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในระดับสากล เนื่องจากส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม และคุณภาพสิ่งแวดล้อมของหลายประเทศทั่วโลก สาเหตุสำคัญของปัญหาดังกล่าวเกิดจากการเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะกิจกรรมในภาคอุตสาหกรรม การใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล และระบบการขนส่ง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] จากสถานการณ์ดังกล่าว องค์กรทั้งภาครัฐและภาคเอกชนจึงให้ความสำคัญกับการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปกับการพัฒนาองค์กรอย่างยั่งยืนมากยิ่งขึ้น โดยมีการนำแนวคิดด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (Environmental, Social and Governance: ESG) มาใช้เป็นกรอบแนวทางในการบริหารจัดการองค์กรเพื่อสร้างสมดุลระหว่างการเติบโตทางธุรกิจกับความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม [2]

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) เป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กร ทั้งในรูปแบบการปล่อยทางตรง (Scope 1) การปล่อยทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Scope 2) และการปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ ตลอดห่วงโซ่อุปทาน (Scope 3) โดยครอบคลุมกิจกรรมด้านการใช้พลังงาน กระบวนการผลิต การขนส่ง การใช้วัตถุดิบ และกิจกรรมภายในห่วงโซ่อุปทาน [3] การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ช่วยให้องค์กรสามารถระบุแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญ และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังช่วยเสริมสร้างภาพลักษณ์องค์กรด้านความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน และสนับสนุนการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืนในระยะยาว [4]

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การศึกษาด้านคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กรในประเทศไทยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขต Scope 1 และ Scope 2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานและกระบวนการดำเนินงานภายในองค์กรเป็นสำคัญ ขณะที่การศึกษาด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในขอบเขต Scope 3 ซึ่งครอบคลุมกิจกรรมตลอดห่วงโซ่อุปทาน อาทิ การจัดหาวัตถุดิบ การใช้บรรจุภัณฑ์ การขนส่ง และการจัดการของเสีย ยังมีจำนวนค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดของประเทศไทย [5] นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ยังไม่ได้เชื่อมโยงแนวคิดการจัดการห่วงโซ่อุปทานสีเขียว (Green Supply Chain Management: GSCM) และกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อม สังคม และธรรมาภิบาล (Environmental, Social and Governance: ESG) เข้ากับการบริหารจัดการคาร์บอนขององค์กรอย่างเป็นระบบ [6] ส่งผลให้แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่นำเสนออาจยังไม่สามารถสะท้อนผลกระทบที่เกิดขึ้นตลอดห่วงโซ่อุปทานได้อย่างครอบคลุมและมีประสิทธิภาพเพียงพอ [7]



รูปที่ 1 แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามขอบเขต Scope 1 Scope 2 และ Scope 3[3]

บริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบธุรกิจผลิตและรับจ้างผลิตผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด ได้ให้ความสำคัญกับการดำเนินธุรกิจควบคู่กับการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อม โดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการพัฒนาองค์กรตามแนวคิด ESG เพื่อสนับสนุนการเติบโตอย่างยั่งยืน ทั้งนี้ จากการจัดทำรายงานการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ประจำปี พ.ศ. 2567 ตามแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พบว่า องค์กรมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 236,366 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประเภท Scope 3 มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็น 234,547 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า รองลงมาคือ Scope 2 จำนวน 1,375 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และ Scope 1 จำนวน 444 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญประกอบด้วยการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติก การใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต การใช้พลังงานไฟฟ้า และกิจกรรมด้านการขนส่งสินค้า ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมภายในห่วงโซ่อุปทานมีบทบาทสำคัญต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมขององค์กร และจำเป็นต้องได้รับการบริหารจัดการอย่างเป็นระบบ

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร โดยครอบคลุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งในขอบเขตที่ 1 (Scope 1) ขอบเขตที่ 2 (Scope 2) และขอบเขตที่ 3 (Scope 3) ตามแนวทางของ GHG Protocol และมาตรฐานที่กำหนดโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) พร้อมทั้งวิเคราะห์แหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีนัยสำคัญในบริบทของอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ของประเทศไทย จุดเด่นของการศึกษานี้อยู่ที่การนำผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์มาเชื่อมโยงกับแนวคิดการจัดการห่วงโซ่อุปทานสีเขียวและแนวทางการดำเนินธุรกิจตามกรอบ ESG เพื่อสนับสนุนการกำหนดมาตรการบริหารจัดการคาร์บอนในระดับองค์กรอย่างเป็นระบบและบูรณาการ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดห่วงโซ่อุปทาน และเสริมสร้างขีดความสามารถใน

การแข่งขันขององค์กรภายใต้แนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการกำหนดนโยบายด้านสิ่งแวดล้อม การจัดทำรายงานความยั่งยืน และการวางกลยุทธ์การลดก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางสำหรับภาคอุตสาหกรรมอื่นที่ต้องการพัฒนาระบบบริหารจัดการคาร์บอนให้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนและเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินและระบุแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระดับองค์กร ของบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ตามแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร
2. เพื่อเสนอแนวทางในการลดและบริหารจัดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการจัดการพลังงาน ห่วงโซ่อุปทานสีเขียว (Green Supply Chain) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)
3. เพื่อพัฒนารอบการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมเชิงกลยุทธ์สำหรับองค์กรอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ โดยบูรณาการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ห่วงโซ่อุปทานสีเขียว และแนวคิด ESG เพื่อสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน

3. ขอบเขตของการวิจัย

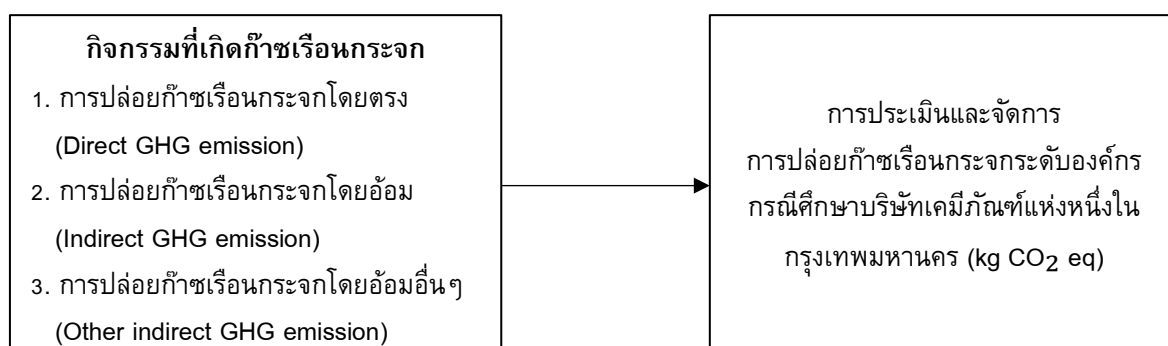
แนวทางการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กร กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร มีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

ขอบเขตด้านเนื้อหาที่ใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย 1) แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก 2) แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ 3) แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol) 4) แนวคิดเกี่ยวกับแนวทางการลดการปล่อยแบบยั่งยืน

ขอบเขตด้านประชากร ประชากรสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 1, 2 และ 3 เท่านั้น

ขอบเขตด้านพื้นที่การวิจัยครั้งนี้ เน้นศึกษาขอบเขตด้านการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 1, 2 และ 3 เท่านั้น โดยดำเนินการศึกษาวิจัยตั้งแต่ มกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2567

4. กรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

5. ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. สามารถประเมินแหล่งกำเนิดและปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญขององค์กร ทั้งใน Scope 1 Scope 2 และ Scope 3 เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างเหมาะสม
2. สามารถนำเสนอแนวทางในการกำหนดมาตรการลดการใช้พลังงาน การลดของเสีย การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ และการบริหารจัดการห่วงโซ่อุปทานสีเขียว กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร
3. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการดำเนินงานขององค์กรให้สอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน และเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศในระยะยาว กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร

6. การทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) เป็นก๊าซในชั้นบรรยากาศที่มีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อน ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาสมดุลอุณหภูมิของโลก อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การผลิตภาคอุตสาหกรรม และการขนส่ง ได้ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [1] ก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) และไนตรัสออกไซด์ (N_2O) [6] ด้วยเหตุนี้ หลายประเทศและภาคอุตสาหกรรมจึงให้ความสำคัญกับการประเมินและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน

แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint Assessment) เป็นกระบวนการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมขององค์กร ผลิตภัณฑ์ หรือบริการ โดยแสดงผลในรูปคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) [9] การประเมินดังกล่าวช่วยให้องค์กรสามารถระบุแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกและกำหนดมาตรการลดการปล่อยได้อย่างเป็นระบบ โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล เช่น GHG Protocol และ ISO 14064-1 ซึ่งแบ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกเป็น Scope 1 Scope 2 และ Scope 3 [3], [7] ผลการประเมินสามารถนำไปใช้ในการวางแผนด้านสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero Emissions [2], [24]

แนวคิดเกี่ยวกับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืนมุ่งเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม โดยสามารถดำเนินการผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การใช้พลังงานหมุนเวียน การปรับปรุงกระบวนการผลิต และการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการประยุกต์ใช้แนวคิดการจัดการห่วงโซ่อุปทานสีเขียว (Green Supply Chain Management) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ซึ่งช่วยลดการใช้ทรัพยากรและของเสีย พร้อมทั้งเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันและสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืน [24]

แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol)

GHG Protocol เป็นมาตรฐานสากลที่พัฒนาโดย World Resources Institute (WRI) และ World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) เพื่อใช้ในการคำนวณและรายงานปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร [3] มาตรฐานดังกล่าวแบ่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกเป็น 3 ขอบเขต ได้แก่ Scope 1 การปล่อยทางตรง Scope 2 การปล่อยทางอ้อมจากการใช้พลังงานไฟฟ้า และ Scope 3 การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ ตลอดห่วงโซ่อุปทาน พร้อมทั้งเน้นหลักความถูกต้อง ความครบถ้วน และความโปร่งใสของข้อมูล เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาอย่างยั่งยืน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ภาคอุตสาหกรรมการผลิตมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูง โดยเฉพาะจากการใช้พลังงาน วัตถุดิบ และการขนส่ง Wiedmann and Minx [9] ระบุว่า การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์เป็นเครื่องมือสำคัญในการระบุแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก ขณะที่ Matthews et al. [10] พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 3 มักมีสัดส่วนสูงที่สุด เนื่องจากเกี่ยวข้องกับกิจกรรมตลอดห่วงโซ่อุปทาน นอกจากนี้ Tsai et al. [11] ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการประยุกต์ใช้แนวคิด Green Supply Chain Management สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและลดต้นทุนการดำเนินงานในระยะยาวได้

7. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กรของบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร โดยมีผู้วิเคราะห์แหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ภายในองค์กร ตลอดจนเสนอแนวทางการบริหารจัดการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน การดำเนินการวิจัยอ้างอิงแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO) ตามหลักเกณฑ์ของ GHG Protocol และมาตรฐาน ISO 14064-1:2018 ร่วมกับแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ซึ่งกำหนดแผนการดำเนินงาน ประกอบด้วย

1. การกำหนดขอบเขตขององค์กร (Organization Boundaries) การกำหนดขอบเขตขององค์กรในการศึกษาครั้งนี้ใช้แนวทางการควบคุมการดำเนินงาน (Operational Control) ซึ่งเป็นแนวทางที่มุ่งพิจารณากิจกรรมและกระบวนการที่องค์กรสามารถบริหารจัดการและควบคุมการดำเนินงานได้โดยตรง ครอบคลุมกิจกรรมภายในองค์กรที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งด้านการผลิต การใช้พลังงาน การขนส่ง และกิจกรรมสนับสนุนต่าง ๆ ภายใต้การดำเนินงานขององค์กร ทั้งนี้ ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมินครอบคลุมช่วงระยะเวลาตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมระยะเวลา 12 เดือน เพื่อให้การประเมินสะท้อนภาพรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรได้อย่างครบถ้วนและสอดคล้องกับสภาพการดำเนินงานจริง

2. การกำหนดขอบเขตการดำเนินงาน (Operation Boundary) การศึกษาครั้งนี้กำหนดขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามแนวทางของ GHG Protocol โดยแบ่งการปล่อยออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

ประเภทที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (Scope 1: Direct Emissions) เป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นโดยตรงจากกิจกรรมภายในองค์กร เช่น การใช้เชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ การใช้ก๊าซ LPG ในกระบวนการดำเนินงาน รวมถึงการรั่วไหลของสารทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น และอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในองค์กร

ประเภทที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Scope 2: Energy Indirect Emissions) เป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าที่องค์กรจัดซื้อจากภายนอกมาใช้ในกระบวนการดำเนินงาน และกิจกรรมต่าง ๆ ภายในองค์กร

ประเภทที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ (Scope 3: Other Indirect Emissions) เป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ตลอดห่วงโซ่อุปทานขององค์กร ซึ่งครอบคลุมกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดซื้อวัตถุดิบและบรรจุก๊าซ การขนส่งสินค้า การจัดการของเสีย การเดินทางเพื่อธุรกิจ ตลอดจนกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับผู้ส่งมอบและคู่ค้าทางธุรกิจ

3. การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ผู้วิจัยทำการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตของกรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร อ้างอิงแนวทางขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ร่วมกับหลักการของ GHG Protocol และมาตรฐาน ISO 14064-1:2018 โดยใช้ข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) เพื่อแปลงข้อมูลการใช้ทรัพยากรหรือ

การดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ให้เป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ดังสมการ

$$Emission = Activity Data \times Emission Factor$$

โดยที่

Emission หมายถึง ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ขององค์กร ซึ่งแสดงผลในหน่วย กิโลกรัมหรือ ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kgCO₂e หรือ tCO₂e)

Activity Data หมายถึง ข้อมูลที่สะท้อนการใช้ทรัพยากรหรือการดำเนินกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh) ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร) ปริมาณการใช้ก๊าซ LPG (กิโลกรัม) ปริมาณวัตถุดิบหรือบรรจุภัณฑ์ที่จัดซื้อ (กิโลกรัม) และปริมาณของเสียที่นำไปกำจัด (กิโลกรัม)

Emission Factor หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลกิจกรรมให้เป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีหน่วยแตกต่างกันตามประเภทของกิจกรรม เช่น kgCO₂e/kWh หรือ kgCO₂e/L ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

3.1 การระบุแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจก ผู้วิจัยได้ระบุแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกที่อยู่ในขอบเขตการดำเนินงานขององค์กร ทั้งในส่วนของ Scope 1 Scope 2 และ Scope 3 เพื่อให้ครอบคลุมกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด และเพื่อให้สามารถเลือกวิธีการคำนวณที่เหมาะสมกับลักษณะของแต่ละกิจกรรมได้อย่างถูกต้อง

3.2 การรวบรวมข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) ข้อมูลกิจกรรมที่ใช้ในการคำนวณรวบรวมจากเอกสารและฐานข้อมูลภายในองค์กร ได้แก่ ใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า รายงานการใช้เชื้อเพลิง เอกสารการจัดซื้อวัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ รายงานการขนส่งสินค้า และข้อมูลการจัดการของเสีย ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้รับได้ผ่านการตรวจสอบความครบถ้วนและความถูกต้องก่อนนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

3.3 การเลือกค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อ้างอิงจากแหล่งข้อมูลที่ได้รับการยอมรับทั้งในระดับประเทศและระดับสากล ได้แก่

- 1) ฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (Thailand Greenhouse Gas Management Organization: TGO)
- 2) ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของประเทศไทย (Thai National Life Cycle Inventory Database)
- 3) แนวทางการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)

การเลือกใช้ค่า Emission Factor พิจารณาจากความสอดคล้องกับประเภทของกิจกรรม ความเป็นปัจจุบันของข้อมูล และความสามารถในการตรวจสอบแหล่งที่มาของข้อมูลได้อย่างชัดเจน

3.4 ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตัวอย่างการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงานไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (Activity Data) เท่ากับ 10,000 kWh

ค่า Emission Factor ของไฟฟ้าประเทศไทยจากฐานข้อมูล TGO เท่ากับ 0.4999 kgCO₂e/kWh

ดังนั้น ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสามารถคำนวณได้จาก

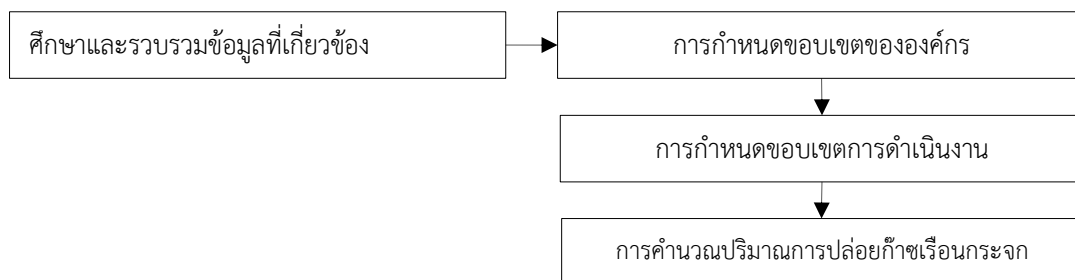
$$\begin{aligned} Emission &= 10,000 \times 0.4999 \\ &= 4,999 \text{ kgCO}_2\text{e} \end{aligned}$$

จากการคำนวณดังกล่าว พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณ 10,000 kWh ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 4.999 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการใช้พลังงาน

และปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมขององค์กร

4) การเก็บข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ข้อมูลกิจกรรมประกอบการคำนวณมีการเก็บข้อมูลกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ไม่ได้ขัดแย้งกับวิธีการคำนวณที่ได้เลือกไว้ ทั้งนี้ ข้อมูลทั้งหมดได้รับการบันทึกไว้ในรูปแบบที่เหมาะสม สำหรับใช้วิเคราะห์หรือทวนสอบได้อีก

5) การคัดเลือกค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้ข้อมูลกิจกรรมประกอบการคำนวณมีการคัดเลือกค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ทราบแหล่งที่มา ซึ่งเป็นที่ยอมรับ มีความเหมาะสมกับแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกแต่ละแหล่ง เป็นค่าปัจจุบันในขณะที่ใช้คำนวณ คำนึงถึงความไม่แน่นอนในการคำนวณ และนำมาใช้คำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ไม่ขัดแย้งกับการประยุกต์ใช้บัญชีรายการปริมาณก๊าซเรือนกระจก



รูปที่ 3 การดำเนินการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร

ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และวิธีการสุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัย ได้แก่ กิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 1, 2 และ 3 ภายในองค์กรทั้งนี้ผู้ให้ข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ เจ้าหน้าที่สิ่งแวดล้อม ผู้จัดการฝ่ายบัญชี เจ้าหน้าที่ฝ่ายจัดซื้อ หัวหน้างานขนส่ง หัวหน้าฝ่ายวางแผนการผลิต ผู้จัดการฝ่ายออกแบบและพัฒนาบรรจุภัณฑ์จำนวนทั้งหมด 8 คน คัดเลือกแบบเจาะจง เป็นวิธีการเลือกกลุ่มเป้าหมาย โดยเฉพาะผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ในด้านการผลิต ทั้งนี้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ 1) กำหนดมาตรฐาน GHG Protocol และ ISO 14064-1:2018 ร่วมกับแนวทางขององค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์กรมหาชน) เพื่อกำหนดขอบเขตการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 1, Scope 2 และ Scope 3 2) ใช้แบบฟอร์มการเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) จากหน่วยงานภายในองค์กร ครอบคลุมข้อมูลการใช้พลังงาน เชื้อเพลิง วัตถุดิบ และการขนส่ง โดยอ้างอิงจากเอกสารและระบบสารสนเทศขององค์กร 3) ใช้ฐานข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) จาก IPCC และฐานข้อมูล LCI ของประเทศไทยในการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 4) โปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมือในการคำนวณและประมวลผลข้อมูล 5) ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงพรรณนาและการคำนวณค่า Carbon Intensity (tCO₂e/kg) เพื่อประเมินผลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร

วิธีการเก็บข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยตนเอง เนื่องจากผู้วิจัยปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นกรณีศึกษา โดยเริ่มจากการประสานงานกับองค์กรกรณีศึกษาเพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเข้าถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จากนั้นดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) ที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยใช้แบบฟอร์มตามแนวทางขององค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์กรมหาชน) ร่วมกับโปรแกรม Microsoft Excel ครอบคลุมข้อมูลด้านการใช้พลังงาน การใช้เชื้อเพลิง การใช้วัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ ตลอดจนกิจกรรมด้านการขนส่งและโลจิสติกส์ ข้อมูลดังกล่าวได้มาจากเอกสารภายในองค์กร การสัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้อง และการสังเกตกระบวนการดำเนินงานจริง พร้อมทั้งจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์เพื่อรองรับการตรวจสอบย้อนกลับเพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความครบถ้วนและความสอดคล้องของข้อมูลตาม

แนวทางของ GHG Protocol และ ISO 14064-1:2018 โดยอ้างอิงหลักฐานจากเอกสารขององค์กร ได้แก่ ใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า รายงานการใช้เชื้อเพลิง เอกสารการจัดซื้อวัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ รายงานการขนส่งสินค้า และเอกสารการจัดการของเสีย รวมทั้งใช้ข้อมูลจากการสัมภาษณ์และการสังเกตกระบวนการดำเนินงานเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน

ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) ฐานข้อมูลวัฏจักรชีวิตของประเทศไทย และแนวทางของ IPCC ซึ่งเป็นฐานข้อมูลที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analysis) เพื่อคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในหน่วยตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO₂e) และวิเคราะห์สัดส่วนการปล่อยในแต่ละ Scope เพื่อใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมขององค์กรอย่างยั่งยืน

8. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินและการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กรเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร วัตถุประสงค์เพื่อประเมินแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เสนอแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมและยั่งยืน และใช้ผลการวิจัยเป็นแนวทางในการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อมขององค์กรในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ซึ่งสามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ ดังนี้

ผลการวิเคราะห์สามารถประเมินและระบุแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กร บริษัทกรณีศึกษามีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด 236,518 tCO₂-eq/ปี สามารถจำแนกตามขอบเขตการปล่อย พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่น ๆ (Scope 3) มีปริมาณสูงสุด เท่ากับ 234,547 tCO₂-eq/ปี คิดเป็น ร้อยละ 99.17 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือ Scope 2 จากการใช้พลังงานไฟฟ้า 1,375 tCO₂-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 0.58 Scope 1 จากการใช้เชื้อเพลิงโดยตรง 444 tCO₂-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 0.19 และ อื่น ๆ 152 tCO₂-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 0.06 ตามลำดับ รายละเอียดตามตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ขอบเขตการปล่อยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ขอบเขตการปล่อย (Scope)	ปริมาณการปล่อย (tCO ₂ -eq/ปี)	สัดส่วน/การปล่อยทั้งหมด (ร้อยละ)
1. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางตรง (Scope 1) (Direct Emissions)	444	0.19
2. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมจากการใช้พลังงาน (Scope 2) (Indirect Emissions from Purchased Energy)	1,375	0.58
3. การปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมอื่นๆ ในห่วงโซ่มูลค่า (Scope 3 (Other Indirect Emissions from Value Chain))	234,547	99.17
4. อื่น ๆ	152	0.06
รวมทั้งหมด	236,518.00	100.00

จากผลการวิเคราะห์ตารางที่ 1 องค์กรควรให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการและลดการปล่อยใน Scope 3 เป็นลำดับแรก เช่น การจัดการวัตถุดิบ การขนส่ง การใช้ผลิตภัณฑ์ และกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับลูกค้า เนื่องจากเป็นสัดส่วนเกือบ

ทั้งหมดของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ขณะเดียวกันควรดำเนินการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานใน Scope 1 และ Scope 2 ควบคู่กันไป เพื่อสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมขององค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนให้เห็นแหล่งกำเนิดหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรอยู่ในกิจกรรมทางอ้อมตลอดห่วงโซ่อุปทาน ได้แก่ การจัดซื้อวัตถุดิบ การขนส่งสินค้า การใช้บริการจากภายนอก การใช้บรรจุภัณฑ์ การเดินทางเพื่อธุรกิจ และการจัดการของเสีย มากกว่ากิจกรรมภายในโรงงานโดยตรง

การวิเคราะห์เชิงลึกของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 3 พบว่า แหล่งกำเนิดหลักมาจากกิจกรรมการจัดซื้อสินค้าและบริการ (Purchased Goods and Services) ปริมาณ 187,638 tCO₂-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 80.00 ของการปล่อยใน Scope 3 รองลงมาคือกิจกรรมด้านการขนส่ง (Transportation) ปริมาณ 28,146 tCO₂-eq/ปี คิดเป็นร้อยละ 12.00 กิจกรรมต้นน้ำ (Upstream Activities) ร้อยละ 5.00 และของเสียจากการดำเนินงาน (Waste Generated) ร้อยละ 3.00 รวมปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกใน Scope 3 เท่ากับ 234,547 tCO₂-eq/ปี สะท้อนให้เห็นว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทานมากกว่ากิจกรรมภายในองค์กร โดยมีสาเหตุสำคัญจากการจัดซื้อวัตถุดิบ การขนส่ง และการจัดการของเสีย ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด Green Supply Chain และ Circular Economy สำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน องค์กรควรให้ความสำคัญกับการลด Scope 3 เป็นลำดับแรก ผ่านการคัดเลือกผู้ส่งมอบที่มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ การใช้วัตถุดิบและบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และการประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ควบคู่กับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าและการใช้พลังงานสะอาดเพื่อลด Scope 2 รวมถึงการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเพื่อลด Scope 1 นอกจากนี้ องค์กรควรจัดทำฐานข้อมูลคาร์บอน กำหนดเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกระยะยาว และบูรณาการการบริหารจัดการคาร์บอนเข้ากับกลยุทธ์องค์กร เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันและสนับสนุนการเติบโตอย่างยั่งยืนในอนาคต

การบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อมระดับองค์กรในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร โดยการนำแนวคิด Balanced Scorecard มาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อม ช่วยให้องค์กรอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์สามารถเปลี่ยนจากการบริหารแบบแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ไปสู่การบริหารเชิงระบบที่เชื่อมโยง คน กระบวนการ ลูกค้า และผลประโยชน์ เข้าด้วยกัน ส่งผลให้องค์กรลดคาร์บอน ลดต้นทุน สร้างความเชื่อมั่น และเติบโตอย่างยั่งยืนในระยะยาว โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 การบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อมระดับองค์กรในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร

มุมมอง	การจัดการเชิงกลยุทธ์	ตัวชี้วัด KPI	เป้าหมาย	โครงการ/กิจกรรม
1. การเงิน (Financial)	ลดต้นทุนด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม	ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยผลิต	ลด 15%	โครงการประหยัดพลังงานและติดตั้งโซลาร์รูฟ
	ลดต้นทุนโลจิสติกส์	ค่าขนส่งต่อยอดขาย	ลด 10%	โครงการวางแผนเส้นทางขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพ
	เพิ่มผลตอบแทนโครงการสีเขียว	ROI โครงการสิ่งแวดล้อม	>15%	แผนลงทุนเทคโนโลยีสีเขียว
2. ลูกค้า (Customer)	สร้างภาพลักษณ์องค์กรสีเขียว	คะแนนความพึงพอใจลูกค้า	>90%	โครงการส่งเสริมภาพลักษณ์องค์กรรักษาสีเขียว
	เพิ่มยอดขายสินค้ารักษ์โลก	% รายได้จาก Green Product	20%	โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
	เพิ่มความเชื่อมั่นลูกค้า	จำนวนลูกค้าหลักที่ต่อสัญญา	เพิ่มขึ้นทุกปี	โครงการพัฒนาลูกค้าตามมาตรฐาน ESG

มุมมอง	การจัดการเชิงกลยุทธ์	ตัวชี้วัด KPI	เป้าหมาย	โครงการ/กิจกรรม
3. กระบวนการภายใน (Internal Process)	ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	tCO2e รวมทั้งองค์กร	ลด 5–10%	โครงการลดคาร์บอนระดับองค์กร
	ลดของเสียจากการผลิต	ของเสียต่อหน่วยผลิต	ลด 20%	โครงการผลิตสะอาดและเศรษฐกิจหมุนเวียน
	เพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน	kWh ต่อหน่วยผลิต	ลด 10%	โครงการจัดการพลังงานในโรงงาน
	พัฒนาห่วงโซ่อุปทานสีเขียว	% Supplier ผ่านเกณฑ์ ESG	80%	โครงการจัดซื้อสีเขียว
4. การเรียนรู้และพัฒนา (Learning & Growth)	สร้างวัฒนธรรมองค์กรสีเขียว	% พนักงานผ่านอบรม	100%	โครงการอบรมความรู้ด้านคาร์บอนและสิ่งแวดล้อม
	พัฒนานวัตกรรมสิ่งแวดล้อม	จำนวนโครงการใหม่/ปี	≥3 โครงการ/ปี	Green Innovation Lab
	เพิ่มการมีส่วนร่วมพนักงาน	จำนวนข้อเสนอแนะ	≥50 ข้อ/ปี	Green Suggestion System

9. สรุปและอภิปรายผล

การประเมินและการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กรเพื่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ผลการวิจัยพบว่า แหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญขององค์กรอยู่ใน Scope 3 หรือการปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ รองลงมาคือ Scope 2 จากการใช้พลังงานไฟฟ้า และ Scope 1 จากการใช้เชื้อเพลิงโดยตรง สะท้อนให้เห็นว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของธุรกิจอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นตลอดห่วงโซ่อุปทาน เช่น การจัดซื้อวัตถุดิบ การขนส่ง บรรจุภัณฑ์ และกิจกรรมของคู่ค้า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Iamchamnan et al. (2025) [16] และรายงานของ Deloitte (2024) [19] ที่ระบุว่า Scope 3 เป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญของหลายอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยมีความแตกต่างจากการศึกษาของ Jijai et al. (2024) [17] ซึ่งพบว่า Scope 2 มีสัดส่วนสูงสุด เนื่องจากลักษณะกิจกรรมและโครงสร้างของแต่ละองค์กรมีความแตกต่างกันสำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน องค์กรควรให้ความสำคัญกับการลด Scope 3 เป็นลำดับแรก ผ่านการจัดซื้อสีเขียว การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ การลดการใช้บรรจุภัณฑ์ และการส่งเสริมความร่วมมือกับคู่ค้าควบคู่กับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การใช้พลังงานหมุนเวียน และการประยุกต์ใช้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางที่เสนอโดย Boonyasopon et al. (2026) [18] และองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (TGO) [20] นอกจากนี้ องค์กรควรนำข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์มาใช้ในการกำหนดนโยบายและเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม พร้อมทั้งพัฒนาห่วงโซ่อุปทานสีเขียวและบูรณาการการบริหารจัดการคาร์บอนเข้ากับกลยุทธ์องค์กร เพื่อสนับสนุนการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Porter and Kramer (2019) [15] และแนวปฏิบัติของภาคอุตสาหกรรมไทยที่ใช้ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์เป็นเครื่องมือในการกำหนดนโยบายและรายงานความยั่งยืนระดับองค์กร ทั้งนี้ ความสำเร็จของการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนจากผู้บริหาร การมีระบบข้อมูลที่เหมาะสม และการกำหนดตัวชี้วัดที่ชัดเจน เพื่อให้เกิดผลลัพธ์เชิงโครงสร้างและสร้างความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว



ภาพที่ 2 กลยุทธ์การบริหารจัดการการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างยั่งยืน กรณีศึกษาบริษัทเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งใน กรุงเทพมหานคร

จากการวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็น การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์จะเกิดผลอย่างมีนัยสำคัญ หากมุ่งบริหารจัดการแหล่งปล่อยทางอ้อม (Scope 3) ซึ่งงานวิจัยได้พัฒนาแนวทางการบริหารจัดการแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงระหว่างการบริหารจัดการคาร์บอน การบริหารห่วงโซ่อุปทานสีเขียว การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การจัดการตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน และการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบในระดับองค์กร ซึ่งถือเป็นกรอบแนวคิดใหม่ที่สามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับธุรกิจภาคการผลิตและบริการอื่น ๆ ได้ โดยองค์กรสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์องค์กร การวางแผนลดคาร์บอนระยะสั้นและระยะยาว การคัดเลือกคู่ค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การลดต้นทุนพลังงานและโลจิสติกส์ ตลอดจนการพัฒนากลยุทธ์ ESG เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน สร้างภาพลักษณ์องค์กรสีเขียว และขับเคลื่อนองค์กรสู่ความยั่งยืนในระดับสากลได้อย่างเป็นรูปธรรมในระยะยาว

10. ข้อเสนอแนะ

1. องค์กรควรจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กร (CFO) เป็นประจำทุกปี เพื่อระบุแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ติดตามผลการลดคาร์บอน และใช้ข้อมูลประกอบการวางแผนเชิงกลยุทธ์ขององค์กร
2. องค์กรควรเร่งดำเนินการลด Scope 3 คัดเลือกผู้ส่งมอบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ปรับปรุงระบบขนส่ง ลดการใช้บรรจุภัณฑ์ และสร้างความร่วมมือกับคู่ค้าในการลดคาร์บอนตลอดห่วงโซ่อุปทาน
3. องค์กรควรเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในองค์กร โดยเปลี่ยนอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน ติดตั้ง Solar Rooftop บำรุงรักษาเครื่องจักร และกำหนดมาตรการประหยัดพลังงานในทุกหน่วยงาน
4. บูรณาการเป้าหมายสิ่งแวดล้อมเข้ากับการบริหารองค์กร โดยกำหนด KPI ด้านพลังงานและคาร์บอน มอบหมายพนักงาน สร้างวัฒนธรรมองค์กรสีเขียว และจัดทำรายงาน ESG เพื่อเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันอย่างยั่งยืน

11. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนข้อมูลอันสำคัญและทรงคุณค่าอย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ทั้งการอนุญาตให้เข้าถึงกระบวนการผลิต ข้อมูลการบริหารจัดการวัตถุดิบ การกระจายสินค้า ตลอดจนการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งล้วนเป็นปัจจัยสำคัญที่เอื้อให้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ระดับองค์กรสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ครบถ้วน และมีความน่าเชื่อถือเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอแสดงความซาบซึ้งในความเมตตา ความร่วมมือ และความเอื้อเฟื้อจากคณะผู้บริหารและทีมงานทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2023: Synthesis Report*, IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.
- [2] United Nations, *The Sustainable Development Goals Report 2023*, United Nations, New York, NY, USA, 2023.
- [3] World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), *The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, Revised Edition, WRI/WBCSD, Washington, DC, USA, 2015.
- [4] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), *Carbon Footprint for Organization Guideline*, TGO, Bangkok, Thailand, 2022.
- [5] D. Stern and M. Taylor, "Climate change: risk, ethics, and the Stern Review", *Science*, 317(5835), 2007, pp. 203–204.
- [6] United Nations Environment Programme (UNEP), *Emissions Gap Report 2022*, UNEP, Nairobi, Kenya, 2022.
- [7] International Organization for Standardization, *ISO 14064-1: Greenhouse Gases—Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals*, ISO, Geneva, Switzerland, 2018.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, IGES, Hayama, Japan, 2006.
- [9] T. Wiedmann and J. Minx, "A definition of carbon footprint", in *Ecological Economics Research Trends*, Nova Science Publishers, New York, NY, USA, 2008, pp. 1–11.
- [10] H. S. Matthews, C. T. Hendrickson, and C. L. Weber, "The importance of carbon footprint estimation boundaries", *Environmental Science & Technology*, 42(16), 2008, pp. 5839–5842.
- [11] W. H. Tsai, Y. W. Lee, and S. J. Yang, "A study of carbon footprint and reduction strategies in the manufacturing industry", *Journal of Cleaner Production*, 103, 2015, pp. 424–431.
- [12] S. K. Srivastava, "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review", *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 2007, pp. 53–80.
- [13] J. Sarkis, Q. Zhu, and K. H. Lai, "An organizational theoretic review of green supply chain management literature", *International Journal of Production Economics*, 130(1), 2011, pp. 1–15.
- [14] M. E. Porter and M. R. Kramer, "Creating Shared Value", *Harvard Business Review*, 89(1–2), 2011, pp. 62–77.
- [15] M. E. Porter and M. R. Kramer, "Creating shared value", in *Managing Sustainable Business: An Executive Education Case and Textbook*, G. G. Lenssen and N. C. Smith, Eds., Springer, Cham, Switzerland, 2019, pp. 323–346.
- [16] P. Iamchamnan et al., "Assessment of carbon footprint for organization in frozen processed seafood manufacturing plants", *Processes*, 13(7), 2025, Article no. 1990.
- [17] S. Jijai et al., "Organisation carbon footprint assessment and greenhouse gas reduction emission of Yala Rajabhat University, Thailand", *Journal of Sustainability Science and Management*, 19(6), 2024, pp. 127–136.
- [18] P. Boonyasopon et al., "A perspective on carbon footprints and carbon reduction strategies", *International Journal of Applied Science and Technology*, 19(2), 2026, pp. 1–10.
- [19] Deloitte, *Procuring Lower Scope 3 Emissions: Five Steps to Decarbonize Supply Chains*, Deloitte, 2024.

- [20] Thailand Greenhouse Gas Management Organization, (2024, Jun. 21). *Carbon Footprint for Organization Guideline*, [Online] Available: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th>
- [21] Siam City Cement Public Company Limited, *Carbon Footprint for Organization Report 2024*, Siam City Cement Public Company Limited, Bangkok, Thailand, 2024.
- [22] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), รายงานสถานการณ์ก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย พ.ศ. 2566, องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), กรุงเทพมหานคร, 2566.
- [23] United Nations Global Compact, *Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World*, United Nations, New York, NY, USA, 2004.
- [24] United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, United Nations, New York, NY, USA, 2015.

การวิเคราะห์เชิงออกแบบการจัดวางแผงโซลาร์เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์แบบชั้นรูป สำหรับติดตั้งบนตัวถังรถพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge 2027

A DESIGN ANALYSIS OF MOLDED PHOTOVOLTAIC PANEL LAYOUT FOR INTEGRATION ONTO THE BODY OF A SOLAR-POWERED VEHICLE FOR THE BRIDGESTONE WORLD SOLAR CHALLENGE 2027

ศรายุทธ โรหิตเสถียร วรงค์ จิวเรือง และทศพล สีน้าเงิน

Sarayut Rohitsathian*, Warong Ngewruang and Tossapol Srinamngan

สาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

*Corresponding author Email: Sarayutr@siamtechno.ac.th

Received: May 29, 2026 Revised: June 18, 2026 Accepted: June 20, 2026

บทคัดย่อ

การจัดทำบทความนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อการออกแบบและสร้างแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งบนฝากระโปรงรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อใช้ในการทดลองและหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ การหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์บนฝากระโปรงรถยนต์ไฟฟ้า โดยแผงโซลาร์เซลล์มีจำนวนทั้งหมด 182 เซลล์ โดยรูปแบบของการต่อเป็นแบบอนุกรมทั้งหมด 6 ชุด โดยชุดที่ 1 กับ 6 ได้จำนวนเซลล์ 27 เซลล์เท่ากันและได้แรงดันไฟฟ้าชุดละ 13.5 V ชุดที่ 2, 3, 4 และ 5 ได้จำนวนเซลล์ 32 เซลล์เท่ากันและได้แรงดันไฟฟ้า ชุดละ 16 V พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ดังนี้ เครื่องมือวัดความเข้มแสง เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ รวมถึงการเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับวัดต์มิเตอร์ โดยการเก็บผลจะเก็บผลทุกๆ 10 นาที ตั้งแต่ เวลา 09.00 น. - 15.00 น. ภายในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 จากการทดสอบการหาค่าความเข้มแสงที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อแผงโซลาร์เซลล์โดยตรง คือ แผงโซลาร์เซลล์รับแสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มที่และทำให้เกิดกำลังไฟที่สูงขึ้น จึงได้ค่าประสิทธิภาพของแผงเพิ่มมากขึ้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงมีผลต่อค่าประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยตรง คือ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากแสงจากดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมาที่แผงอาจถูกหักเหด้วยความชื้นที่สะสมอยู่ในอากาศทำให้ผลิตกำลังไฟได้น้อยลง

คำสำคัญ : การออกแบบและสร้างแผงโซลาร์เซลล์ รถยนต์ไฟฟ้า ประสิทธิภาพแผงโซลาร์เซลล์

Abstract

This study presents the design and development of a solar panel system installed on the hood of an electric vehicle, with the objective of evaluating its energy generation performance under real environmental conditions. The system comprises a total of 182 photovoltaic cells arranged into six series-connected modules. Modules 1 and 6 each consist of 27 cells, generating 13.5 V per module, while modules 2, 3, 4, and 5 each consist of 32 cells, generating 16 V per module. To assess system performance, measurement instruments including a solar irradiance meter, a relative humidity sensor, and a wattmeter were integrated into the experimental setup.

Data were collected at 10 minute intervals between 09:00 and 15:00 throughout December 2025. The experimental results demonstrate that increased solar irradiance has a direct positive effect on the photovoltaic system, leading to higher power output and improved efficiency. In contrast, elevated relative humidity negatively impacts system performance, as atmospheric moisture can cause light scattering and refraction, thereby reducing the effective solar radiation incident on the panel surface and decreasing power generation.

Keywords: Solar panel design and building, Electric vehicle, Solar panel efficiency

1. บทนำ

โซลาร์เซลล์ (Solar Panel) เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง ในอุตสาหกรรมยานยนต์ให้ความสำคัญและมีการพัฒนา ปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง บริษัท บริดจสโตน คอร์ปอเรชั่น จำกัด ผู้นำระดับโลกด้านยางรถยนต์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับยาง เล็งเห็นความสำคัญดังกล่าว จึงจัดให้มีการแข่งขันรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ระดับโลกขึ้นที่ประเทศออสเตรเลีย ในปี 2027 ใช้ชื่อว่า Bridgestone World Solar Challenge(BWSC) เพื่อส่งเสริมวิศวกรและนักศึกษาทั่วโลกในการสร้างสรรค์ยานพาหนะพลังงานสะอาด โดย บริษัท บริดจสโตน คอร์ปอเรชั่น จำกัด ได้ให้การสนับสนุนทีมจากสาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม เป็นตัวแทนประเทศไทยในรายการแข่งขันนี้ ไม่เพียงแต่เป็นการแข่งขันความเร็ว แต่ยังเป็นเวทีที่สะท้อนถึงความคิดสร้างสรรค์ ความท้าทายและมุ่งเน้นไปสู่การเดินทางในอนาคตที่ยั่งยืน [1]

ดังนั้นสาขาวิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม จำเป็นต้องเตรียมแผนงานและความพร้อมในด้านต่างๆ ในแต่ละส่วนที่เกี่ยวข้อง ผู้ทำการวิจัยมีความสนใจในเรื่องของแผงโซลาร์เซลล์ ในการออกแบบการจัดวางแผงโซลาร์เซลล์ สำหรับติดตั้งบนตัวถังรถพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อการแข่งขัน และใช้แผงโซลาร์เซลล์เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. วัตถุประสงค์

การทำการวิจัยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. ออกแบบและสร้างแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งบนรถยนต์ไฟฟ้า
2. หาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์บนฝากระโปรงรถยนต์ไฟฟ้า

3. การดำเนินการวิจัย

ลำดับวิธีการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

3.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ

การจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ บนฝากระโปรงรถยนต์ไฟฟ้า [2]
ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงจำนวนอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ บนฝากระโปรงรถยนต์ไฟฟ้า

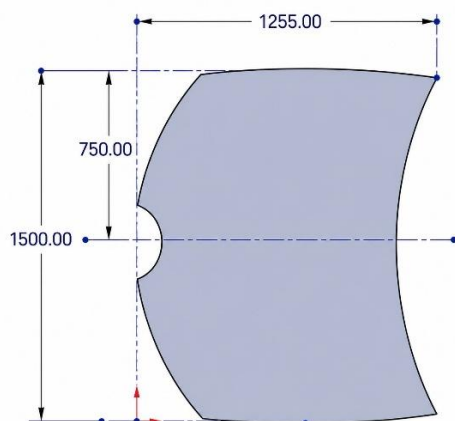
รายชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น / ประเภท / ยี่ห้อ	ขนาด	จำนวน
1. แผงโซลาร์เซลล์ (Solar Cell)	Mono Crystalline	157 mm × 26 mm	186 แผง
2. บัสบาร์ (Busbar Strips)	ทองแดงเคลือบเงิน	(กว้าง × หนา) 2.0 mm × 0.2 mm	153 ชิ้น

รายชื่ออุปกรณ์และเครื่องมือ	รุ่น / ประเภท / ยี่ห้อ	ขนาด	จำนวน
3. เครื่องบัดกรี	Model 8586	และ 5.0 mm × 0.2 mm 700 W. Input 220 V. Output 24 V.	32 ชิ้น 3 เครื่อง
4. สารทำความสะอาด (Flux)	Kester 951 Flux-Pen		10 มล.
5. ตะกั่วบัดกรี	TOSHINO SOL-3	Dia. 0.8 - 1.0 mm	5 เมตร
6. แผ่นอะคริลิกใส	ประเภทใส	160.20 mm × 1000 mm × 1.0 mm	1 แผ่น
7. เรซิน	ประเภทใสพิเศษ	5 ลิตร	1 แกลอน
8. มัลติมิเตอร์	ยี่ห้อ HABOTEST	วัดไฟฟ้าได้ 600 V	1 อัน
9. แปรงทาเรซิน	N/A	1/2 in. × 1.0 in. × 2.0 in.	3 ชิ้น
10. น้ำยาประสานบัดกรี	N/A	N/A	กระปุก
11. ฝากระบะโปรแกรยนต์	Toyota Camry 2013	1500 mm × 1255 mm	1 ชิ้น

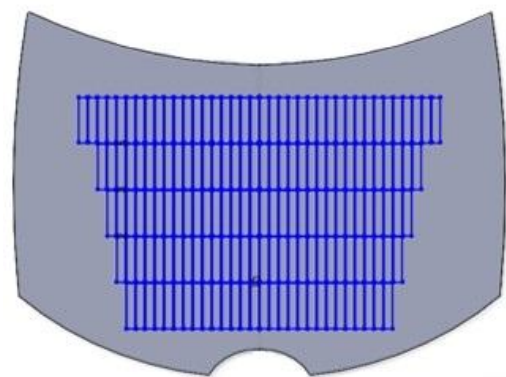
3.2 การสร้างแผงโซลาร์เซลล์

การสร้างแผงโซลาร์เซลล์มีขั้นตอนการสร้าง ดังนี้

1. คำนวณหาจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ติดตั้งบนฝากระบะโปรแกรยนต์ (ดังรูปที่ 1 และ 2)

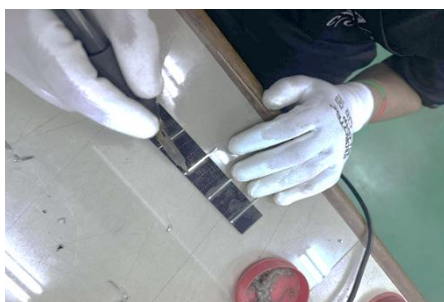


รูปที่ 1 ขนาดของฝากระบะโปรแกรยนต์ Toyota Camry 2013



รูปที่ 2 การวางแผงโซลาร์เซลล์

2. นำแผงโซลาร์เซลล์มาต่อกันแบบอนุกรมเป็นชุดๆ โดยใช้บัดกรี (ดังรูปที่ 3)
3. เคลือบผิวแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเรซิน (ดังรูปที่ 4)



รูปที่ 3 แสดงการต่อแผงโซลาร์เซลล์

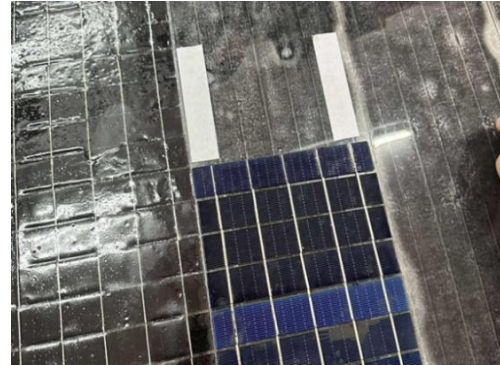


รูปที่ 4 แสดงการเคลือบผิวแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเรซิน

4. ติดตั้งแผ่นอะคริลิกใส่เข้ากับฝากระโปรงรถโดยใช้กาวสองหน้า (ดังรูปที่ 5)
5. นำแผงโซลาร์เซลล์ที่ต่อกันแบบอนุกรมแต่ละชุด มาวางบนแผ่นอะคริลิกที่อยู่บนฝากระโปรงรถยนต์ โดยใช้กาวสองหน้า (ดังรูปที่ 6)



รูปที่ 5 แสดงการติดตั้งแผ่นอะคริลิก



รูปที่ 6 แสดงการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์

6. เชื่อมแผงโซลาร์เซลล์แต่ละชุดให้เป็นชุดเดียวกันทั้งหมด (ดังรูปที่ 7)
7. เชื่อมสายไฟเข้ากับแบตเตอรี่เพื่อที่จะนำไปใช้งาน (ดังรูปที่ 8)



รูปที่ 7 แสดงการเชื่อมแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 8 แสดงการเชื่อมสายไฟเข้ากับแบตเตอรี่

8. เคลือบผิวแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเรซิน (ดังรูปที่ 9)
9. ติดตั้งอินเวอร์เตอร์ เพื่อหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด Maximum Point Tracking Solar : MPPT (ดังรูปที่ 10)



รูปที่ 9 แสดงการเคลือบผิวด้วยเรซิน



รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งอินเวอร์เตอร์

10. เชื่อมต่อสายไฟจากชุดแผงโซลาร์เซลล์เข้า MPPT ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ (ดังรูปที่ 11)



รูปที่ 11 แสดงการเชื่อมต่อสายไฟ

11. นำขั้วสายไฟทั้งขั้วบวกและขั้วลบจาก MPPT ไปใช้งาน

3.3 การทดสอบ

การทดสอบกำลังไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์แสงอาทิตย์บนฝากระโปรง มีขั้นตอนดังนี้

1. นำฝากระโปรงติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ไปบริเวณโล่งแจ้งที่สามารถรับแสงแดดได้ (ดังรูปที่ 12)
2. ติดตั้งชุดสายไฟจากแผงโซลาร์เซลล์เข้ากับโหนด (ดังรูปที่ 13)



รูปที่ 12 แสดงฝากระโปรงติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์



รูปที่ 13 แสดงการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เข้ากับโหนด

3. วัดค่าต่างๆ ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ กำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสะสมและอุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์ พร้อมบันทึกลงในตาราง (ดังรูปที่ 14 และ 15)



รูปที่ 14 แสดงการวัดค่าต่างๆ



รูปที่ 15 บันทึกค่าต่างๆ

4. หาค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ นำค่าเฉลี่ยมาคำนวณภายใต้การทดสอบมาตรฐาน Standard Test Condition (STC)

สูตรการคำนวณประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์

$$\eta = P_{\max} / (G \times A) \times 100 \quad (1)$$

η = ประสิทธิภาพของแผง (%)

$P_{\max}$ = กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้ในสภาวะ STC (W)

G = ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผง (W/m^2)

A = พื้นที่ของเซลล์ (m^2)

แทนค่า

$$\eta = 46.21 \text{ (W)} / (745.44 \text{ (W/m}^2) \times 0.74 \text{ (m}^2)) \times 100$$

$$\eta = 8.37 \text{ (%)}$$

4. ผลการวิจัย

ในการเก็บรวบรวมข้อมูลการหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ โดยการใช้เครื่องมือวัดค่าความเข้มแสงและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ รวมถึงข้อมูลจากวัตต์มิเตอร์ ทำโดยการจดบันทึกทุกๆ 10 นาที แบ่งตารางออกเป็น 2 ตาราง เริ่มตั้งแต่ 09.00 - 15.00 น. จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์

4.1 แสดงผลการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์

ข้อมูลที่ใช้เครื่องมือวัดค่าความเข้มของแสง และ เครื่องมือวัดอุณหภูมิ รวมถึงข้อมูลจากวัตต์มิเตอร์ที่รวบรวมได้ในช่วงเวลา 09.00 - 12.00 น. มาบันทึกในตารางที่ 2 และในช่วงเวลา 12.00 - 15.00 มาบันทึกในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 บันทึกผลการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์ช่วงเวลา 09.00 - 12.00 น.

ช่วงเวลา (น.)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิภายนอก ($^{\circ}\text{C}$)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้าสะสม (Wh)	อุณหภูมิของแผง ($^{\circ}\text{C}$)
09.00 - 09.10	602	29	65.00	70.99	0.59	41.1	6.85	53.3
09.10 - 09.20	617	29	65.00	71.01	0.63	45.5	14.43	52.2
09.20 - 09.30	679	31	65.00	71.16	0.64	46.2	22.13	52.4
09.30 - 09.40	712	31	65.00	71.18	0.68	48.4	30.19	54.3
09.40 - 09.50	773	31	65.00	71.31	0.75	52.2	38.89	65.8
09.50 - 10.00	839	31	65.00	71.34	0.66	47.0	46.72	57.4
10.00 - 10.10	850	31	63.34	71.40	0.70	49.9	55.03	58.6
10.10 - 10.20	878	31	61.68	71.46	0.72	51.4	63.59	63.3
10.20 - 10.30	897	31	60.02	71.52	0.74	52.9	72.40	37.5
10.30 - 10.40	932	31	58.36	71.56	0.74	50.8	80.86	68.0
10.40 - 10.50	967	31	56.70	71.62	0.75	53.7	89.81	65.4
10.50 - 11.00	975	31	55.00	71.68	0.77	55.1	98.99	63.8
11.00 - 11.10	984	31	55.00	71.73	0.77	55.5	108.24	63.1

<http://jeet.siamtechu.net>

ช่วงเวลา (น.)	ความเข้ม แสง (W/m ²)	อุณหภูมิ ภายนอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (W)	กำลัง ไฟฟ้า สะสม (Wh)	อุณหภูมิ ของแผง (°C)
11.10 - 11.20	935	31	55.00	71.19	0.78	55.9	117.49	66.9
11.20 - 11.30	985	32	55.00	71.84	0.79	56.7	126.94	65.5
11.30 - 11.40	955	32	55.00	71.87	0.73	52.4	135.67	67.9
11.40 - 11.50	1013	32	55.00	71.92	0.79	55.3	144.88	70.8
11.50 - 12.00	654	32	55.00	71.86	0.70	57.0	145.83	64.2

จากตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองช่วงเวลา 09.00-12.00 น. ความเข้มแสงมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. มีค่าอยู่ที่ 602 W/m² จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 11.40 - 11.50 น. มีค่าอยู่ที่ 1013 W/m² ก่อนจะลดลงเหลือ 654 W/m² ในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. อุณหภูมิภายนอกมีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 29 °C และขึ้นไปสูงสุดที่ 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์มีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 65.00 % และลดลงมาจนคงที่อยู่ที่ 55.00 % ในช่วงเวลา 10.50 - 12.00 น. แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรสูงตลอดการทดลอง โดยมีการแกว่งตัวในระดับที่แคบมากระหว่าง 70.99 V - 71.92 V ขณะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าความเข้มแสงอย่างชัดเจน โดยในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. มีค่าอยู่ที่ 0.59 A จากนั้นไต่ระดับขึ้นสู่จุดสูงสุดที่ 0.79 A ในช่วงเวลา 11.20 - 11.30 น. และช่วงเวลา 11.40 - 11.50 น. กระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. มีค่าอยู่ที่ 0.70 A กำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. มีค่าอยู่ที่ 41.1 W และเพิ่มขึ้นจนแตะระดับสูงสุดที่ 57 W ในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. กำลังไฟฟ้าสะสมในช่วงเวลา 09.00 - 12.00 น. มีค่าอยู่ที่ 145.83 Wh ที่เวลา 12.00 น. อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 10.20 - 10.30 น. มีค่าอยู่ที่ 37.5 °C และเพิ่มขึ้นสู่ระดับสูงสุดถึง 70.8 °C ในช่วง เวลา 11.40 - 11.50 น.

ตารางที่ 3 บันทึกผลการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์เวลา 12.00-15.00 น.

ช่วงเวลา (น.)	ความ เข้มแสง (W/m ²)	อุณหภูมิ ภายนอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (W)	กำลัง ไฟฟ้า สะสม (Wh)	อุณหภูมิ ของแผง (°C)
12.00 - 12.10	192	32	54.17	71.95	0.73	39.5	152.41	61.4
12.10 - 12.20	966	32	53.34	72.04	0.90	63.3	162.96	60.1
12.20 - 12.30	123	33	52.31	71.92	0.11	7.9	164.27	50.9
12.30 - 12.40	1006	33	51.68	72.08	0.95	65.5	175.18	60.10
12.40 - 12.50	997	33	50.85	72.10	0.93	66.3	186.23	59.5
12.50 - 13.00	953	33	50.02	72.13	0.85	61.1	196.44	62.1
13.00 - 13.10	930	33	50.00	72.14	0.89	46.1	204.12	64.9
13.10 - 13.20	862	33	49.84	72.16	0.74	53.3	213.00	65.7
13.20 - 13.30	180	34	4.52	72.06	0.05	5.7	213.95	51.1
13.30 - 13.40	888	34	49.36	72.20	0.89	63.5	224.3	50.4
13.40 - 13.50	739	34	49.20	72.17	0.66	45.4	232.09	48.9

ช่วงเวลา (น.)	ความ เข้มแสง (W/m ²)	อุณหภูมิ ภายนอก (°C)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (W)	กำลัง ไฟฟ้า สะสม (Wh)	อุณหภูมิ ของแผง (°C)
13.50 - 14.00	715	34	49.00	72.14	0.65	51.2	240.62	47.1
14.00 - 14.10	783	34	49.00	72.23	0.69	49.1	248.80	58.3
14.10 - 14.20	691	34	49.00	72.24	0.62	44	256.13	57.6
14.20 - 14.30	132	33	49.00	72.19	0.04	7.2	257.33	47.3
14.30 - 14.40	702	33	49.00	72.22	0.34	23.8	261.29	53.6
14.40 - 14.50	592	33	49.00	72.26	0.52	38.2	267.65	55.8
14.50 - 15.00	138	33	49.00	72.18	0.08	5.7	268.6	45.7
ค่าเฉลี่ยรวม (9.00 – 15.00)	745.44	32.11	53.74	71.80	0.63	46.21	-	58.08

จากตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองช่วงเวลา 12.00 - 15.00 น. พบว่าความเข้มแสงมีความผันผวนสูง โดยในช่วงเวลา 12.00 - 12.10 น. มีค่าอยู่ที่ 192 W/m² จากนั้นลดต่ำสุดในช่วงเวลา 12.20 - 12.30 น. มีค่าอยู่ที่ 123 W/m² และกลับมาขึ้นสู่ระดับสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 - 12.40 น. มีค่าอยู่ที่ 1006 W/m² ก่อนที่ในช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. จะลดลงมาอยู่ที่ 138 W/m² อุณหภูมิภายนอกมีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 32 °C และขึ้นไปสูงสุดในช่วงเวลา 13.20 - 14.20 มีค่าอยู่ที่ 34 °C น. ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 12.00 - 12.10 น. อยู่ที่ 54.17 % และลดลงมาต่ำสุดจนคงที่อยู่ที่ 49.00 % ในช่วงเวลา 13.50 - 15.00 น. แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรสูงตลอดการทดลอง โดยมีการแกว่งตัวในระดับที่แคบมากระหว่าง 71.92 V - 72.26 V ขณะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความเข้มแสงอย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 - 12.40 น. มีค่าอยู่ที่ 0.95 A และลดลงต่ำสุดในช่วงเวลา 14.20 - 14.30 น. มีค่าอยู่ที่ 0.04 A กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 12.40 - 12.50 น. มีค่าอยู่ที่ 66.3 W และลดลงต่ำสุดในช่วงเวลา 13.20 - 13.30 น. และช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. มีค่าอยู่ที่ 5.7 W อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. มีค่าอยู่ที่ 45.7 °C และมีอุณหภูมิขึ้นสูงที่สุดถึง 65.7 °C ในช่วงเวลา 13.10 - 13.20 น. ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมจากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานตลอดช่วงเวลา 09.00 - 15.00 น. พบว่าแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเฉลี่ยรวมของความเข้มแสงรวมอยู่ที่ 745.44 W/m² อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 32.11 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรวมอยู่ที่ 53.74 % แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 71.80 V กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 0.63 A กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 46.21 W และมีอุณหภูมิของแผงเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 58.08 °C โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมรวมอยู่ที่ 268.6 Wh

5.สรุปและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการทำการวิจัย

สรุปผลการทดสอบประสิทธิภาพการชาร์จแบตเตอรี่จากแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งได้ดำเนินการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการชาร์จพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้สภาพแวดล้อมและเงื่อนไขที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และประเมินผลการดำเนินงานของระบบตามตารางบันทึกผลดังนี้ ในช่วงเวลา 09.00 - 12.00 น. มีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. อยู่ที่ 602 W/m² จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 11.40 - 11.50 น. อยู่ที่ 1013 W/m² ก่อนจะลดลงเหลือ 654 W/m² ในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. อุณหภูมิภายนอกมีค่าเริ่มต้นต่ำสุดอยู่ที่ 29 °C และขึ้นไปสูงสุดที่ 32 °C ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 58.58 % โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 65.00

% และลดลงมาจนคงที่อยู่ที่ 55.00 % ในช่วงเวลา 10.50 - 12.00 น. แรงดันไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 71.49 V มีความเสถียรสูงตลอดการทดลองโดยมีการแกว่งตัวในระดับที่แคบมากระหว่าง 70.99 V ถึง 71.92 V ขณะที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.67 A ซึ่งแปรผันตรงกับความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. อยู่ที่ 0.59 A จากนั้นขึ้นสู่จุดสูงสุดที่ 0.79 A ในช่วงเวลา 11.20 - 11.30 น. และช่วงเวลา 11.40 - 11.50 น. และกระแสไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. มีค่าอยู่ที่ 0.70 A กำลังไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 09.00 - 09.10 น. อยู่ที่ 41.1 W และเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 57 W ในช่วงเวลา 11.50 - 12.00 น. กำลังไฟฟ้าสะสมรวมในช่วงเวลา 09.00 - 12.00 น. มีค่าอยู่ที่ 145.83 Wh อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง โดยมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 10.20 - 10.30 น. อยู่ที่ 37.5 °C และเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 70.8 °C ในช่วงเวลา 11.40 - 11.50 น. และในช่วงเวลา 12.00 - 15.00 น. พบว่าความเข้มแสงมีความผันผวนสูง โดยมีค่าเริ่มต้นในเวลา 12.00 - 12.10 น. อยู่ที่ 192 W/m² จากนั้นลดต่ำสุดในช่วงเวลา 12.20 - 12.30 น. มีค่าอยู่ที่ 123 W/m² และกลับมาขึ้นสู่ระดับสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 - 12.40 น. มีค่าอยู่ที่ 1006 W/m² ก่อนที่ช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. จะลดลงมาอยู่ที่ 138 W/m² อุณหภูมิภายนอกมีค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 32 °C และขึ้นไปสูงสุดที่ 34 °C ในช่วงเวลา 13.20 - 14.20 น. ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงสุดในช่วงเริ่มต้นเวลา 12.00 - 12.10 น. อยู่ที่ 54.17 % และลดลงมาต่ำสุดจนคงที่อยู่ที่ 49.00 % ในช่วงเวลา 13.50 - 15.00 น. แรงดันไฟฟ้ามีความเสถียรสูงตลอดการทดลอง โดยมีการแกว่งตัวในระดับที่แคบมากระหว่าง 71.92 V ถึง 72.26 V ขณะที่กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับความสัมพันธ์อย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 12.30 - 12.40 น. มีค่าอยู่ที่ 0.95 A และลดลงต่ำสุดในช่วงเวลา 14.20 - 14.30 น. มีค่าอยู่ที่ 0.04 A กำลังไฟฟ้ามีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 12.40 - 12.50 น. มีค่าอยู่ที่ 66.3 W และลดลงต่ำสุดในช่วงเวลา 13.20 - 13.30 น. และช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. มีค่าอยู่ที่ 5.7 W กำลังไฟฟ้าสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการทดลองในเวลา 15.00 น. เท่ากับ 268.60 Wh อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์มีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 14.50 - 15.00 น. มีค่าอยู่ที่ 45.7 °C และมีอุณหภูมิขึ้นสูงที่สุดถึง 65.7 °C ในช่วงเวลา 13.10 - 13.20 น. ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพรวมจากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานตลอดช่วงเวลา 09.00 - 15.00 น. พบว่าแผงโซลาร์เซลล์มีค่าเฉลี่ยรวมทั้งหมด ของความเข้มแสงรวมอยู่ที่ 745.44 W/m² อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 32.11 °C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรวมอยู่ที่ 53.74% แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 71.80 V กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 0.63 A กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 46.21 W และมีอุณหภูมิของแผงเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 58.08 °C โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมรวมอยู่ที่ 268.60 Wh

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินการวิจัย

5.2.1 แผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้มีความบางและแตกหักง่าย

5.2.2 ขณะทำการทดสอบวัดผลกลางแสงแดด ตัวฝากระโปรงและแผงโซลาร์เซลล์จะมีความร้อนสะสมที่มาก ทำให้กาวสองหน้าที่ใช้ติดแผ่นอะคริลิกเข้ากับฝากระโปรงลอกออก

5.2.3 แบตเตอรี่ที่ใช้ทดสอบวัดผลมีปริมาณไฟฟ้าที่ใกล้จะเต็ม ทำให้ค่าที่ได้ไม่น่าเชื่อถือไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

5.2.4 ในวันที่ทำการทดสอบวัดผล สภาพอากาศและแสงแดดมีการเปลี่ยนแปลง มีบางช่วงที่แสงแดดอ่อนและค่าต่างๆ ที่วัดได้มีการลดลงจากเดิม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ต้องระมัดระวังขณะบัดกรีเชื่อมแผ่นเซลล์และระหว่างหยิบจับแผ่นเซลล์

5.3.2 ควรใช้กาวสองหน้า ที่มีคุณสมบัติการยึดติดได้ดีกว่าเดิมและอาจใช้น้ำยาเพื่อยึดตัวแผ่นอะคริลิกเข้ากับฝากระโปรง เพื่อป้องกันการหลุดหรือลอกออกเมื่อโดนความร้อน

5.3.3 ควรหาแบตเตอรี่ที่มีปริมาณไฟฟ้าอยู่ที่ 60 % ขึ้นไป เพื่อให้ประสิทธิภาพในการชาร์จนั้นชาร์จพลังงานได้เต็มที่

5.3.4 ควรตรวจสอบสภาพภูมิอากาศก่อนล่วงหน้าก่อนการทดสอบ โดยเลือกวันหรือฤดูที่มีแสงแดดที่ไม่มีเมฆปกคลุมเยอะเกินไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Brown and L. Johnson, "Challenges in DC Arc Suppression for Circuit Breakers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(4), 2020, pp. 1800–1808.
- [2] CleanEnergyReviews, "Solar Panel Construction", [Online] Available:
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>, 2022.
- [3] Fraunhofer ISE, "Solar Cells Integrated into Car Hoods", [Online], 23 August 2023.
- [4] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.
- [5] R. Gupta, *Electrical Protection Systems*, 1st ed., Electrical Press, 2019.
- [6] C. Honsberg and S. Bowden, "Principles of photovoltaic devices", *PV Education*, [Online] Available:
<https://www.pveducation.org>, 2020.
- [7] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., Wiley, Chichester, 2011.
- [8] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, 2003.
- [9] A. Smets et al., *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*, Cambridge University Press, 2016.
- [10] J. Smith, *DC Circuit Breakers: Principles and Applications*, 2nd ed., TechPress, 2022.
- [11] M. Wolf, "Series resistance effects on solar cell measurements", *Solar Cells*, 2(1), 1980, pp. 117–133.

การพัฒนาระบบควบคุมความเร็วพัดลมคอยล์ร้อนอัตโนมัติร่วมกับการลดอุณหภูมิท่อทางออกคอมเพรสเซอร์ด้วยน้ำทิ้งจากคอยล์เย็น

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT CONDENSER FAN CONTROL SYSTEM WITH WATER-ASSISTED DISCHARGE LINE COOLING

สงกรานต์ ภารกุล^{1*} กำจัด ใจตรง¹ ฉัตรชัย เขียวหิรัญ¹ และ ณพวัฒน์ ทองพันชั่ง²

Songkran Parakul^{1*} Kumjat Jaitrong¹ Chatchai Dhienhirun¹ and Noppawath

Thongbhundchang²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

²สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการระบบราง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* Corresponding author E-mail: songkranp@siamtechno.ac.th

Received: June 11, 2026 Revised: June 19, 2026 Accepted: June 20, 2026

บทคัดย่อ

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดตั้งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดในบ้านพักอาศัย โดยเฉพาะส่วนของคอมเพรสเซอร์และพัดลมระบายความร้อนที่ชุดคอยล์ร้อน (Condensing Unit) ในขณะเดียวกัน ระบบปรับอากาศจะผลิตน้ำทิ้ง (Condensate Water) จากชุดคอยล์เย็นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งน้ำทิ้งเหล่านี้มีอุณหภูมิต่ำเฉลี่ยเพียง 15-20°C และมักจะถูกปล่อยทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy Efficiency) โดยการนำน้ำทิ้งดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์ (Waste Water Utilization) เพื่อช่วยระบายความร้อน (Water Assisted Cooling) ให้กับท่อทางออกของคอมเพรสเซอร์ (Discharge Line) ก่อนเข้าสู่คอยล์ร้อน ร่วมกับการบูรณาการระบบควบคุมความเร็วรอบพัดลมระบายความร้อนแบบอัตโนมัติ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมระบบที่พัฒนาขึ้น อาศัยหลักการทำงานโดยใช้น้ำทิ้งจากคอยล์เย็นลดอุณหภูมิบนท่อทางออกคอมเพรสเซอร์เพื่อดูดซับความร้อน พร้อมทั้งใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิเพื่อส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมให้ปรับลดความเร็วรอบพัดลมคอยล์ร้อนให้สอดคล้องกับประสิทธิภาพการระบายความร้อนด้วยน้ำในขณะนั้นจากการทดสอบกับเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดตั้งขนาด 9,000 BTU ที่ติดตั้งในอาคารพักอาศัยจริง พบว่าก่อนการติดตั้งระบบมีการใช้พลังงานด้านคอยล์ร้อนอยู่ที่ 980 วัตต์ ภายหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ลดอุณหภูมิท่อทางออกคอมเพรสเซอร์ร่วมกับระบบควบคุมความเร็วรอบพัดลม อัตราการใช้พลังงานลดลงเหลือ 930 วัตต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 5% นอกจากประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานแล้ว การลดภาระทางความร้อนอย่างต่อเนื่องยังอายุการใช้งานของคอมเพรสเซอร์และเครื่องปรับอากาศให้ยาวนานมากขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน, พลังงาน, คอมเพรสเซอร์

ABSTRACT

split-type air conditioners are the highest energy-consuming appliances in residential buildings, particularly due to the compressor and the condenser fan within the condensing unit. Concurrently, air conditioning systems continuously generate condensate water from the evaporator unit. This condensate water maintains a low average

temperature of 15–20°C and is typically discarded. This research proposes an approach to enhance energy efficiency by utilizing this waste condensate water for water-assisted cooling of the compressor discharge line prior to entering the condenser, integrated with an automatic condenser fan speed control system to reduce the overall electrical energy consumption. The developed system operates by using the evaporator condensate water to lower the temperature of the compressor discharge line through heat absorption. Temperature sensors detect the temperature differences to transmit signals to a controller, which subsequently modulates and decreases the condenser fan speed corresponding to the real-time water-assisted cooling efficiency. Based on experimental testing on a 9,000 BTU wall-mounted split-type air conditioner installed in an actual residential building, the power consumption of the condensing unit was 980 Watts before system installation. Following the implementation of the compressor discharge line cooling device combined with the fan speed control system, the power consumption decreased to 930 Watts. This demonstrates that the system can achieve an electrical energy reduction of up to 5%. In addition to energy-saving efficiency, the continuous reduction of the thermal load substantially extends the operational lifespan of both the compressor and the air conditioning system.

Keywords: Split-type Air Conditioner, Energy, Compressor

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบปรับอากาศและเครื่องทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดในอาคารสำนักงานและที่พักอาศัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะอากาศร้อนจัดซึ่งส่งผลให้คอมเพรสเซอร์ต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อให้ได้ความเย็นตามต้องการ หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP) คืออุณหภูมิและแรงดันของสารทำความเย็นในท่อทางออกคอมเพรสเซอร์ (Discharge Line) หากอุณหภูมิในส่วนนี้สูงเกินไป จะทำให้คอยล์ร้อน (Condenser) ระบายความร้อนได้ยากขึ้น และคอมเพรสเซอร์ต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นในการอัดสารทำความเย็น สอดคล้องกับสภาพอากาศของประเทศไทยที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากสภาวะโลกร้อน (Global Warming) ส่งผลให้ความต้องการใช้เครื่องปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้หลักการทำงานทั่วไปของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split-type Air Conditioner) อาศัยคอมเพรสเซอร์ในการดูดและอัดสารทำความเย็นเพื่อเพิ่มความดันและอุณหภูมิ ก่อนส่งต่อไปยังคอยล์ร้อนเพื่อระบายความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมด้วยพัดลม จากนั้นสารทำความเย็นจะไหลผ่านอุปกรณ์ลดความดัน (Expansion Valve) และเข้าสู่คอยล์เย็น (Evaporator) เพื่อดูดซับความร้อนภายในห้อง กระบวนการนี้ไม่เพียงแต่ทำให้อุณหภูมิห้องลดลง แต่ยังก่อให้เกิดผลพลอยได้คือ "น้ำทิ้งจากคอยล์เย็น" (Condensate Water) ซึ่งเกิดจากการควบแน่นของความชื้นในอากาศ น้ำทิ้งเหล่านี้มักมีอุณหภูมิต่ำ

เครื่องปรับอากาศได้เข้ามามีบทบาทสำคัญทั้งในอุตสาหกรรม ที่พักอาศัย และอาคารต่างๆ โดยมีรูปแบบที่หลากหลายขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งานเช่นเครื่องปรับอากาศชนิดหน้าต่างเครื่องปรับอากาศชนิดติดผนัง และเครื่องปรับอากาศชนิดตั้งพื้น นอกจากนี้ยังมีเครื่องปรับอากาศชนิดพกพาที่สามารถเคลื่อนย้ายไปมาได้ [1] เพื่อให้เครื่องปรับอากาศมีประสิทธิภาพด้านพลังงาน วงจรการทำความเย็นและคอมเพรสเซอร์จึงเป็นหัวข้อที่ถูกวิจัยเพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพด้านพลังงาน [2] ระบบปรับอากาศมีบทบาทสำคัญในการควบคุมอุณหภูมิความชื้นและคุณภาพอากาศภายในอาคาร การทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศช่วยให้ประหยัดพลังงาน [3] อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในการใช้งานเครื่องปรับอากาศมักเกิดจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสมเช่น การติดตั้งชุดระบายความร้อนในตำแหน่งที่โดนแสงแดดตลอดเวลาหรือการติดตั้งในตำแหน่งที่การถ่ายเทของอากาศไม่สะดวก ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงและอาจทำให้เครื่องปรับอากาศเสียหายเร็วกว่าที่ควร [4] นอกจากนี้ยังมีปัญหาที่เกิดขึ้นภายในระบบปรับอากาศเอง เช่น การเสื่อมสภาพของตัวเก็บประจุในคอมเพรสเซอร์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศอย่างมาก และการบำรุงรักษาเกี่ยวกับเครื่องปรับอากาศ [5] คุณภาพอากาศส่วนใหญ่สามารถแก้ไขได้พร้อมกัน หากเราจ่ายอากาศบริสุทธิ์ที่

15 CFM ต่อคน ควบคุมไปกับการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ให้อยู่ระหว่าง 30% ถึง 60% [6] หากระบบถูกออกแบบมาเพื่อรองรับช่วงที่ใช้งานหนักที่สุดเพียงอย่างเดียว เมื่อถึงช่วงโหลดต่ำ เครื่องปรับอากาศจะสั่งตัดการทำความเย็นอย่างรวดเร็วเพราะห้องเย็นเกินไป และเมื่อคอยล์เย็นตัดทำงาน การรีดความชื้นจะหยุดลงทันที ส่งผลให้ความชื้นในห้องพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [7] การควบคุมที่เข้มงวดเกินไปนี้ไม่มีความจำเป็นสำหรับอุปกรณ์ไอทียุคใหม่เลย ซ้ำร้ายยังทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าพันล้านกิโลวัตต์-ชั่วโมงทั่วโลก จากการที่ระบบต้อง "ทำความชื้น" และ "ลดความชื้น" สลับกันไปมาโดยไม่จำเป็น [8]

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิในการประยุกต์ใช้ประโยชน์จาก "น้ำทิ้งจากคอยล์เย็น" (Condensate Water) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการดึงความชื้นในอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 15-20°C) มาใช้ในการหล่อเย็นท่อทางออกของคอมเพรสเซอร์ก่อนที่จะเข้าสู่คอยล์ร้อน การนำน้ำทิ้งมาใช้จะช่วยดึงความร้อนออกจากสารทำความเย็น ส่งผลให้อุณหภูมิลดลงอย่างมีนัยสำคัญนอกจากนี้ เพื่อให้การประหยัดพลังงานเกิดขึ้นอย่างสูงสุด การควบคุมความเร็วพัดลมคอยล์ร้อน (Condenser Fan) ตามสภาวะความร้อนที่เปลี่ยนแปลงจริงจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบควบคุมอัตโนมัติหลังการหล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อปรับความเร็วรอบพัดลมให้เหมาะสมกับภาระความเย็น ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของตัวพัดลมเอง แต่ยังช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบปรับอากาศอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างระบบหล่อเย็นท่อทางออกคอมเพรสเซอร์ โดยใช้ น้ำทิ้งจากคอยล์เย็น
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบพัดลมคอยล์ร้อนอัตโนมัติ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลค่าอุณหภูมิ จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิ
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ของระบบปรับอากาศขณะทำงานแบบปกติ และแบบการทำงานร่วมกับระบบลดอุณหภูมิด้วยน้ำร่วมกับระบบควบคุมพัดลมอัตโนมัติ

3. การดำเนินการวิจัย

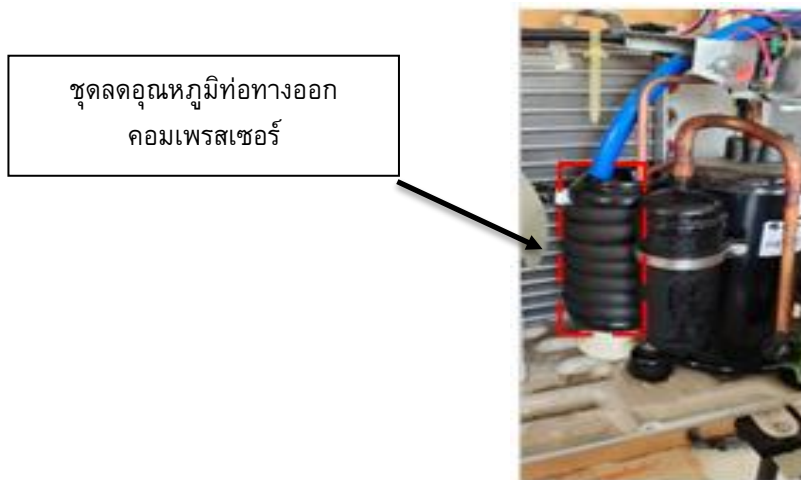
3.1: การออกแบบและจัดเตรียมอุปกรณ์

1. ศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในท่อทางออกคอมเพรสเซอร์และวัดขนาดความเหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์ลดอุณหภูมิท่อทางออกคอมเพรสเซอร์



รูปที่ 1 ท่อทางออกจากคอมเพรสเซอร์

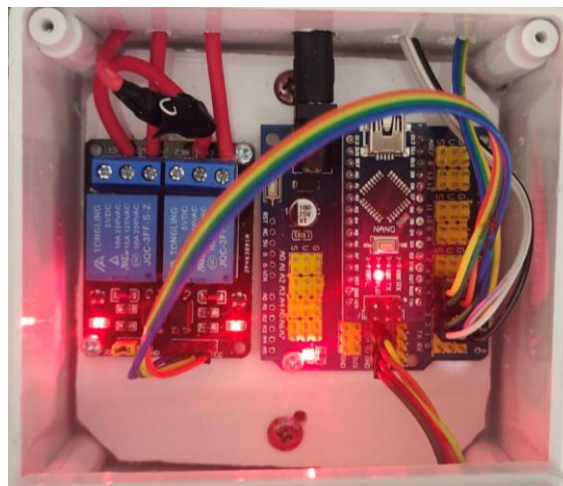
2. ออกแบบอุปกรณ์เก็บน้ำจากคอยล์เย็น ให้เหมาะสมกับขนาดท่อทางออกคอมเพรสเซอร์



รูปที่ 2 อุปกรณ์หล่อเย็นลดอุณหภูมิท่อด้านออกจากคอมเพรสเซอร์อุณหภูมิ

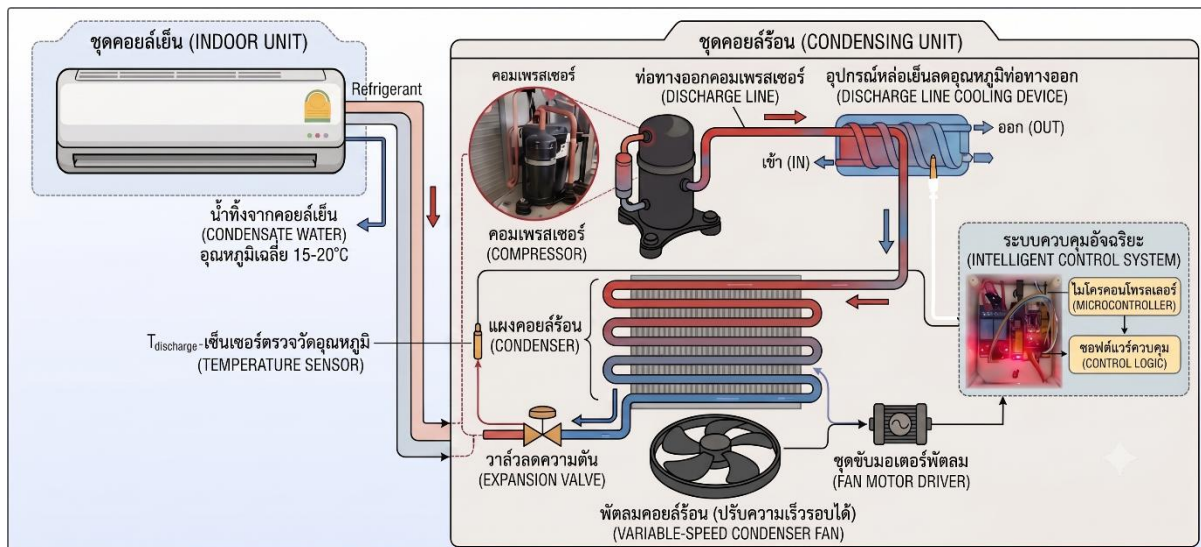
อุปกรณ์เก็บน้ำจากคอยล์เย็นใช้ในการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิท่อด้านออกจากคอมเพรสเซอร์ที่มีอุณหภูมิสูงให้มีค่าความร้อนลดลงจากการแลกเปลี่ยนกับน้ำจากคอยล์เย็นที่มีอุณหภูมิต่ำ

3. ออกแบบวงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ (Controller) และชุดขับมอเตอร์พัดลม (Fan Driver) สร้างชุดวัดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์พัดลมคอยล์ร้อนเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดตั้งขนาด 9,000 BTU ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ระบายความร้อน

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ระบายความร้อนทำหน้าที่ปรับความเร็วรอบของพัดลมให้แปรผันตามอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากแผงระบายความร้อน โดยในกรณีที่อุณหภูมิลดลง ระบบจะสั่งการให้พัดลมหมุนช้าลงเพื่อประหยัดพลังงาน



รูปที่ 4 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ลดอุณหภูมิห้องทางออกคอมเพรสเซอร์และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแผงคอยล์ร้อนเพื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์ระบายความร้อน

จากรูปที่ 4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ที่จะใช้ในการปรับลดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ระบายความร้อนในระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 9,000 BTU

3.2: การติดตั้งและสร้างชุดทดสอบ

1. ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ
2. ติดตั้งระบบหล่อเย็นห้องทางออกคอมเพรสเซอร์ โดยใช้น้ำทิ้งจากคอยล์เย็น
3. ติดตั้งพัดลมคอยล์ร้อนแบบปรับความเร็วรอบได้ พร้อมเชื่อมต่อเข้ากับชุดควบคุม
4. ทำการทดลองโดยวัดค่าพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยไม่ต่อชุดควบคุมอุณหภูมิและระบบหล่อเย็นห้องทางออกคอมเพรสเซอร์ วัดค่าพลังงานเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 9,000 BTU
5. ทำการทดลองโดยวัดค่าพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยไม่ต่อชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและระบบหล่อเย็นห้องทางออกคอมเพรสเซอร์ วัดค่าพลังงานเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 9,000 BTU โดยใช้อุปกรณ์เปิดแผงคอยล์ร้อน 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อน
6. ทำการทดลองโดยวัดค่าพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยต่อชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์ระบายความร้อนโดยใช้ร่วมกับระบบหล่อเย็นที่ห้องทางออกคอมเพรสเซอร์ วัดค่าพลังงานเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 9,000 BTU โดยใช้อุปกรณ์เปิดแผงคอยล์ร้อน 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อน
7. สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น COP (Coefficient of Performance)

$$COP = Q/W \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ พลังงานที่ระบบนำออกในรูปของความร้อน (หน่วยเป็น kW หรือ BTU/hr)

W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ระบบใช้ในการทำงาน (หน่วยเป็น kW)

8. อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio) EER

$$EER = 3.142 COP \quad (2)$$

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

การทดลองนี้ถูกออกแบบเพื่อทดสอบผลกระทบของการลดอุณหภูมิและความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนต่อการใช้พลังงานของ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดตั้งผนังขนาด 9,000 BTU โดยการทดลองวัดค่าพลังงานของ เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยไม่ต่อชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ท่อทางออกคอมเพรสเซอร์และปรับความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนโดยจำลองการอุดตันของแผงคอยล์ร้อนที่ 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อน วัดค่าพลังงานจากตารางการทดลองที่ 1 การทำงานเครื่องปรับอากาศจะมีการใช้ค่าพลังงานสูงสุดเมื่อเกิดการอุดตันที่ 90 % ใช้พลังงานมากถึง 980 W การทดลองวัดค่าพลังงานของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนโดยต่อชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ท่อทางออกคอมเพรสเซอร์และปรับความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนโดยจำลองการอุดตันของแผงคอยล์ร้อนที่ 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อน วัดค่าพลังงานจากตารางการทดลองที่ 2 มีการใช้ค่าพลังงานสูงสุดเมื่อเกิดการอุดตันที่ 90 % ใช้พลังงานมากถึง 930 W

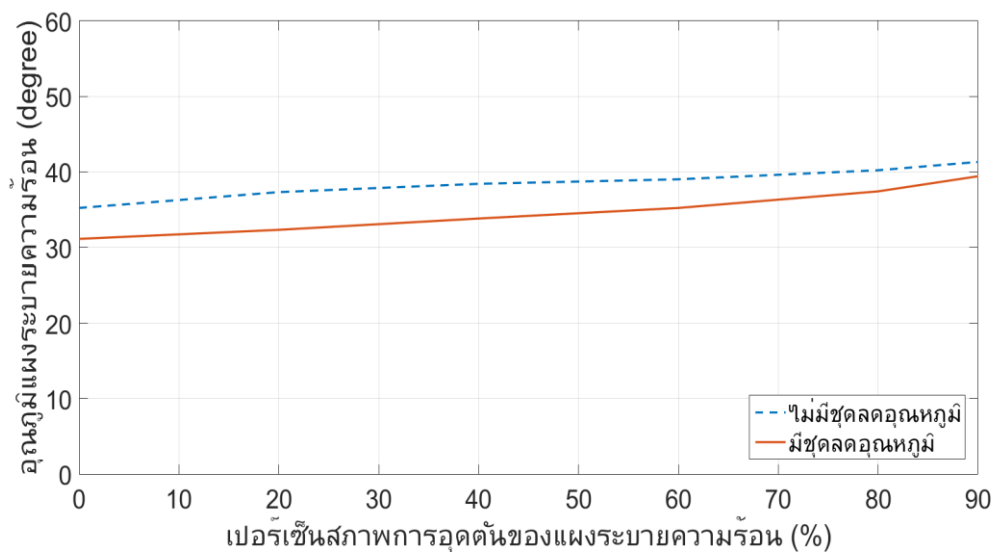
ตารางที่ 1 ผลการทดลองก่อนติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ

สภาพการอุดตันของ แผงระบายความร้อน	อุณหภูมิ (C)	กระแสใช้งาน ชุดคอยล์ร้อน (A)	กำลังไฟฟ้าใช้งาน ชุดคอยล์ร้อน (W)
0 %	35.2	3.71	845
20 %	37.3	3.75	855
40 %	38.4	3.83	873
60 %	39.0	3.89	887
80 %	40.2	4.14	944
90 %	41.3	4.30	980

ตารางที่ 2 ผลการทดลองหลังติดตั้งอุปกรณ์ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิ

สภาพการอุดตันของ แผงระบายความร้อน	อุณหภูมิ (C)	กระแสใช้งาน ชุดคอยล์ร้อน (A)	กำลังไฟฟ้าใช้งาน ชุดคอยล์ร้อน (W)
0 %	31.1	3.40	775
20 %	32.3	3.47	791
40 %	33.8	3.49	796
60 %	35.2	3.74	852
80 %	37.4	3.80	866
90 %	39.4	4.08	930

จากผลการทดลองตารางที่ 1 พบว่าค่าการใช้พลังงานที่แผงคอยล์ร้อนอุดตัน 0-90% มีค่าการใช้พลังงานสูงสุดที่ 980 W จากผลการทดลองตารางที่ 2 หลังติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนและอุปกรณ์ลดอุณหภูมิพบว่าค่าการใช้พลังงานที่แผงคอยล์ร้อนอุดตัน 0-90% มีค่าการใช้พลังงานสูงสุดลดลงเหลือ 930 W สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 5 %

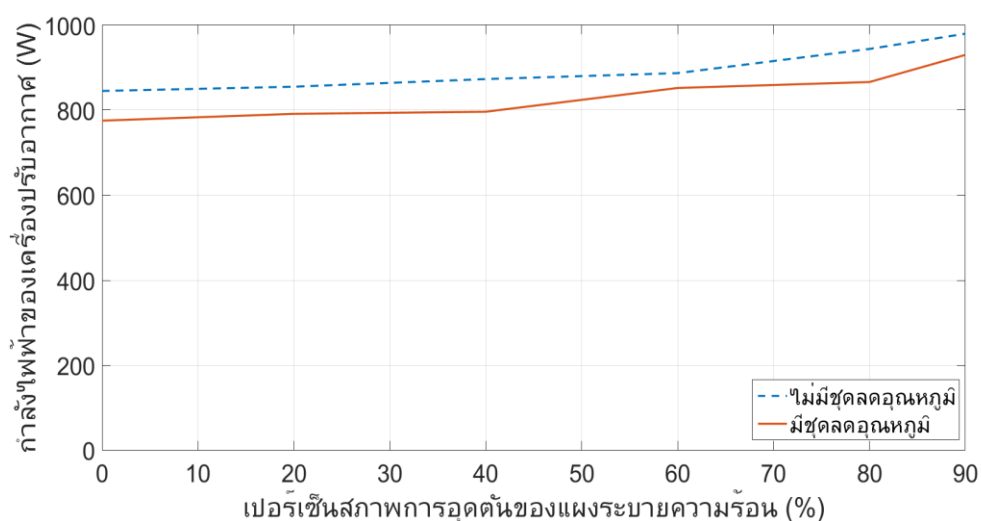


รูปที่ 5 เปรียบเทียบอุณหภูมิแผงระบายความร้อนต่อสภาพการลดความเร็วของแผงระบายความร้อน

จากรูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง "เปอร์เซ็นต์สภาพการลดความเร็วของแผงระบายความร้อน (%)" และ "อุณหภูมิแผงระบายความร้อน °C" สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิแปรผันตามการลดความเร็ว: เมื่อเปอร์เซ็นต์การลดความเร็วของแผงระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น (ตั้งแต่ 0% ถึง 90%) อุณหภูมิของแผงระบายความร้อนก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยในทั้ง 2 กรณี
2. ประโยชน์ของชุดลดอุณหภูมิ: การติดตั้ง "มีชุดลดอุณหภูมิ" สามารถช่วยให้แผงระบายความร้อนมีอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีที่ "ไม่มีชุดลดอุณหภูมิ" ในทุกระดับของการลดความเร็ว
3. ช่องว่างของอุณหภูมิ: ตั้งแต่การลดความเร็วที่ 0% ไปจนถึงเกือบ 90% ระบบที่มีชุดลดอุณหภูมิจะช่วยรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าระบบที่ไม่มีชุดลดอุณหภูมิอยู่เสมออย่างต่อเนื่อง (ต่ำกว่าประมาณ 3-5 °C) โดยช่องว่างของอุณหภูมินี้จะแคบลงเพียงเล็กน้อยเมื่อการลดความเร็วสูงถึงระดับ 90%

ดังนั้นการติดตั้งชุดลดอุณหภูมิจึงมีประสิทธิภาพในการช่วยระบายความร้อนและรักษาอุณหภูมิให้ลดลงได้จริง ไม่ว่าแผงระบายความร้อนจะมีสภาพการลดความเร็วมากหรือน้อยก็ตาม



รูปที่ 6 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าเครื่องปรับอากาศต่อสภาพการลดความเร็วของแผงระบายความร้อน

จากรูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง "เปอร์เซ็นต์สภาพการอุดตันของแผงระบายความร้อน (%)" และ "กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศ (W)" สามารถสรุปได้ดังนี้

1.การใช้พลังงานแปรผันตามการอุดตัน เมื่อเปอร์เซ็นต์การอุดตันของแผงระบายความร้อนเพิ่มสูงขึ้น (จาก 0% ถึง 90%) กำลังไฟฟ้าที่เครื่องปรับอากาศใช้จะกินไฟสูงขึ้นตามไปด้วยอย่างชัดเจนในทั้ง 2 กรณี

2.ชุดลดอุณหภูมิช่วยประหยัดไฟ การติดตั้ง "มีชุดลดอุณหภูมิ" ช่วยให้เครื่องปรับอากาศใช้กำลังไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีที่ "ไม่มีชุดลดอุณหภูมิ" ในทุก ๆ ระดับของการอุดตัน

3.เปรียบเทียบปริมาณการกินไฟที่การอุดตัน 0% ระบบที่มีชุดลดอุณหภูมิใช้กำลังไฟ 780 W ในขณะที่ระบบที่ไม่มีชุดลดอุณหภูมิใช้สูงถึง 850 W เมื่อการอุดตันวิกฤตถึง 90% ระบบที่มีชุดลดอุณหภูมิใช้กำลังไฟเพิ่มขึ้นที่ 930 W ส่วนระบบที่ไม่มีชุดลดอุณหภูมิพุ่งสูงขึ้นที่ 980 W

ดังนั้นการติดตั้งชุดลดอุณหภูมิสามารถลดการใช้กำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ตัวเครื่องทำงานน้อยลงและประหยัดพลังงานได้มากกว่าในทุก ๆ สถานะการอุดตันของแผงระบายความร้อน

5. บทสรุป

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการลดอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดผนังขนาด 9,000 BTU ซึ่งการศึกษานี้จะทดลองเปรียบเทียบผลของชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ห้องทางออกคอมเพรสเซอร์และปรับความเร็วรอบมอเตอร์ด้านคอยล์ร้อน โดยการทดลองจะวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนเมื่อไม่ต่อชุดอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ห้องทางออกคอมเพรสเซอร์และปรับความเร็วรอบมอเตอร์ด้านคอยล์ร้อนและจำลองสถานะการอุดตันแผงคอยล์ร้อนที่ 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อนเครื่องปรับอากาศใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 980 W เมื่อเกิดการอุดตันที่ 90 % ส่วนกรณีที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ลดอุณหภูมิที่ห้องทางออกคอมเพรสเซอร์และปรับความเร็วรอบมอเตอร์คอยล์ร้อนและจำลองสถานะการอุดตันแผงคอยล์ร้อนที่ 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % และ 90 % ของพื้นที่ระบายความร้อนเครื่องปรับอากาศใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 930 W เมื่อเกิดการอุดตันที่ 90 % ซึ่งสามารถลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 5% ของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนชนิดติดผนังขนาด 9,000 BTU เป็นการนำน้ำทิ้งที่มีอุณหภูมิ 15-20°C ซึ่งน้ำทิ้งเหล่านี้จะถูกปล่อยทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งการนำน้ำทิ้งมาถึงความร้อนออกจากสารทำความเย็นส่งผลให้อุณหภูมิลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เพื่อให้การประหยัดพลังงาน เกิดขึ้นอย่างสูงสุดการควบคุมความเร็วพัดลมคอยล์ร้อนตามสถานะความร้อนที่เปลี่ยนแปลงจริงจึงเป็นสิ่งจำเป็น แต่ความท้าทายสำคัญคือการสัมผัสกับความชื้นอย่างต่อเนื่องที่ห้องทางออกคอมเพรสเซอร์ ซึ่งอาจนำไปสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยจากการกัดกร่อนของวัสดุ ดังนั้น ในการนำไปใช้งานจริงการเลือกใช้โลหะผสมที่ทนต่อการกัดกร่อน หรือการจัดทำตารางตรวจสอบความหนาของผนังท่อ อย่างเป็นระบบ เพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันความเสียหายในระยะยาวในระบบปรับอากาศ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Fang, X. Li, and K. Wang, "Optimization of Air Conditioning Energy Consumption Based on Indoor Comfort Degree," *34th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 2022, pp. 3791-3796.
- [2] J. -H. Kim, D. -M. Kim, Y. -H. Jung and M. -S. Lim, "Design of Ultra-High-Speed Motor for FCEV Air Compressor Considering Mechanical Properties of Rotor Materials," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2850-2860, Dec. 2021, doi: 10.1109/TEC.2021.3062646.

- [3] W. Xue, H. Wang and K. Li, "PMV inverse model-based indoor thermal environment control for thermal comfort and energy saving," *41st Chinese Control Conference (CCC)*, Hefei, China, 2022, pp. 5294-5299, doi: 10.23919/CCC55666.2022.9902322.
- [4] D. Wu, W. Wei, J. Bai, and S. Mei, "Energy and Exergy Efficiency Analysis of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage Based Trigenation Energy Hub," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 2409-2422, November 2023.
- [5] S. Parakul, K. Jaitong, P. Songsri, and T. Trongtirakul, "Determination of Motor Efficiency in Air Condensing Unit Using Thermal Image Analytics in case the Degradation of Capacitance," *Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College*, vol. 9, no. 2, pp. 50-61.
- [6] John C. Fischer and Charlene W. Bayer, Humidity Control in School Facilities, *ASHRAE Journal*, 2002
- [7] John Murphy, Temperature & Humidity Control In Surgery Rooms, *ASHRAE Journal*, June 2006
- [8] Mark Hydeman and David E. Swenson, Humidity Controls For Data Centers, *ASHRAE Journal*, March 2010

การดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลสำหรับการลดการปล่อยมลพิษสิ่งแวดล้อม

SMOKE CAPTURE USING MICRO-NANO BUBBLE TECHNOLOGY FOR REDUCING ENVIRONMENTAL POLLUTION

ไพฑูรย์ เหล่าดี¹ นำพร ปัญญาใหญ่² ศรีธร อุปคำ¹ และธนวรรธน์ วัชรดำรงศักดิ์^{1*}

Paitoon Laodee¹ Numpron Panyoyai² Srithorn Upakam¹ and Thanawat Watcharadumrongsak^{1*}

^{1*} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วยแก้ว ตำบลช้างเผือก อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

^{2*} คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

*Corresponding author E-mail: thanawatwatcharadumrongsak@gmail.com

Received: May 31, 2026, 2026 Revised: June 23, 2026 Accepted: June 23, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน โดยใช้ควันไฟจากการเผาไหม้เปลือกมะพร้าว แล้วใช้พัดลมดูดควันไปในอุโมงค์ที่ติดตั้งหัวฉีดแรงดันสูง สารทำงานที่ใช้เป็น ฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโนร่วมกับโอโซน ผลการศึกษาพบว่า การใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO₂ ในควันไฟเมื่อเพิ่มความดันของการฉีดที่ 10-50 bar มีผลทำให้ CO₂ ในควันไฟที่ผ่านการบำบัดมีความลดลงเมื่อเทียบกับ ควันไฟที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดคิดเป็นค่าเฉลี่ย 81.76% ที่ความดัน 10 bar และ 84.58% ที่ความดัน 50 bar ผลของการลดลง ของ CO₂ ยังสอดคล้องกับการลดลงของ NO และ CO คิดเป็นค่าเฉลี่ย 45.43% ที่ความดัน 10 bar และ 62.50% ที่ความดัน 50 bar และ 57.27% ที่ความดัน 10 bar และ 72.60% ที่ความดัน 50 bar ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + Ozone ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + โอโซน มีความสามารถในการดูดซับและกำจัด มลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดการปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล นอกจากนี้ สารทำงานดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศ

คำสำคัญ: ฟองอากาศขนาดไมโคร-นาโน โอโซน การเผาไหม้ชีวมวล หัวฉีดแรงดันสูง มลพิษทางอากาศ

Abstract

This research aims to investigate the smoke-trapping behavior of micro-nano bubble (MNB) technology combined with ozone. In the experiment, smoke generated from coconut shell combustion was drawn by a suction fan into a tunnel equipped with high-pressure nozzles. The working fluid utilized was a mixture of MNBs and ozone. The results indicated that the MNBs + ozone treatment significantly influenced CO₂ capture in the smoke. When the injection pressure was increased from 10 to 50 bar, the treated smoke showed a substantial reduction in CO₂ compared to the untreated smoke, with an average reduction of 81.76% at 10 bar and 84.58% at 50 bar. Furthermore, the decrease in CO₂ correlated with reductions in both NO and CO, which decreased by an average of 45.43% at 10 bar and 62.50% at 50 bar for NO, and 57.27% at 10 bar and 72.60% at 50 bar for CO. These

findings demonstrate that the MNBs + ozone working fluid effectively absorbs and eliminates pollutants, thereby reducing emissions from biomass combustion. Additionally, this working fluid is environmentally friendly and holds strong potential for application in air pollution control systems.

Keywords: Micro-Nano Bubbles (MNBs), Ozone, Biomass Combustion, High-Pressure Nozzle, Air Pollution

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานส่งผลต่อการเกิดมลพิษทางอากาศจากกระบวนการเผาไหม้เครื่องยนต์สันดาปภายในและกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลของโรงงานอุตสาหกรรม Panich Intra (2019) กล่าวว่าแหล่งที่มาของ PM 2.5 ได้แก่วัสดุเสียของรถยนต์ โรงไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม ยังรวมถึงควันที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการหุงต้มอาหาร แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide หรือ SO_2 แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน หรือ NO_x และสารอินทรีย์เคมีระเหย (Volatile organic chemicals หรือ VOC) จะเป็นตัวทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศทำให้เกิดอนุภาคละเอียดได้ ค่ามาตรฐานคุณภาพของอากาศ (National Ambient Air Quality Standards, NAAQS) ที่ยอมรับได้ในสากลโดยมวลอนุภาคเฉลี่ย 24 hr จะต้องน้อยกว่า 35 และ $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และรายปีจะต้องน้อยกว่า 15 และ $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ สำหรับขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2.5 และ $10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ [1] การปล่อย CO_2 อันเนื่องมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มขึ้นในกระบวนการทางอุตสาหกรรม ซึ่งคิดเป็นประมาณ 37% ของการใช้พลังงานหลักทั่วโลก [2] [3] การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (CCS) ถูกมองอย่างกว้างขวางว่าเป็นเทคโนโลยีที่จริงจังในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจากโรงไฟฟ้าและโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ CCS เป็นตัวเลือกทางเทคนิคสำหรับวิธีการดักจับ CO_2 ขึ้นอยู่กับการใช้งานเฉพาะตัวเลือกทางเทคนิค สำหรับการดักจับ CO_2 เช่น การดูดซับการแช่แข็งเมมเบรนและระบบจุลินทรีย์/สาหร่าย [4] อย่างไรก็ตาม ในแง่ของวิธีการมีข้อเสียและข้อจำกัด เช่น การดูดซับการดักจับ CO_2 ทำให้ของเสียที่เกิดขึ้นน้อยมาก และมีความพุนสูงและมีความ เป็นผลึกสูงมาก แต่มีข้อจำกัดประสิทธิภาพในแง่ของ energy นั้นน้อยมาก [5] [6] [7] [8] [9] การดักจับ CO_2 ด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนแสดงความหนาแน่นของการบรรจุและประสิทธิภาพของการแยกโดยทั่วไปสูงมาก เนื่องจากความต้องการในการติดตั้งขนาดเล็กของกระบวนการในทางกลับกันมันมีความเข้มข้นมากในแง่ของพลังงานเนื่องจากกระบวนการระบายความร้อนของเชื้อเพลิงร้อนเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญมาก [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] รวมถึงค่าบำรุงรักษาและการดำเนินงาน

ไมโครบับเบิลและนาโนบับเบิล (MNBs) เป็นฟองอากาศอนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-50 μm และ $<200 \text{ nm}$ ตามลำดับ [12] [13] เทคโนโลยีไมโครบับเบิลและนาโน บับเบิลได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขาของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น การบำบัดน้ำเสีย ทางด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ และวัสดุนาโน [12] เนื่องจากข้อดีบางประการของความสามารถ ในการออกซิเดชันสูงประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลสูง อัตราการใช้เอนจินต์ในการบำบัดสารมลพิษเทคโนโลยี ไมโครนาโนบับเบิล (MNBT) จึงค่อยๆ ดึงดูดความสนใจและประสบความสำเร็จในการควบคุมมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [13]

จากที่กล่าวมาปัญหาเรื่องฝุ่น PM2.5 และมลพิษอากาศเป็นปัญหาสำคัญที่นักวิจัยให้ความสนใจศึกษาแนวทางแก้ปัญหา ประกอบกับเทคโนโลยีไมโครนาโนบับเบิลเป็นฟองอากาศอนุภาคขนาดเล็กมีคุณสมบัติสำหรับการประยุกต์ใช้งานหลายด้าน อย่างไรก็ตามช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ยังไม่พบว่า มีการประยุกต์ใช้สำหรับดักจับควันไฟหรือมลพิษทางอากาศ ดังนั้นจึงเป็นประเด็นที่มาของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับควันไฟด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน โดยการออกแบบอุปกรณ์ทำหน้าที่ดักจับควันไฟ ด้วยการเผาไหม้เปลือกมะพร้าวเป็นแหล่งมลพิษ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือวัด

คุณสมบัติของอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับการทดสอบ บันทึกผลข้อมูลแสดงได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเครื่องมือวัด

รายการ	คุณสมบัติเฉพาะ
เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer)	ยี่ห้อ Multi-gas detecting alarm (product number: M2101001) ย่านการวัด: NO (0–250 ppm), CO ₂ (0.00–5.00 % vol), SO ₂ (0–20 ppm) CO (0–1000 ppm)
เครื่องกำเนิดฟองไมโครนาโน (Micro-Nano bubble generator)	แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ AC-input 220V/50Hz ใช้พลังงานไฟฟ้า 1.65 kW การใช้น้ำ ธรรมดาในการเปลี่ยนน้ำให้กลายเป็นฟองขนาดเล็กไมโครนาโนหรือหยดน้ำขนาดเล็ก หลักการ ทำงานของเครื่องสร้างฟองขนาดเล็กหรือไมโครนาโน คือ การนำก๊าซไนโตรเจนมาผสมกับ น้ำธรรมดา สัดส่วนอัตราการผลิต 30 liters ของก๊าซไฮโดรเจน ถึง 500 liters การ เปลี่ยนแปลงของน้ำส่งผลให้ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำลดลงจาก 7.8 mg/L เหลือ 0.2 mg/L
เครื่องกำเนิดโอโซน (Ozone system)	เครื่องฟอกอากาศโอโซนท่อโอโซน หลอดโอโซน รุ่น 10G/3G 220V ปริมาณการส่งออกของโอโซน: 10,000 mg/h แรงดันไฟฟ้า: 220V/50Hz กำลังไฟฟ้า: 90 W ปริมาณก๊าซออก: 10 L ความเข้มข้นของการส่งออก: 80 mg/L ความดันออก: 3,500 V ขนาดท่อโอโซน: 260 x 67 x 46 มม. ขนาด: ท่อโอโซนขนาด: 260 x 67 x 46 มม ขนาดแหล่งจ่ายไฟ: 150 x 56 x 40 มม รุ่น 3G เหมาะที่เข้ากับพื้นที่ไม่เกิน 50 ลูกบาศก์ รุ่น 10G เหมาะที่เข้ากับพื้นที่ไม่เกิน 100 ลูกบาศก์
เครื่องวัดความเร็วลม (Mini Anemometer)	UNI-T, Model: UT363 Rang measure: 0 – 30 m/s (as standard) Accuracy: (5% rad + 0.5)
เครื่องบันทึกข้อมูล อัตโนมัติ (Data logger)	GRAPHTEC Model: GL820, Input: 20 channels Sampling interval: 10ms/1ch Max.10/20/50/100/200/250/500 ms/1/2/5/10/20/30 sec Clock accuracy: ± 0.002% Power supply: AC adapter (100 to 240 VAC, 50 to 60 Hz) DC input (8.5 to 24 VDC (26.4 V max.) Battery pack (7.4 VDC (2200 mAh)
สายวัดอุณหภูมิ (Thermocouple cable)	Thermocouple, Model: IES system, Type: K Temperature range 293 – 1260 °C ± 0.75%
ปั๊มแรงดัน (Pressure pump)	Model: TOMITSU Power sprayer: Revolution: 800 – 1000 rpm, Discharge: 16.5 – 20.5 L/min, Pressure: 14.71 – 34.32 bar, Irrigation: Revolution: 1200 - 1400 rpm, Discharge: 23 - 29 L/min, Pressure: 9.81 – 14.71 bar

รายการ	คุณสมบัติเฉพาะ
หัวฉีด (Nozzle)	หัวฉีดพ่นละอองน้ำแรงดันสูงขนาด 0.1 mm พร้อมตัวกรอง สำหรับใช้ในเวิร์คช็อปเกี่ยวกับการเพิ่มความชื้นด้วยหมอกเทียม
เครื่องเป่าลม (Air-blower)	Power: 19.2 W, Rotational speed: 3300 rpm Airflow: 345 CFM, Air Pressure: 142 Pa

2.2 กำหนดเงื่อนไขการทดสอบ

ตัวแปรคงที่ (Constant variable) ได้แก่ ควันไฟ (Smoke) องค์ประกอบทางเคมีที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ประกอบด้วย CO_2 (%vol), NO(ppm) และ CO(ppm) แหล่งมลพิษกำหนดสถานการณ์โดยการจำลองควันไฟ (Smoke) ด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล (Biomass fuel) โดยเลือกใช้เศษวัสดุทางการเกษตร คือ มะพร้าว (Coconut) แต่ใช้เฉพาะส่วนของเปลือกผลชั้นกลาง (Mesocarp: fleshy middle layer) หรือที่นิยมเรียกว่า กากมะพร้าว (Coconut meal/Residue) คุณสมบัติทางเคมี Proximate analyses ด้วยวิธีการ the Association of Official Analytical Chemists (AOAC) พบว่ากากมะพร้าวองค์ประกอบดังนี้ lignin $44.68 \pm 2.3\%$, cellulose $42.46 \pm 2.1\%$, moisture $9.57 \pm 0.40\%$, ash $1.71 \pm 0.05\%$, crude protein $1.12 \pm 0.03\%$ และ crude fat $0.56 \pm 0.05\%$ [14] แสดงรายละเอียดเงื่อนไขตามตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาสารทำงาน (Working fluids) ที่ใช้คือ Micro/Nano-bubble + Ozone (MNBs + Ozone) เทคโนโลยีไมโคร/นาโนบับเบิล คือ เครื่องผลิตฟองน้ำอนุภาคนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ระดับไมโครหรือ $10 - 50 \mu\text{m}$ (ไมโครเมตร) และเส้นผ่านศูนย์กลางฟองนาโน น้อยกว่า 200 นาโนเมตร [12] มีองค์ประกอบทางเคมี $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_3$ คุณสมบัติที่โดดเด่นคือ ขนาดของฟองน้ำที่เล็กมากอนุภาคนาโนไมโคร/นาโน จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก (Surface area) และมีความพรุนสูง (High porosity)

ตัวแปรอิสระ (Variable) ได้แก่ ความดันของการฉีด (Injection pressure) กำหนดไว้ช่วง $10 - 50 \text{ bar}$ ตัวแปรคือ $P_1 - P_5$ โดยปรับค่าความดันแตกต่างกัน $\Delta P = 10 \text{ bar}$ ความดันที่เพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับปริมาณของการฉีด MNBs + Ozone เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ปั๊มแรงดันสูงสุด 70 bar ผู้วิจัยจึงกำหนดความดันสูงสุดเพียง 50 bar

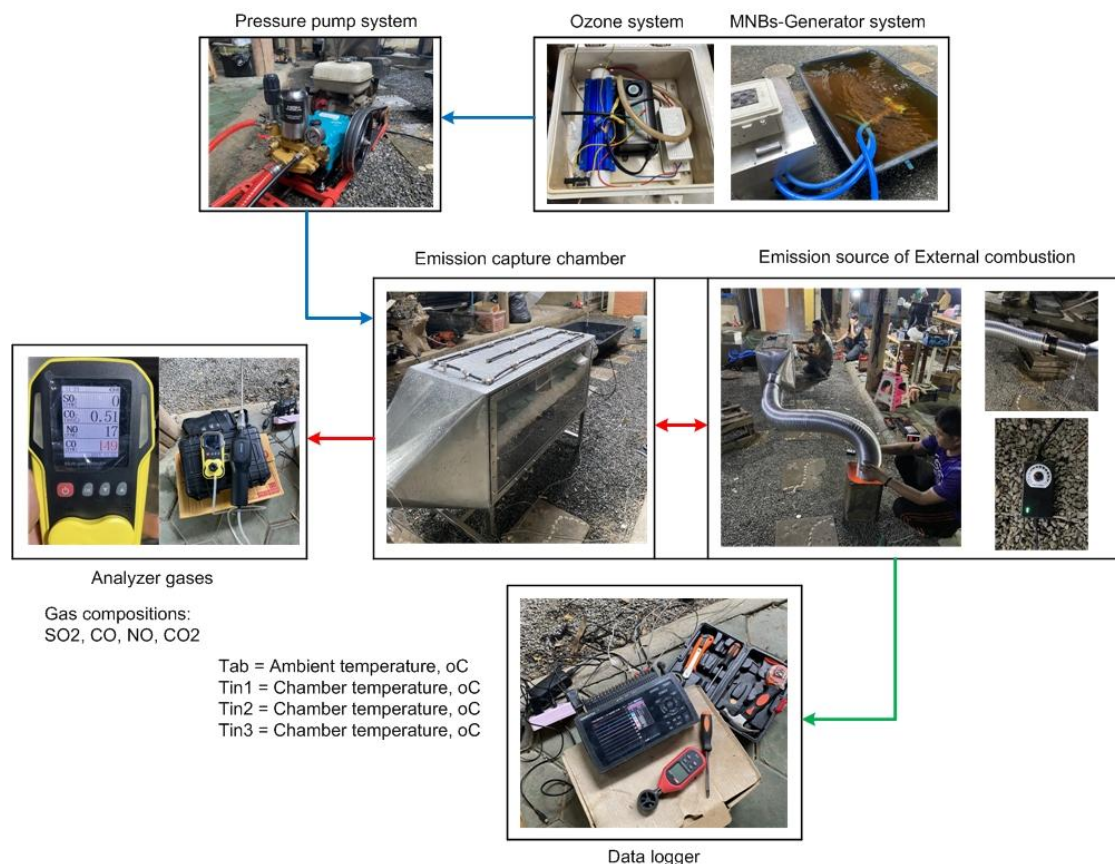
ความเร็วลม (Wind speed) เป็นผลจากการวัดอัตราเร็วของเครื่องเป่าลมโดยแบ่งเป็น 3 ระดับคือ $V_{\text{low}} : 3.32 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{E1} : 0.068989 \text{ kg/s}$, $V_{\text{min}} : 4.54 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{E2} : 0.094340 \text{ kg/s}$, $V_{\text{max}} : 5.42 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{E3} : 0.112626 \text{ kg/s}$ ความเร็วลมเพิ่มแปรผันตรงกับอัตราการไหลอากาศเชิงมวลเพิ่มขึ้น ทำความเร็วลมระดับ V_{min} มีความแตกต่างกับ V_{low} และ V_{max} เพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกำหนดความเร็วลมสำหรับทดลองเพียง V_{low} และ V_{max} เท่านั้น

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการทดสอบ

ตัวแปร	เงื่อนไขการทดสอบ
ตัวแปรคงที่ (Constants variable)	ควันไฟ (Smoke) มีองค์ประกอบ CO_2 (%vol), NO(ppm) และ CO(ppm) สารทำงาน (Working fluids) คือ Micro/Nano-bubble + Ozone
	Pressure pump: $10 - 50 \text{ bar}$
ตัวแปรอิสระ (Variables)	$P_1 - P_5 : 10 - 50 \text{ bars}$ $\Delta P = 10 \text{ bar}$
	Wind speed/Air mass flow rate
	$V_{\text{low}} : 3.32 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{E1} : 0.068989 \text{ kg/s}$, $\text{CO}_2 : 1.59(\% \text{vol})$, NO:7.33(ppm), CO:344.00(ppm) $V_{\text{max}} : 5.42 \text{ m/s}$; $\dot{m}_{E3} : 0.112626 \text{ kg/s}$, $\text{CO}_2 : 1.67(\% \text{vol})$, NO:8.00(ppm), CO: 364.00(ppm)

2.3 อุปกรณ์เครื่องมือ

อุปกรณ์ประกอบแบบออกเป็น 5 ส่วนหลักประกอบด้วย ส่วนแรก แหล่งกำเนิดมลพิษจากการเผาไหม้ภายนอก (Emission source of External combustion) ส่วนที่สอง อุโมงค์ดักจับมลพิษ (Emission capture chamber) ส่วนที่สาม ระบบไมโคร/นาโนบับเบิล + โอโซน (Micro/nano-bubble generator system + Ozone system) ส่วนที่สี่ ระบบปั๊มแรงดัน (Pressure pump system) และส่วนสุดท้าย เครื่องมือตรวจวัด ได้แก่ Analyzer gases, Data logger, Wind speed แสดงรายละเอียดตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังส่วนประกอบการเผาไหม้ภายนอกกับระบบไมโคร/นาโนบับเบิล

2.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี

หากพิจารณาปฏิกิริยาระหว่างก๊าซมลพิษกับโอโซนในน้ำ $H_2O + O_3$ ซึ่งมักเกิดผ่านกลไกออกซิเดชันและการสร้างอนุมูลอิสระ ($\bullet OH$) ในระบบ Micro/Nano Bubble + Ozone สามารถเขียนสมการโดยรวมที่ดุลแล้วได้ดังนี้



คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสถานะออกซิเดชันสูงสุดของคาร์บอน (+4) แล้ว จึงไม่ถูกออกซิไดซ์ต่อโดยโอโซนได้อย่างมีนัยสำคัญ

คาร์บอนไดออกไซด์ CO₂



หรืออาจเกิดเพียงการละลายน้ำ



คาร์บอนมอนอกไซด์ CO



โอโซนสามารถออกซิไดซ์ CO ให้เป็น CO_2 ได้



หากต้องการแสดง H_2O เป็นสารในระบบ สามารถเขียนได้เป็น



ไนโตรเจนออกไซด์ Nox



โอโซนออกซิไดซ์ NO เป็น NO_2 ได้อย่างรวดเร็ว



เมื่อมีน้ำอยู่ NO_2 สามารถเกิดกรดไนตริกได้ โดยสมการรวมที่นิยมใช้ในระบบบำบัดคือ



กล่าวโดยสรุปคุณสมบัติของ Micro/Nano Bubble + Ozone ทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ มีอิทธิพลต่อสมการรวมที่เหมาะสมดังนี้

CO_2 ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่สำคัญกับ O_3

CO $CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$

NO $2NO + 3O_3 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 + 3O_2$

สำหรับกลไกการกำจัดมลพิษในงานวิจัยโอโซนในน้ำสามารถสลายตัวให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($\cdot OH$) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์หลักที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด CO และ NO ในระบบไมโครนาโนบับเบิลได้

2.5 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนที่หนึ่ง การจุดเชื้อเพลิงชีวมวลใช้กากมะพร้าวแห้ง 1.5 kg สำหรับการเผาไหม้สำหรับผลิตมลพิษไอเสียใช้พัดลมดูดอากาศด้วยความเร็วสามระดับ ได้แก่ Low คือ 3.32 m/s Min คือ 4.54 m/s และ Max คือ 5.42 m/s แต่การทดสอบเลือกใช้ค่าความเร็วลมเพียง 2 ระดับเท่านั้น ได้แก่ Low และ Max เนื่องจากต้องการให้ค่าความเร็วแตกต่างกัน พร้อมทั้งทำการวัดผลและบันทึกค่าองค์ประกอบของควันไฟ ได้แก่ CO_2 NO และ CO บันทึก 5 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ขั้นตอนที่สอง การฉีดสารทำงาน (Working fluids) เลือกใช้น้ำที่ผ่านเครื่องกำเนิดฟองอนุภาคนาโนไมโครนาโนร่วมกับระบบโอโซน (Micro/Nano bubble plus Ozone system, MNBs+Ozone) เท่านั้น โดยปรับค่าแรงดันการฉีด (Injection pressures) ที่ความดัน 10 – 50 bar โดยเพิ่มทีละ 10 bar

ขั้นตอนที่สาม การวัดผลประกอบประกอบด้วย ค่ามลพิษไอเสีย (Emission gas) ทำการวัดค่ามลพิษไอเสียก่อนก่อนเข้าอุโมงค์ดักจับมลพิษ คือ วัดจากปลายท่อไอสูดอากาศ/ควันไฟผ่านการดูดด้วยพัดลมดูดอากาศ และวัดค่ามลพิษไอเสียหลังจากผ่านอุโมงค์ดักจับมลพิษด้วยสารทำงานประเภทต่างๆ ค่าอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ

2.6 การประเมินประสิทธิภาพ

การคำนวณหาประสิทธิภาพการดักจับมลพิษ (Collection Efficiency) คือ การคำนวณหาอัตราส่วนของปริมาณมลพิษที่ระบบดักจับได้เทียบกับปริมาณมลพิษทั้งหมดที่ปล่อยออกมา ตามความสัมพันธ์ของสมการพื้นฐาน (10)

$$\eta = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100 \quad (10)$$

กำหนดให้ η คือ ประสิทธิภาพการดักจับมลพิษ (%)

C_{in} คือ ความเข้มข้นของมลพิษก่อนเข้าสู่ระบบดักจับ

C_{out} คือ ความเข้มข้นของมลพิษหลังเข้าสู่ระบบดักจับ

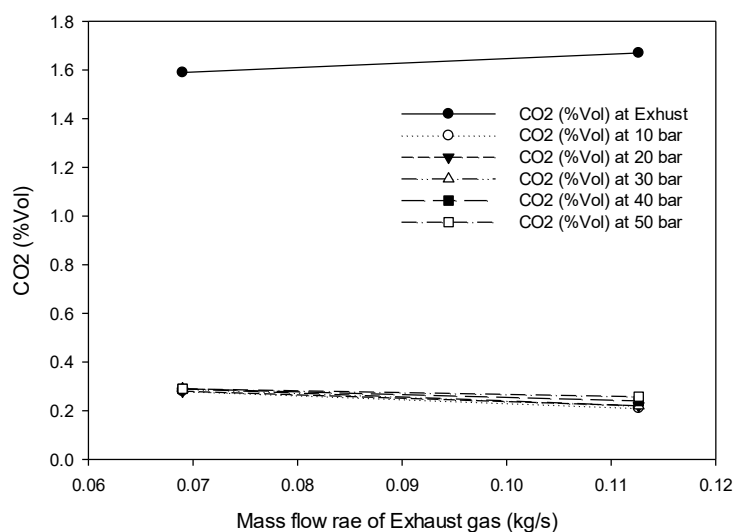
3. ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ CO₂

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO₂ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า CO₂ ของ Exhaust gas เท่ากับ 1.59(%vol) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO₂ ที่ผ่านการบำบัดลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ระดับความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 1.31(%vol) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 81.76% ของการลดลง

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า CO₂ ของ Exhaust gas เท่ากับ 1.67(%vol) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO₂ ที่ผ่านการบำบัดลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ระดับความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 1.46(%vol) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 84.58% ของการลดลงแสดงตามรูปที่ 2



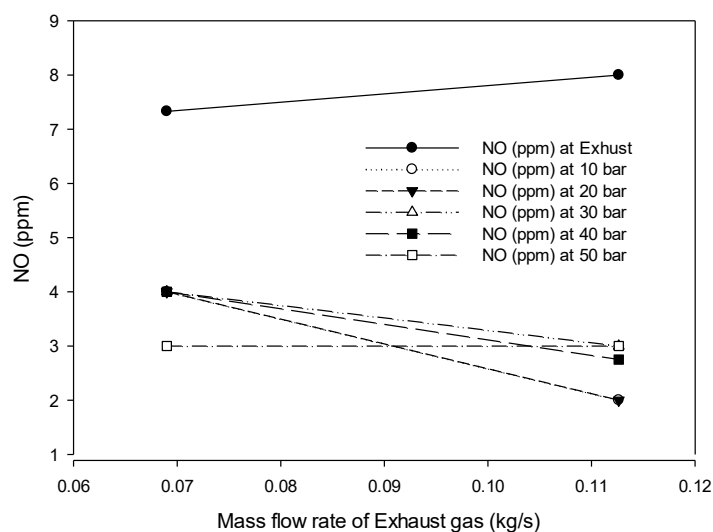
รูปที่ 2 อิทธิพล MNBs + Ozone ต่อ CO₂

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ NO

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ NO สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า NO ของ Exhaust gas เท่ากับ 7.33(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า NO ที่ผ่านการบำบัดมีต่ำกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 3.33(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 45.43%

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า NO ของ Exhaust gas เท่ากับ 8.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า NO ลดต่ำกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 6.00(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 62.50% แสดงตามรูปที่ 3



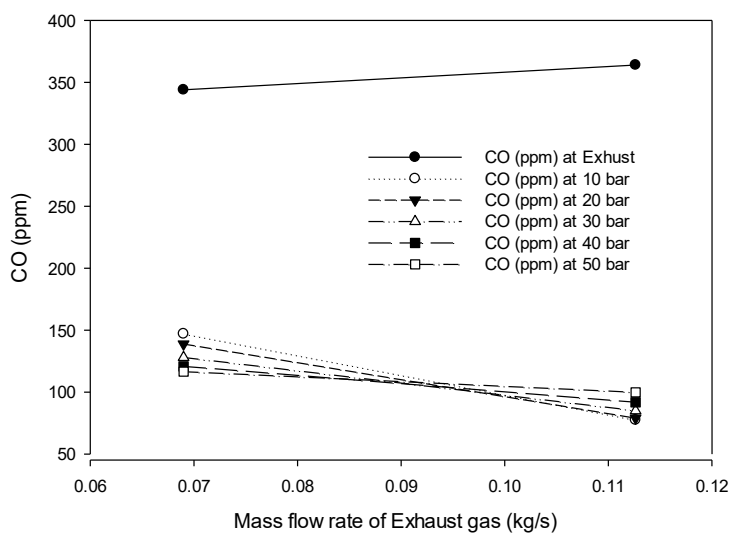
รูปที่ 3 อิทธิพล MNBS + Ozone ต่อ NO

อิทธิพล MNBs + Ozone ของการเผาไหม้ภายนอกต่อ CO

ผลการใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

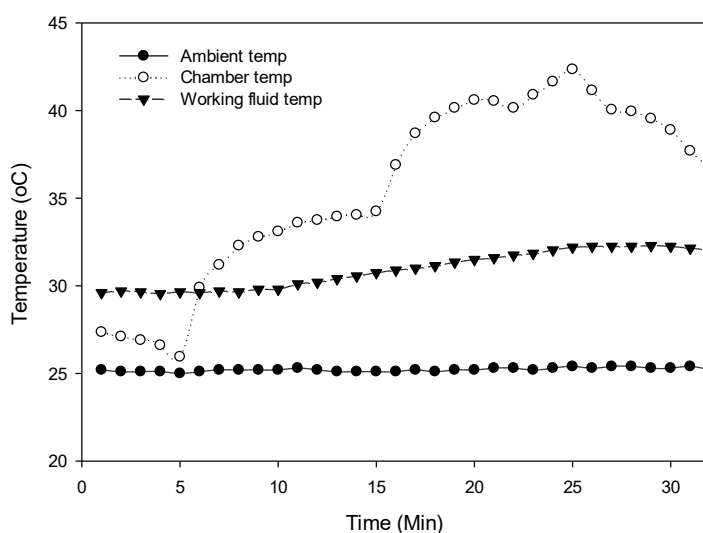
สภาวะ V_{low} : 3.32 m/s; $\dot{m}_{E1}$: 0.068989 kg/s พบว่าค่า CO ของ Exhaust gas เท่ากับ 344.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ค่า CO ที่ผ่านการบำบัดมีลดลงน้อยกว่าค่า Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 197.00(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 57.27% แสดงตามรูปที่ 4

สภาวะ V_{max} : 5.54 m/s; $\dot{m}_{G3}$: 0.112626 kg/s พบว่าค่า CO ของ Exhaust gas เท่ากับ 364.00(ppm) เมื่อเพิ่มความดันของการฉีด ที่ 10-50 bar ผลของค่า CO ที่ผ่านการบำบัดลดลงแตกต่างจาก Exhaust gas ที่ความดัน 10, 20, 30, 40 และ 50 bar โดยส่วนต่างที่ลดลงประมาณ 286.50(ppm) คิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 72.60% แสดงตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 อิทธิพลต่อการดักจับ CO

การทดลองการเผาไหม้ภายนอกช่วงระหว่างเวลาทดสอบอุณหภูมิของสารทำงาน (Working fluid temperature, T_{wa}) ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient temperature, T_{ab}) และอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ (Chamber temperature, T_{ch}) ภายใต้เงื่อนไขใกล้เคียงกับสภาพอากาศจริงดังนั้นไม่ได้ควบคุมอุณหภูมิสารทำงาน โปรไฟล์อุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศแวดล้อม (Ambient temperature, T_{ab}) แสดงตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 โปรไฟล์อุณหภูมิของการทดสอบการเผาไหม้ภายนอก

จากรูปที่ 5 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศแวดล้อม T_{ab} คือ 25.40, 25.00 และ 25.21 °C ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอุโมงค์ดักจับมลพิษ T_{ch} คือ 42.35, 25.95 และ 35.58 °C ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิสูงสุด/อุณหภูมิต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำงาน T_{wa}) คือ 32.30, 29.55 และ 30.92 °C ตามลำดับ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อุณหภูมิของสารทำงานกับอุณหภูมิของอุโมงค์ดักจับมลพิษ

อุณหภูมิสารทำงาน/อุโมงค์ดักจับมลพิษ (°C)	T_{ab}	T_{ch}	T_{wa}
ค่าสูงสุด	25.40	42.35	32.30
ค่าต่ำสุด	25.00	25.95	29.55
ค่าเฉลี่ย	25.21	35.58	30.92

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับคาร์บอนไฟด้วยเทคโนโลยีฟองน้ำอนุภาคขนาดไมโครนาโน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การใช้ MNBs + Ozone ที่มีอิทธิพลต่อการดักจับ CO_2 เมื่อเพิ่มความดันของการฉีดที่ 10-50 bar มีผลทำให้ค่า CO_2 ในคาร์บอนไฟที่ผ่านการบำบัดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคาร์บอนไฟที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 81.76% ที่ 10 bar และร้อยละ 84.58% ที่ 50 bar ซึ่งผลของการลดลงของ CO_2 ยังสอดคล้องกับการลดลงของ NO และ CO คิดเป็นค่าเฉลี่ย 45.43% ที่ 10 bar และร้อยละ 62.50% ที่ 50 bar และ ร้อยละ 57.27% ที่ 10 bar และร้อยละ 72.60% ที่ 50 bar ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า สารทำงาน MNBs + โอโซน มีความสามารถในการดูดซับและกำจัดมลพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดการปล่อยมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล เช่น การเผาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ทั้งนี้ข้อดีประการสำคัญคือ สารทำงานดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมมลพิษทางอากาศในโรงงานอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามสามารถวิจัยและพัฒนาต่อยอดให้สำหรับออกแบบระบบการดักจับมลพิษให้เหมาะสมกับแหล่งมลพิษต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณร้านอู่นาโน ออโต เซอร์วิส และทีมงานช่างที่อนุเคราะห์สถานที่ทำวิจัยและช่วยติดตั้งอุปกรณ์ประกอบระบบ ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศักดา สมกุล ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวัดมลพิษ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Intra, *Electrostatic Aerosol Measurement and Control Technology*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2019.
- [2] O. Ashrafi, Philippe Navarr, and Orsen Zamor, "Energy Integration of Steam-assisted Gravity Drainage Facilities with Carbon Capture," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 74, pp. 635–840, 2019, doi: 10.3303/CET1974140.
- [3] O. Ashrafi, O. Zamor, and P. Navarri, "Impact of carbon capture technologies on GHG emissions from oil sands in-situ facilities: A system prospective," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 188, p. 116603, 2021, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116603.
- [4] E. S. Rubin, H. Mantripragada, A. Marks, P. Versteeg, and J. Kitchin, "The outlook for improved carbon capture technology," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 38, no. 5, pp. 630–671, 2012, doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.003.
- [5] G. Li, Penny Xiao, Paul Webley, Jun Zhang, Ranjeet Singh, and Marc Marshall, "Capture of CO_2 from high humidity flue gas by vacuum swing adsorption with zeolite 13X," *Adsorption*, vol. 14, pp. 415–422, 2008, doi: 10.1007/s10450-007-9100-y.
- [6] A. J. Hunt, Emily H. K. Sin, Ray Marriott, and James H. Clark, "Generation, Capture, and Utilization of Industrial Carbon Dioxide," *ChemSusChem Chem. Sustain. Energy Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 306–322, 2010, doi:

10.1002/cssc.200900169.

- [7] Q. Wang, Jizhong Luo, Ziyi Zhong, and Armando Borgna, "CO₂ capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 42–55, 2011, doi: 10.1039/C0EE00064G.
- [8] M. K. Lam, K. T. Lee, and A. R. Mohamed, "Current status and challenges on microalgae-based carbon capture," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 10, pp. 456–469, 2012, doi: 10.1016/J.IJGGC.2012.07.010.
- [9] A. Bhavsar, D. Hingar, S. Ostwal, I. Thakkar, S. Jadeja, and M. Shah, "The current scope and stand of carbon capture storage and utilization ~ A comprehensive review," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, p. 100368, 2023, doi: 10.1016/J.CSCEE.2023.100368.
- [10] J. C. M. Pires, F. G. Martins, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. Simões, "Recent developments on carbon capture and storage: An overview," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 89, no. 9, pp. 1446–1460, 2011, doi: 10.1016/J.CHERD.2011.01.028.
- [11] C. A. Scholes, S. E. Kentish, and G. W. Stevens, "The effect of condensable minor components on the gas separation performance of polymeric membranes for carbon dioxide capture," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 311–317, 2009, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2009.01.043.
- [12] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, "Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment," *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.05.054.
- [13] Z. Xiao, Tallal Bin Aftab, and Dengxin Li, "Applications of micro–nano bubble technology in environmental pollution control," *Micro Nano Lett.*, vol. 14, no. 7, pp. 782–787, 2019, doi: 10.1049/mnl.2018.5710.
- [14] A. Selamat, Siti Salwa Abd Ghani, Mohd Izuan Effendi Halmi, and Uswatun Hasanah Zaidan, "Properties of coconut (*Cocos nucifera*) husks and its fiber potentials," in *In AIP Conference Proceedings*, 2022, p. 050002. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0104849>.

การเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ของอุตสาหกรรมการผลิตหี้อัด สกรู

A STUDY ON THE INSTALLATION OF A ROOFTOP SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT AND ELECTRICITY COST REDUCTION AT NUT AND BOLT MANUFACTURING INDUSTRY

ธนะโรจน์ พงศ์กิตติธิรา*

Tanaroj Ponkittiisara*

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

*Corresponding author E-mail: Tanaroj278@gmail.com

Received: June 11, 2026 Revised: June 22, 2026 Accepted: June 23, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา 2) เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา 3) วิเคราะห์ผลการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า และ 4) ประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เป็นการวิจัยแบบผสมทั้งเชิงปริมาณโดยเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างด้วยแบบสอบถามจำนวน 411 บริษัท และเชิงคุณภาพโดยการสัมภาษณ์เชิงลึกจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ทรงคุณวุฒิได้แก่ ผู้บริหารผู้จัดการและหน่วยงานภาครัฐ จำนวน 11 คน วิเคราะห์ข้อมูลโดยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัยพบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคามีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 122,500 kWh ต่อเดือน หรือประมาณ 1,470,000 kWh ต่อปี สามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้ง พบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายนอกลดลงจาก 10,986,240 kWh ต่อปี เหลือ 9,516,240 kWh ต่อปี ลดลง 1,470,000 ต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 13.38 ในด้านค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า จากอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.20 บาทต่อหน่วย ระบบสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 6,174,000 บาทต่อปี ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานขององค์กรลดลง สำหรับการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าการลงทุนติดตั้งระบบพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา มีมูลค่าการลงทุนประมาณ 31-36 ล้านบาท และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5-7 ปี แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุนพลังงานและสนับสนุนการดำเนินธุรกิจอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, โซลาร์เซลล์บนหลังคา, ลดต้นทุนพลังงาน, พลังงานหมุนเวียน คำสำคัญไทย

Abstract

This research aimed to: (1) study the efficiency of electricity generation from rooftop solar photovoltaic systems; (2) compare electricity consumption before and after the installation of rooftop solar power generation systems; (3) analyze the reduction in electricity expenditure; and (4) evaluate the economic returns of rooftop solar power generation systems. A mixed-methods research approach was employed. Quantitative data were collected

through questionnaires from a sample of 411 companies, while qualitative data were obtained through in-depth interviews with 11 experts and key informants, including executives, managers, and representatives from government agencies. Data were analyzed using descriptive statistics, including frequency, percentage, mean, and standard deviation.

The research findings revealed that the rooftop solar photovoltaic (PV) system demonstrated an average electricity generation capacity of 122,500 kWh per month, or approximately 1,470,000 kWh per year. The system effectively reduced dependence on externally supplied electricity. A comparison of electricity consumption before and after the installation showed that electricity purchased from the utility grid decreased from 10,986,240 kWh per year to 9,516,240 kWh per year, representing a reduction of 1,470,000 kWh annually, or 13.38%. In terms of electricity expenditure, based on an average electricity tariff of 4.20 THB per kWh, the system was able to reduce electricity costs by approximately 6,174,000 THB per year, resulting in a significant decrease in the organization's energy expenses. The economic evaluation indicated that the investment cost for the rooftop solar PV system was approximately 31–36 million THB, with an estimated payback period of 5–7 years. These findings demonstrate that the implementation of a rooftop solar photovoltaic system is an effective approach to reducing energy costs while supporting sustainable business operations.

Keywords: Solar Energy, Rooftop Solar Power System, Energy Cost Reduction, Renewable Energy

1. บทนำ

จากปัญหาวิกฤตการณ์พลังงาน ทำให้พลังงานเชื้อเพลิงในตลาดโลกมีราคาสูง และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลกระทบต่อประเทศต่างๆ ทั่วโลก และประเทศไทยก็เป็นหนึ่งในประเทศที่ได้รับผลกระทบอย่างมากจากวิกฤตการณ์ดังกล่าว เนื่องจากประเทศไทยจำเป็นต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงจากต่างประเทศทำให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนส่วนใหญ่ และประเทศต้องสูญเสียเงินในการซื้อเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การใช้พลังงานเชื้อเพลิงสิ้นเปลือง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสภาพแวดล้อม หนึ่งในนั้นคือการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Gases) สู่บรรยากาศ ซึ่งก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) ผลกระทบจากภาวะโลกร้อนดังกล่าวนับวันจะทวีความรุนแรงและมีบทบาทเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินชีวิตของผู้คนในปัจจุบันและอนาคต ที่เห็นได้ชัดในปัจจุบันคงเป็นภัยธรรมชาติ ที่เกิดจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง การแปรปรวนของฤดูกาล รวมถึงปัญหาน้ำท่วมชายฝั่ง คาดกันว่าในอนาคตปัญหาดังกล่าวจะทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นอีกหลายเท่า ประเทศต่างๆ ทั่วโลกได้ตื่นตัว และมีมาตรการแนวนโยบายต่างๆ ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอย่างเร่งด่วน การลดมาตรการลดการปล่อยคาร์บอนและมาตรการพัฒนาอุตสาหกรรม มาตรการด้านพลังงานหมุนเวียนที่มีการนำระบบเหล่านี้มาใช้เพื่อลดความเข้มข้นของคาร์บอน โดยเฉพาะในภาคการผลิตไฟฟ้า [16] พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่โลกของเราได้รับมาจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ที่มีอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวประมาณ 5,500 องศาเซลเซียส เมื่อรังสี ดวงอาทิตย์เดินทางมายังโลกขณะกำลังทะลุผ่านชั้นบรรยากาศของโลก จะมีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ประมาณ 1,367 วัตต์/ตารางเมตร ซึ่งเรียกว่าค่าคงที่สุริยะ การเดินทางในชั้นบรรยากาศของโลกของรังสีดวงอาทิตย์จนตกกระทบมายังพื้นผิวของโลกนั้น จะเกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติขึ้นที่อนุภาคต่างๆ ของมวลอากาศด้วยกัน 3 ปรากฏการณ์ ประกอบด้วย 1) การสะท้อนกลับของแสง 2) การดูดซับของแสง เพื่อเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน และ 3) การส่องผ่านของแสง โดยสัดส่วนทั้งสามอย่างนี้จะรวมกันได้ 100 % เสมอเพราะพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถสูญหายได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้นั่นเอง [11] การขยายตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ใน พ.ศ. 2566 เกิดจากปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ปัจจัยราคาค่าไฟฟ้าที่สูงขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนทางภูมิรัฐศาสตร์ที่ส่งผลกระทบต่อราคาก๊าซธรรมชาติเหลวในตลาดโลก ทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น การกำหนดมาตรการกีดกันทางการค้า การขยายตัวของ

อุตสาหกรรมพลังงานหมุนเวียนในระดับโลกไม่ได้เพียงช่วยลดต้นทุนพลังงานสะอาดเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้ประเทศต่าง ๆ ปรับเปลี่ยนนโยบายพลังงานหมุนเวียนให้มีความหลากหลายมากขึ้น เนื่องจากแรงกดดันทางการค้า การแข่งขันระหว่างประเทศ และผลประโยชน์ของอุตสาหกรรมภายในประเทศ ซึ่งนำไปสู่การเกิดนโยบายกีดกันทางการค้าเพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมสีเขียวภายในประเทศมากขึ้น [17] ประกอบกับความต้องการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานด้วยการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ปัจจัยด้านต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลดลง ทำให้ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศและต้นทุนในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ลดลง ส่งผลทำให้การลงทุนในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มีระยะเวลาคืนทุนที่ลดลง อีกทั้งการพัฒนาของเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์และแผงเซลล์จากพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำเนินงานของภาคอุตสาหกรรมการผลิต เนื่องจากกระบวนการผลิต เครื่องจักร อุปกรณ์สนับสนุนการผลิต และระบบสาธารณูปโภคภายในโรงงานล้วนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในต้นทุนสำคัญที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแข่งขันขององค์กร โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่อัตราค่าไฟฟ้ามีแนวโน้มปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ภาคอุตสาหกรรมต้องให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการพลังงานและการแสวงหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน [11]

บริษัท การผลิตน๊อต สกรู เป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณสูงในกระบวนการผลิต ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าย้อนหลัง 3 ปี พบว่า ในปี พ.ศ. 2566 บริษัทมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 10,986,240 กิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ปี พ.ศ. 2567 มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 11,445,240 กิโลวัตต์ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปีก่อนจำนวน 459,000 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 4.18 และในปี พ.ศ. 2568 มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 12,142,240 กิโลวัตต์ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2567 จำนวน 697,000 กิโลวัตต์ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 6.09 เมื่อพิจารณาแนวโน้มในภาพรวม พบว่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของบริษัทเพิ่มขึ้นจาก 10,986,240 กิโลวัตต์ชั่วโมง ในปี พ.ศ. 2566 เป็น 12,142,240 กิโลวัตต์ชั่วโมง ในปี พ.ศ. 2568 หรือเพิ่มขึ้นรวม 1,156,000 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 10.52 ภายในระยะเวลาเพียง 3 ปี สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการเพิ่มกำลังการผลิต การขยายกิจกรรมทางธุรกิจ และการใช้เครื่องจักรในกระบวนการผลิตที่มากขึ้น ปัญหาสำคัญที่บริษัทกำลังเผชิญ คือ การเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและต้นทุนค่าไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และอาจกระทบต่อความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว นอกจากนี้ การพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าภายนอกเพียงแหล่งเดียว ยังอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านต้นทุนพลังงานจากความผันผวนของอัตราค่าไฟฟ้าในอนาคต ด้วยเหตุนี้ ผู้บริหาร ของอุตสาหกรรมการผลิตน๊อต สกรู จึงมีนโยบายส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า โดยสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนภายในองค์กร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ บริษัทจึงได้ดำเนินโครงการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) บนอาคารโรงงาน ขนาดกำลังการผลิตติดตั้งรวม 974.40 กิโลวัตต์พีค (kWp) เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้ภายในโรงงาน ลดการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ลดต้นทุนด้านพลังงาน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล

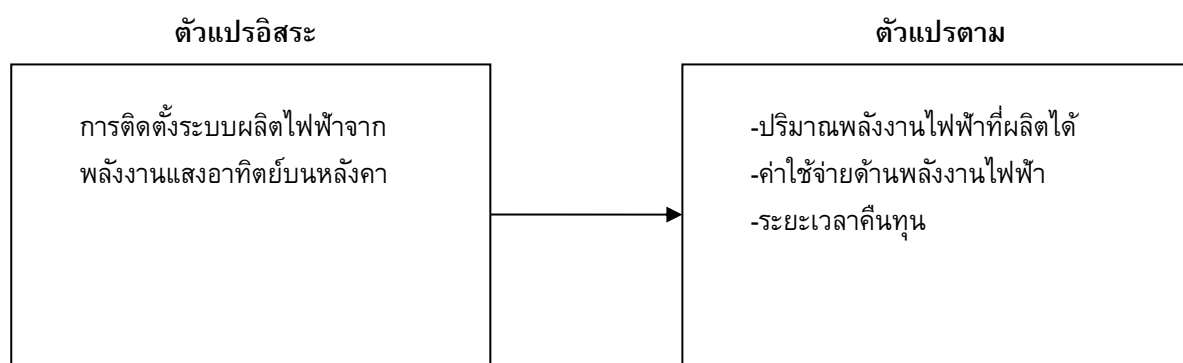
ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาของอุตสาหกรรมการผลิตน๊อต สกรู โดยมุ่งศึกษาประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบ รวมถึงวิเคราะห์ผลการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจด้านการบริหารจัดการพลังงานและเป็นแนวทางในการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ของอุตสาหกรรมการผลิตน๊อต สกรู

2. เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ของ
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู
3. เพื่อวิเคราะห์การลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า ของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู
4. เพื่อประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ของ
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู
5. เพื่อศึกษาความคิดเห็นและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ของ
อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู

3. กรอบแนวคิดในการวิจัย



แผนภาพที่ 3.1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัย เป็นการวิจัยแบบผสมผสาน (Mix method Research) พื้นที่วิจัย คือ โรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ ที่อยู่ในนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออก ใน 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดฉะเชิงเทรา และจังหวัดระยอง ประชากร คือ ผู้บริหารระดับผู้จัดการและรองผู้จัดการโรงงาน ผู้จัดการฝ่ายและรองผู้จัดการฝ่าย และหัวหน้าแผนกของโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดกลางและขนาดใหญ่ ที่อยู่ในนิคมอุตสาหกรรมภาคตะวันออก ใน 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จำนวน 784 บริษัท จังหวัดฉะเชิงเทราจำนวน 293 บริษัท และจังหวัดระยองจำนวน 821 บริษัท รวมทั้งหมด 1,898 บริษัท [2] กลุ่มตัวอย่างผู้ตอบแบบสอบถามโดยชุดคำถาม (Questionnaires) เพื่อการรวบรวมข้อมูลผู้วิจัย ประเมินจากจำนวนผู้บริหารตามเกณฑ์ขอบเขตประชากรที่กำหนด โดยเฉลี่ยแต่ละบริษัทมีจำนวนโดยเฉลี่ย 7 คนต่อบริษัท รวมทั้งหมด 13,286 คน ($1,898 \times 7 = 13,286$ คน) การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้คำนวณจากจำนวนประชากรโดยวิธีการสุ่มอย่างง่าย (Sample Random Sampling) และใช้วิธีการคำนวณตามสูตรของ Taro Yamane ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ความคลาดเคลื่อน ± 0.05 (Yamane, 1973)

$$n = \frac{N}{1 + N(e^2)}$$

เมื่อ N แทน ขนาดของประชากร

n แทน ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

e แทน ความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้มีค่าเท่ากับ ในการศึกษารั้งนี้กำหนดค่าเท่ากับ ± 0.05 ภายใต้ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

$$N = 13,286 \text{ คน}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{13,286}{1 + 13,286(0.05^2)}$$

$$n = 388 \text{ คน}$$

ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 388 คน โดยผู้วิจัยนำมาดำเนินการสุ่มแบบแบ่งชั้นตามสัดส่วน (Proportional Stratified Sampling) ตามแต่ละพื้นที่ และทำการสุ่มอย่างง่าย (Sample Random Sampling) เพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่างตามที่กำหนด โดยเป็นจำนวนโรงงานใน 3 จังหวัดภาคตะวันออก จังหวัดชลบุรี จังหวัดฉะเชิงเทรา และ จังหวัดระยอง ได้ข้อมูลตอบกลับจำนวน 411 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ 1) แบบสัมภาษณ์เชิงลึกกึ่งโครงสร้างปลายเปิดให้ผู้ทรงคุณวุฒิได้ตรวจสอบความครอบคลุมเนื้อหา ก่อนนำไปสัมภาษณ์เชิงลึกผู้บริหารโรงงานอุตสาหกรรม กลุ่มผู้เชี่ยวชาญในการสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) โดยการคัดเลือกแบบเจาะจงตามเกณฑ์ที่กำหนด จำนวน 11 คน ประกอบด้วย ผู้บริหารระดับสูง ผู้จัดการโรงงาน และผู้บริหารหน่วยงานรัฐ ที่มีความเชี่ยวชาญในการบริหารงานของโรงงานอุตสาหกรรม 2) แบบสอบถาม ผู้วิจัยสร้างแบบสอบถามโดยนำกรอบแนวคิด ทฤษฎีที่ได้จากการศึกษาค้นคว้า และข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์เชิงลึก มาประมวลเพื่อสร้างแบบสอบถาม และนำเสนอให้ผู้ทรงคุณวุฒิเพื่อตรวจสอบความสอดคล้อง ความครอบคลุมเนื้อหาและความถูกต้องของการใช้ภาษาของส่วนต่าง ๆ เป็นแบบสอบถามสำหรับผู้บริหาร ผู้จัดการโรงงาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 แบบสอบถามข้อมูลส่วนบุคคลของกลุ่มตัวอย่างเป็นแบบตรวจสอบรายการสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับข้อมูลส่วนตัวของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ ระดับการศึกษา ตำแหน่งงานปัจจุบัน ระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน และ ขนาดขององค์กร ส่วนที่ 2 แบบสอบถาม เพื่อการแสดงระดับความคิดเห็นด้วยกับข้อคำถามเกี่ยวกับการเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคสร้างตามมาตรวัดของลิเคิร์ต โดยมีเกณฑ์การให้คะแนนออกเป็น 5 ระดับ (Rating Scale) ได้แก่ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด ตามแนวคิดของ Likert (1967) และได้กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนแต่ละระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปลี่ยนระดับความเห็นด้วยเป็นคะแนน (Likert, 1967)

คะแนน	ระดับความคิดเห็น
5	เห็นด้วยมากที่สุด
4	เห็นด้วยมาก
3	เห็นด้วยปานกลาง
2	เห็นด้วยน้อย
1	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ที่มา : Likert (1967)

เมื่อได้นำแบบสอบถามแจกจ่ายให้กับกลุ่มตัวอย่างและได้รับระดับความเห็นด้วยในรูปของคะแนนแล้ว ผู้วิจัยวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางสถิติด้วยการคำนวณค่าเฉลี่ยคะแนนในทุกข้อคำถาม โดยใช้เกณฑ์การการแบ่งระดับความคิดเห็นจากสูตรคำนวณความกว้างของอันตรภาคชั้น คือ

$$\text{สูตรอันดับราคาชั้น} = \frac{\text{คะแนนสูงสุด} - \text{คะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้น}}$$

$$\text{แทนค่า} = \frac{5 - 1}{5} = 0.80$$

โดยเกณฑ์การใช้ในการแปลความหมาย เพื่อจัดระดับคะแนนค่าเฉลี่ย $\bar{X}$ ผู้วิจัยใช้เกณฑ์ในการวิเคราะห์ตาม
แนวคิดของ เบสท์ (Best & Kahn, 1993) มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงเกณฑ์การแปลค่าเฉลี่ยของระดับค่าคะแนนเป็นระดับความคิดเห็น

ค่าเฉลี่ยคะแนน	ระดับความคิดเห็น
4.50-5.00	เห็นด้วยมากที่สุด
3.50-4.49	เห็นด้วยมาก
2.50-3.49	เห็นด้วยปานกลาง
1.50-2.49	เห็นด้วยน้อย
0.50-1.49	เห็นด้วยน้อยที่สุด

ที่มา : Best and Kahn (1993)

ค่าความเชื่อมั่นของเครื่องมือวิจัย โดยนำแบบสอบถามที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพด้านความเที่ยงตรงจาก
ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน เพื่อขอรับคำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไข ซึ่งผลการทดสอบคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บ
รวบรวมข้อมูลวิจัยครั้งนี้จากการตรวจสอบความเที่ยงตรง (Validity) จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน โดยผู้วิจัยคัดเลือกเฉพาะข้อ
คำถามที่มีค่า IOC ตั้งแต่ 0.50-1.00 คัดเลือกไว้ใช้ได้ และหากข้อคำถามที่มีค่า IOC ต่ำกว่า 0.50 นำมาปรับปรุง ซึ่งผลการ
วิเคราะห์ค่า IOC รายข้อคำถาม มีค่า IOC ระหว่าง 0.60-1.00 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.50 คะแนน แสดงว่าข้อคำถามสามารถ
นำมาใช้ในการเก็บข้อมูลได้ [3] และ ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลโดยการแจกจ่ายและรวบรวมแบบสอบถาม โดยในการวิจัยนี้กลุ่ม
ประชากร ในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมเขตพื้นที่ภาคตะวันออก ใน 3 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดชลบุรี จังหวัดฉะเชิงเทรา และ
จังหวัดระยอง ที่ยังคงดำเนินกิจการอยู่ในปัจจุบัน [2] รวมทั้งหมด 1,898 โรงงาน ที่ระดับความคลาดเคลื่อนที่สามารถรับได้
ที่ 5% จำนวนแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างที่สมบูรณ์เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามมีจำนวน 411 ตัวอย่าง
และ การเก็บรวบรวมข้อมูล ประกอบด้วย ข้อมูลการใช้ไฟฟ้าย้อนหลัง 12 เดือน ข้อมูลพื้นที่ติดตั้งบนหลังคา ข้อมูลต้นทุน
การติดตั้งระบบ สำหรับการออกแบบระบบ ประกอบด้วย กำลังการผลิตรวม 974.40 กิโลวัตต์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
Mono Crystalline อินเวอร์เตอร์ชนิด Grid Connected สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลเชิงปริมาณ ได้แก่ การศึกษา
ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาโดยใช้เครื่องมือวิจัยคือแบบบันทึกข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจาก
ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา การเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังติดตั้งระบบผลิต
ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา โดยใช้เครื่องมือวิจัย แบบบันทึกข้อมูลการใช้ไฟฟ้าของโรงงาน การวิเคราะห์ผล
การลดค่าใช้จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวิจัย แบบบันทึกค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า และ การประเมิน
ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาโดยใช้เครื่องมือวิจัยแบบบันทึกข้อมูล
การลงทุนและผลตอบแทน สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณมาวิเคราะห์ด้วยสถิติ ความถี่ ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วน
เบี่ยงเบนมาตรฐาน [1] เปรียบเทียบการใช้พลังงานก่อนและหลังการติดตั้ง คำนวณผลประหยัดค่าไฟฟ้า วิเคราะห์
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) และ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย โปรแกรมวิเคราะห์พลังงาน

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัย พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉลี่ย 122,500 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือประมาณ 1,470,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าภายหลังการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู พบว่า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายนอกลดลงจาก 10,986,240 kWh ต่อปี เหลือ 9,516,240 kWh ต่อปี ลดลง 1,470,000 kWh ต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 13.38 เปอเซ็นต์ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลดลงประมาณ 6,174,000 บาทต่อปี แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา มีส่วนช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร การวิเคราะห์ผลการลดค่าใช้จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าจากอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.20 บาทต่อหน่วย สามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ $1,470,000 \times 4.20 = 6,174,000$ บาทต่อปี การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา มูลค่าการลงทุนประมาณ 31-36 ล้านบาท ระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5-7 ปี รวมถึงการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือน การผลิตไฟฟ้าของระบบและข้อมูลต้นทุนการลงทุน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร

ผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นเกี่ยวกับการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้า พบว่า โดยภาพรวมผู้ตอบแบบสอบถามมีความคิดเห็นอยู่ในระดับ เห็นด้วยมาก ($\bar{X} = 3.76$, S.D. = 0.87) แสดงให้เห็นว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากสายส่ง ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเกี่ยวกับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา

ตัวแปรการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา	$\bar{X}$	(S.D.)	แปลความหมาย
1 การเพิ่มระบบ Solar Rooftop ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร	4.82	.38	เห็นด้วยมากที่สุด
2 ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สอดคล้องกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน	4.41	.46	เห็นด้วยมาก
3 การเพิ่มจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากสายส่ง	4.32	.84	เห็นด้วยมาก
4 ระบบมีความเสถียรและสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง	4.22	.80	เห็นด้วยมาก
5 การเพิ่มระบบช่วยส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดในองค์กร	4.23	.87	เห็นด้วยมาก
6 การเพิ่มระบบ Solar Rooftop ช่วยลดค่าไฟฟ้ารายเดือนได้อย่างชัดเจน	4.14	.90	เห็นด้วยมาก
7 ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ช่วยลดการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า	4.11	.83	เห็นด้วยมาก
8 ผลประหยัดค่าไฟฟ้าเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนด	3.74	1.20	เห็นด้วยมาก
9 ต้นทุนการบำรุงรักษาระบบอยู่ในระดับเหมาะสม	3.61	.85	เห็นด้วยมาก
10 การเพิ่มระบบผลิตไฟฟ้ามีส่วนช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในระยะยาว	3.65	.97	เห็นด้วยมาก
11 การลงทุนเพิ่มระบบ Solar Rooftop มีความคุ้มค่า	3.37	.92	เห็นด้วยปานกลาง

ตัวแปรการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา	$\bar{x}$	(S.D.)	แปลความหมาย
12 ระยะเวลาคืนทุนของโครงการมีความเหมาะสม	2.71	.91	เห็นด้วยปานกลาง
13 ผลตอบแทนจากการลงทุนเป็นที่น่าพอใจ	2.60	.94	เห็นด้วยปานกลาง
14 ควรมีการขยายกำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มเติม ในอนาคต	3.64	1.00	เห็นด้วยมาก
15 ระบบช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้แก่องค์กร	3.28	.91	เห็นด้วยปานกลาง
16 ระบบช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	3.12	.83	เห็นด้วยปานกลาง
17 ระบบช่วยสนับสนุนเป้าหมายด้านความยั่งยืนขององค์กร	3.82	.83	เห็นด้วยมาก
18 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแนวทางที่เหมาะสมในการอนุรักษ์ พลังงาน	3.72	.97	เห็นด้วยมาก
19 การเพิ่มระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นประโยชน์ต่อ สังคมและสิ่งแวดล้อม	3.98	.76	เห็นด้วยมาก
20 ควรส่งเสริมการติดตั้งระบบ Solar Rooftop ในหน่วยงานต่าง ๆ มาก ขึ้น	3.68	1.15	เห็นด้วยมาก
รวม	3.76	.87	เห็นด้วยมาก

จากตารางที่ 1 โดยรวมแล้วผลวิเคราะห์ระดับความสำคัญของประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บน
หลังคา ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้านสิ่งแวดล้อมและความ พบว่า
การเพิ่มระบบ Solar Rooftop ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร มีระดับความคิดเห็น [13] เห็นด้วยมากที่สุด
(4.82)

6. อภิปรายผล

ผลจากการวิจัย การเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและ
ลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์
บนหลังคาสามารถช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ประพนธ์ ชูประเสริฐ, กิรติสกุลกันต์
ปรีชา ทูมมู, อุดร นามเสน, [4] พบว่า สํารวจ ตรวจวัด และ วิเคราะห์สาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบ เพื่อหา
มาตรการที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน มุ่งเน้นการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
ผ่าน 4 แนวทางหลัก ได้แก่ การปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักร การนำระบบอัตโนมัติมาใช้ควบคุม การใช้พลังงานทดแทน
และการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมบุคลากร เปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งระบบพลังงานไฟฟ้าจาก
แสงอาทิตย์บนหลังคา การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา ช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจาก
โครงข่ายการไฟฟ้าโดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้ภายในอาคารหรือโรงงานโดยตรง
ส่งผลให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจากภายนอกลดลง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jeong Minji [17] พบว่า การขยายตัวของ
อุตสาหกรรมพลังงานหมุนเวียนในระดับโลกไม่ได้เพียงช่วยลดต้นทุนพลังงานสะอาดเท่านั้น แต่ยังส่งผลให้ประเทศต่าง ๆ
ปรับเปลี่ยนนโยบายพลังงานหมุนเวียนให้มีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ การุณ ชัยวานิช [5]
พบว่า ประเมินทางความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาด 1,500 กิโลวัตต์
สามารถผลิตไฟฟ้าได้ทั้งหมดประมาณ 2.73 GWh/ปี และสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 1,549
TCO2e/ปี เมื่อพิจารณาผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า มีอัตรามูลค่าปัจจุบันสุทธิ ที่อัตราดอกเบี้ย 5% ต่อปีเท่ากับ

6,646,610.37 บาทและมีค่าอัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุน เท่ากับ 1.05 ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โครงการนี้มีความคุ้มค่าที่ลงทุนและมีระยะเวลาคืนทุนของโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินประมาณ 12.3 ปี การวิเคราะห์ผลการลดค่าใช้จ่ายค่าพลังงานไฟฟ้า การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เป็นมาตรการสำคัญในการลดต้นทุนด้านพลังงานขององค์กร เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาใช้ทดแทนการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานสูง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ กฤตวิ ไกรกฤษฎกอบบุญ [6] การคำนวณต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการสนับสนุนการบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้เกิดประสิทธิภาพและแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าต่ำกว่าค่าประมาณการค่าไฟฟ้าเฉลี่ยของประเทศไทยในปี 2566 แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ยของประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ พัทธวีรา สติธียากี, กุล อนันต์ ธรรมชาลัย, เกียรติชัย วีระญาณนนท์ [7] พบว่า ปัจจัยด้านต้นทุน คุณภาพ เวลา และด้านปริมาณ มีผลต่อความสำเร็จของธุรกิจอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง นำเทคโนโลยีที่รวดเร็วทันสมัย สามารถเพิ่มผลผลิตและต้นทุนการผลิตต่ำลง สำหรับการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาเป็นกระบวนการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา โดยพิจารณาจากต้นทุนการลงทุน ผลประโยชน์ที่ได้รับจากการประหยัดค่าไฟฟ้า และผลตอบแทนทางการเงินตลอดอายุโครงการ เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจลงทุนและวางแผนด้านพลังงานขององค์กร ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ณัฐพงษ์ วัชรวงษ์ [8] พบว่า การผลิตติดตั้งที่เหมาะสมในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาคารเพื่อลดค่าใช้จ่ายเพื่อพลังงานไฟฟ้า สามารถสร้างผลตอบแทนทางด้านการเงินได้สูงที่สุด อัตราผลตอบแทนภายในสูงที่สุด และระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด นอกจากนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของ เชษฐวุฒิ ศรีสะอาด, [9] ; ณัฐพล ครุทวงษ์, ศุภรัชชัย วรรัตน์ [10] พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่ามากกว่าศูนย์ มีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่ามากกว่าอัตราดอกเบี้ยที่กำหนด ระยะเวลาการคืนทุน (PB) ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับระยะเวลาที่ทำให้กระแสเงินสดรับสะสมมีค่าเท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก สำหรับความคิดเห็นและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา เป็นทางเลือกยอดนิยมในการลดค่าไฟฟ้าและรักษาสีสิ่งแวดล้อม ผู้ติดตั้งส่วนใหญ่พบว่าระบบช่วยลดภาระค่าใช้จ่ายได้จริงอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ อินทวดี จันทรทักษิณภาส, ทศพร อัครวงษ์, กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์ ในปัจจุบันมีความสนใจในการใช้พลังงานทางเลือกเพิ่มขึ้น รวมถึงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับความคิดเห็นของผู้ใช้งานโดยทั่วไป ถึงการพิจารณาให้ความสำคัญกับเกณฑ์ในด้านประสิทธิภาพ ด้านความคุ้มค่าในการลงทุน และด้านอายุการใช้งาน [18]

7. องค์ความรู้ใหม่จากการวิจัย

จากการศึกษาการเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ของอุตสาหกรรมการผลิตเนื้อ สกรู พบองค์ความรู้ใหม่ที่สามารถสรุป ดังนี้ 1) แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคาในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ 2) รูปแบบการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการพลังงานหมุนเวียน 3) แนวทางการลดต้นทุนพลังงานควบคู่กับการลดก๊าซเรือนกระจก 4) การใช้ระบบ Monitoring เพื่อติดตามประสิทธิภาพการผลิตพลังงานแบบ Real-time

8. สรุป

จากผลการวิจัยเรื่อง การเพิ่มระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล สกปรู สามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้ 1) ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา พบว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 122,500 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน หรือประมาณ 1,470,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี สามารถผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันของโรงงาน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในองค์กร โดยผลการสำรวจความคิดเห็นพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามเห็นด้วยในระดับมากต่อประเด็นที่ว่า “การเพิ่มระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร” โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 4.82 2) การเปรียบเทียบปริมาณการใช้ไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้งไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา พบว่า ก่อนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา บริษัทมีการใช้ไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายนอกจำนวน 10,986,240 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และภายหลังการติดตั้งลดลงเหลือ 9,516,240 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี ลดลง 1,470,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็น ร้อยละ 13.38 แสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ 3) การวิเคราะห์การลดค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้า พบว่า การผลิตไฟฟ้าจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา จำนวน 1,470,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี สามารถทดแทนการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าได้ในปริมาณเท่ากัน เมื่อคำนวณจากอัตราค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 4.20 บาทต่อหน่วย ทำให้บริษัทสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ $1,470,000 \times 4.20 = 6,174,000$ บาทต่อปี ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการติดตั้งระบบ การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา สามารถช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าขององค์กรได้อย่างชัดเจน และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการพลังงานของโรงงาน 4) การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า โครงการมีมูลค่าการลงทุนประมาณ 31–36 ล้านบาท และสามารถสร้างผลประหยัดค่าไฟฟ้าได้ประมาณ 6.17 ล้านบาทต่อปี ส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 5–7 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับโครงการด้านพลังงานทดแทนในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังช่วยลดความเสี่ยงจากการปรับตัวสูงขึ้นของค่าไฟฟ้าในอนาคต และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันขององค์กรในระยะยาว 5) ความคิดเห็นและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ผลการวิเคราะห์ความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่า โดยภาพรวมมีความคิดเห็นอยู่ในระดับ เห็นด้วยมาก ($\bar{X} = 3.76$, S.D. = 0.87) โดยประเด็นที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ การเพิ่มระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานขององค์กร ($\bar{X} = 4.82$, S.D. = 0.38) อยู่ในระดับเห็นด้วยมากที่สุด รองลงมาคือ ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้สอดคล้องกับความต้องการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน และช่วยลดการพึ่งพาไฟฟ้าจากสายส่ง ขณะที่ประเด็นด้านความคุ้มค่าการลงทุน ระยะเวลาคืนทุน และผลตอบแทนจากการลงทุน มีความคิดเห็นอยู่ในระดับปานกลางถึงมาก สะท้อนให้เห็นว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีทัศนคติเชิงบวก ต่อการติดตั้งระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา และเห็นว่าระบบดังกล่าวมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนค่าไฟฟ้า ส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด และสนับสนุนเป้าหมายด้านความยั่งยืนขององค์กร

9. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

9.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- 1) ควรมีการบำรุงรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอ
- 2) ควรติดตามประสิทธิภาพการผลิตพลังงานผ่านระบบออนไลน์
- 3) ควรส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในส่วนงานอื่นขององค์กร
- 4) ควรจัดทำแผนบริหารจัดการพลังงานร่วมกับระบบ Solar Rooftop

9.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

- 1) ศึกษาการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System)
- 2) ศึกษาการบริหารโหลดไฟฟ้าร่วมกับระบบ Solar Rooftop
- 3) วิเคราะห์ผลกระทบด้าน Carbon Credit และ ESG : Environmental Social Governance
- 4) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละเทคโนโลยี
- 5) ศึกษาความเป็นไปได้ของระบบ Microgrid ภายในโรงงานอุตสาหกรรม

10.เอกสารอ้างอิง

- [1] กัลยา วานิชย์บัญชา. (2560). การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร. บริษัท ธรรมสาร จำกัด.
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2567). บริการข้อมูล. <https://www.diw.go.th/webdiw/s-data/>
- [3] ธาณินทร์ ศิลป์จารุ. (2555). การวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS และ AMOS.(พิมพ์ครั้งที่ 13). บิสนิเนสอาร์ แอนด์ดี.
- [4] ประพนธ์ ชูประเสริฐ, กิรติสุลภะณัฏฐ์ ปรีชา ทุมม, และอุดร นามเสน. (2565). การอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานน้ำตาลแบบดั้งเดิมของไทย:กรณีศึกษาโรงงานน้ำตาลทรายเริ่มอุดม. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 14(2) : 536-552 (2565)
- [5] การุณย์ ชัยวณิชย์, พุทธิ อุดลสุข, และมนตรี สังข์ทอง. (2561). การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดินภายในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 10(12), 35–46.
- [6] กฤตกรวิ ไกรกฤษฎกอบบุญ. (2566). การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนค่าไฟฟ้าเฉลี่ยของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. วิทยานิพนธ์เศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเศรษฐศาสตร์คณะเศรษฐศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [7] พัทธิธีรา สถิตยภักติกุล อนันต์ ธรรมชาลัย เกียรติชัย วีระญาณนทร์. (2020). การพัฒนาธุรกิจอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนในประเทศไทย. หน้าแรก / คลังบทความ / ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 (2020): กรกฎาคม - ธันวาคม / บทความวิจัย
- [8] ณัฐพงษ์ วัชรพงษ์. (2567). การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมเพื่อการตัดสินใจลงทุนติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์บนหลังคา. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [9] เชษฐวุฒิ ศรีสะอาด. (2561). การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์. กรณีศึกษาเฉพาะโรงงานแปรรูปไม้ยูคาลิปตัสแห่งหนึ่งในจังหวัดอำนาจเจริญ. คณะบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- [10] ณัฐพล ครุฑวงษ์, สุภรัชชัย วรรัตน์. (2565). การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาโรงงาน. วารสารบัณฑิตวิทยาลัย, 1, 178-188.
- [11] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). งานพลังงานทดแทน/การอนุรักษ์พลังงาน <https://www.dede.go.th/>
- [12] บริษัท ไทยสินเมทัล อินดัสตรี จำกัด. (2568). <https://www.thaisin-screw.com/>
- [13] Best, J. W., & Kahn, J. V. (1993). *Research in Education*. (7th ed). AUyn and Bacon.
- [14] Likert, R. (1967). *The human organization: its management and values*. McGraw-Hill, Publishers Inc.
- [15] Yamane, T. (1973). *Statistics: An Introductory analysis* (4th ed.). Harper and Row Publication.
- [16] Fang Meng. (2018). *The Green Economy under the WTO Regime: Policy Space for Renewable Energy Support Mechanisms*. (Ph.D. Dissertation, the Chinese University of Hong Kong).

[17] Jeong Minji. (2017). National Renewable Energy Policy in a Global World. (Ph.D. Dissertation, The University of Maryland).

[18] อินทวดี จันทร์ทักษิณเภาส, ทศพร อัครรังษี, กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์. (2568). การประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา ในมุมมองของผู้ใช้งาน กรณีศึกษาร้านในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. หน้าแรก / คลังบทความ / ปีที่ 5 ฉบับที่ 1 (2025): มกราคม - เมษายน (2568) / บทความวิจัย

การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบของเทคโนโลยีด้านพลังงานเพื่อการลด ก๊าซเรือนกระจกและความเป็นกลางทางคาร์บอนในประเทศไทย

A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW OF ENERGY TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE GAS REDUCTION AND CARBON NEUTRALITY IN THAILAND

มณี คิวเจริญ^{1*} เสรีย์ ตูประกาย² และชญาณิษฐ์ วิทยากรมย์³

Manee Kiewcharoen^{1*}, Seree Tuprakay² and Chayanid Witthayaphirom³

^{1*} สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

^{1*} Doctor of Philosophy Program in Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

² สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² Department of Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

³ Department of Environmental Science, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

* Corresponding author, E-mail: maneeekiewc@gmail.com

Received: December 19, 2025 Revised: April 9, 2026 Accepted: April 9, 2026

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) กระบวนการคัดเลือกบทความดำเนินการตามขั้นตอนของ PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) เพื่อวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงานและแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน โดยรวบรวมบทความวิจัยจากฐานข้อมูล ScienceDirect, Springer และ Gale OneFile ในช่วงปี 2023–2025 ภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกและคัดออกอย่างเป็นระบบ จากการสืบค้นพบบทความจำนวน 4,704 ฉบับ โดยฐานข้อมูล ScienceDirect 596 ฉบับ Springer Nature ที่มีบทความจำนวน 2,643 ฉบับ และ Gale OneFile จำนวน 1,465 ฉบับ ซึ่งได้รับการคัดกรองโดยพิจารณาจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ จากนั้นจึงทำการประเมินเนื้อหาฉบับเต็มตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกอย่างเป็นระบบจนเหลือบทความจำนวน 42 ฉบับ สำหรับการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า แนวทางสำคัญสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) มาตรการเชิงนโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และโรงไฟฟ้าเสมือน (VPP) (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน และ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน โดยพลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานมีศักยภาพสูงในระยะสั้น ขณะที่เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น ไฮโดรเจนและการดักจับคาร์บอนเหมาะสำหรับการพัฒนาในระยะยาว งานวิจัยนี้เสนอแนวทางเชิงนโยบายและการพัฒนาระบบพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการบรรลุเป้าหมาย Carbon Neutrality ในปี 2050 และ Net Zero ในปี 2065

คำสำคัญ: ความเป็นกลางทางคาร์บอน ก๊าซเรือนกระจก การทบทวนเชิงระบบ

Abstract

This study employs a Systematic Literature Review (SLR), and the article selection process follows the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) framework to analyze energy

technologies and approaches for reducing greenhouse gas emissions toward Carbon Neutrality. Research articles were collected from the ScienceDirect, Springer Nature, and Gale OneFile databases, covering the period from 2023 to 2025, based on systematically defined inclusion and exclusion criteria. A total of 4,704 articles were initially identified, including 596 from ScienceDirect, 2,643 from Springer Nature and 1,465 from Gale OneFile. These articles were screened based on titles and abstracts, followed by a full-text assessment according to the established criteria, resulting in 42 articles selected for in-depth analysis. The findings indicate that the key approaches can be categorized into four main groups (1) Policy Measures and Carbon Market mechanisms, (2) Smart Grid systems and Virtual Power Plants (VPP), (3) Renewable Energy integration; and (4) Waste Management and the Circular Economy. Renewable Energy and Energy Efficiency Improvements show high potential in the short term, whereas advanced technologies such as Hydrogen and Carbon Capture are more suitable for long-term development. This study proposes policy recommendations and energy system development pathways tailored to the Thai context to support the achievement of Carbon Neutrality by 2050 and Net Zero Emissions by the year 2065.

Keywords: Carbon Neutrality, Greenhouse Gas, Systematic Review

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นหนึ่งในความท้าทายสำคัญระดับโลกที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) จากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะในภาคพลังงานซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของโลก ความตกลงปารีส (Paris Agreement) [1] จึงได้กำหนดกรอบความร่วมมือระหว่างประเทศเพื่อควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกไม่ให้เกิน 2 องศาเซลเซียสและพยายามจำกัดให้อยู่ที่ 1.5 องศาเซลเซียส ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในภาคพลังงานที่มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบเศรษฐกิจคาร์บอนต่ำ

สำหรับประเทศไทยภาคพลังงานถือเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักเมื่อเปรียบเทียบกับภาคส่วนอื่น เช่น ภาคเกษตรกรรมและภาคของเสีย โดยประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายภายใต้ Nationally Determined Contribution (NDC) [2] ได้แก่ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลงร้อยละ 40 ภายในปี 2030 การบรรลุความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี 2065 ซึ่งได้รับการสนับสนุนผ่านยุทธศาสตร์ชาติและเครื่องมือเชิงนโยบายต่าง ๆ เช่น ร่างพระราชบัญญัติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ระบบซื้อขายสิทธิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Trading System: ETS) และภาษีคาร์บอน [3]

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาด้านเทคโนโลยีและแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่ยังคงมีช่องว่างทางการวิจัย (Research Gap) ที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ (1) งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นเทคโนโลยีเฉพาะด้านซึ่งขาดการสังเคราะห์ภาพรวมของเทคโนโลยีพลังงานในลักษณะบูรณาการทั้งระบบ (2) ขาดการเชื่อมโยงองค์ความรู้จากบริบทระดับโลกเข้าสู่บริบทเฉพาะของประเทศไทยทั้งในมิติด้านเศรษฐกิจ นโยบาย และโครงสร้างพลังงาน (3) ยังมีการศึกษาเชิงเปรียบเทียบอย่างเป็นระบบที่จำกัด ระหว่างแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น พลังงานหมุนเวียน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ เทคโนโลยีด้านพลังงาน โดยเฉพาะในแง่บทบาทของเทคโนโลยีในระยะสั้นและระยะยาว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว โดยใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) จากงานวิจัยในช่วงปี 2023–2025 โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ (1) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของเทคโนโลยีพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (2) เพื่อสังเคราะห์แนวทางสำคัญในการ

ลดคาร์บอนในระบบพลังงานอย่างเป็นระบบ (3) เพื่อเสนอแนวทางเชิงนโยบายและการพัฒนาระบบพลังงานที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย เพื่อสนับสนุนการบรรลุเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero อย่างยั่งยืน

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review: SLR) โดยดำเนินการตามแนวทางของ PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [4] เพื่อให้กระบวนการสืบค้น คัดเลือก และสังเคราะห์ข้อมูลเป็นไปอย่างมีระบบ โปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

การสืบค้นบทความดำเนินการผ่านฐานข้อมูลวิชาการที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ได้แก่ ScienceDirect, Springer Nature และ Gale OneFile โดยกำหนดช่วงเวลาของบทความระหว่างปี 2023–2025 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ทันสมัยและสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานในปัจจุบัน ทั้งนี้ ได้กำหนดคำค้น (Search Strings) โดยครอบคลุมประเด็นสำคัญ ได้แก่ ความเป็นกลางทางคาร์บอน เทคโนโลยีพลังงาน และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น “Carbon Neutrality”, “Net Zero Emissions” ในการสืบค้น

กระบวนการคัดเลือกบทความดำเนินการตามขั้นตอนของ PRISMA ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การระบุบทความ (Identification) การคัดกรองเบื้องต้น (Screening) การพิจารณาความเหมาะสม (Eligibility) และการคัดเลือกบทความเข้าสู่การวิเคราะห์ (Included) จากการสืบค้นพบบทความจำนวน 4,704 ฉบับ โดยฐานข้อมูล ScienceDirect 596 ฉบับ Springer Nature จำนวน 2,643 ฉบับ และ Gale OneFile จำนวน 1,465 ฉบับ ซึ่งได้รับการคัดกรองโดยพิจารณาจากชื่อเรื่องและบทคัดย่อ จากนั้นจึงทำการประเมินเนื้อหาฉบับเต็มตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออกอย่างเป็นระบบจนเหลือบทความจำนวน 42 ฉบับ สำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกเกณฑ์การคัดเข้าประกอบด้วย บทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในช่วงปีที่กำหนดมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีพลังงานและการลดก๊าซเรือนกระจกและสามารถเข้าถึงฉบับเต็มได้ ขณะที่เกณฑ์การคัดออก ได้แก่ บทความที่ไม่เกี่ยวข้องกับภาคพลังงาน บทความซ้ำ และบทความที่ไม่มีความชัดเจนด้านระเบียบวิธีวิจัย นอกจากนี้บทความที่ผ่านการคัดเลือกยังได้รับการประเมินคุณภาพ โดยพิจารณาจากความชัดเจนของวัตถุประสงค์ ความเหมาะสมของวิธีวิจัย และความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่นำมาใช้มีคุณภาพ และสามารถสนับสนุนการวิเคราะห์ได้อย่างเหมาะสม

ในขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการสังเคราะห์เชิงเนื้อหา (Thematic Synthesis) ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) โดยเริ่มจากการจัดกลุ่มบทความตามประเด็นหลัก จากนั้นจึงวิเคราะห์แนวโน้มร่วม ความแตกต่าง และข้อจำกัดของแต่ละแนวทางเทคโนโลยี พร้อมทั้งประเมินศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของประเทศไทย การสังเคราะห์ดังกล่าวนำไปสู่การจำแนกประเด็นสำคัญออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน และ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งเป็นกรอบสำคัญในการวิเคราะห์ผลการศึกษในส่วนถัดไป

3. ผลการวิจัย

จากการทำ Systematic Literature Review (SLR) สามารถอธิบายผลได้ดังนี้

3.1 นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน

งานวิจัยในกลุ่มนี้สะท้อนให้เห็นว่าการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคพลังงานจำเป็นต้องอาศัย เครื่องมือเชิงนโยบายและกลไกตลาดควบคู่กับเทคโนโลยี โดยสามารถจำแนกแนวทางหลักออกเป็น 3 มิติ ได้แก่ (1) ระบบติดตามและประเมินการปล่อยคาร์บอน (Carbon Monitoring And Tracking) (2) กลไกตลาด เช่น Emission Trading System (ETS) และ Carbon Pricing และ (3) การบูรณาการระบบพลังงาน (Integrated Energy Systems: IES)

ในเชิงสังเคราะห์ งานวิจัยจำนวนมากชี้ให้เห็นแนวโน้มร่วมว่าการพัฒนาเครื่องมือด้านข้อมูล เช่น Carbon Flow Tracking [5, 8] ขณะที่เทคโนโลยีดิจิทัล เช่น Blockchain [6] ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือของ

ตลาดคาร์บอนและแบบจำลอง IES [7] เป็นรากฐานสำคัญของการกำหนดนโยบายที่มีประสิทธิภาพ สะท้อนการเปลี่ยนผ่านจาก “Policy-Driven” ไปสู่ “Data-Driven Governance”

เมื่อวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบพบว่าประเทศพัฒนาแล้วสามารถใช้กลไกตลาดคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีโครงสร้างข้อมูลและกฎระเบียบที่เข้มแข็ง [7, 11] ในขณะที่ประเทศกำลังพัฒนายังมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐานและความไม่เท่าเทียมด้านพลังงาน [9, 10] ในบริบทของประเทศไทยแม้ว่าจะมีแนวทางนำ ETS มาใช้และนโยบายด้านคาร์บอน แต่ยังขาดระบบ MRV และฐานข้อมูลคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการดำเนินนโยบายเชิงระบบ

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการวิเคราะห์นี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (2) โดยการสังเคราะห์มาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับระบบและตอบวัตถุประสงค์ข้อ (3) โดยเสนอแนวทางเชิงนโยบาย เช่น การพัฒนา ETS และ MRV สำหรับประเทศไทย

3.2 โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน

งานวิจัยในกลุ่มนี้แสดงให้เห็นบทบาทของ Smart Grid และ Virtual Power Plant (VPP) ในฐานะ โครงสร้างพื้นฐานสำคัญ สำหรับระบบพลังงานคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะในระบบที่มีสัดส่วนพลังงานหมุนเวียนสูง ในเชิงสังเคราะห์ งานของ Hu [12] และ Guo [14] แสดงให้เห็นว่า VPP สามารถรวมแหล่งพลังงานและบริหารจัดการผ่านระบบดิจิทัลเพื่อลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน ขณะที่ Fan [13] แสดงให้เห็นว่า Microgrid และ EV ในการเพิ่ม Flexibility ของระบบไฟฟ้า

ในเชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยี Smart Grid มีข้อได้เปรียบด้านความยืดหยุ่นและเสถียรภาพ แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนของระบบควบคุม โดยเฉพาะในประเทศที่ยังไม่มีโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัลรองรับ สำหรับในประเทศไทยการพัฒนา Smart Grid ยังอยู่ในระยะเริ่มต้น แต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการรองรับ Renewable Energy ที่เพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (1) โดยแสดงให้เห็นแนวโน้มและบทบาทของเทคโนโลยีพลังงานสมัยใหม่ในการสนับสนุนระบบพลังงานคาร์บอนต่ำ

3.3 การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน

การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนเป็นกลไกหลักในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยงานวิจัยในกลุ่มนี้เน้นทั้งการเพิ่มสัดส่วนพลังงานสะอาดและการแก้ปัญหาความไม่แน่นอนของพลังงาน ในเชิงสังเคราะห์ งานวิจัยชี้ให้เห็นว่าการผสมผสาน Renewable Energy เข้ากับ Hydrogen System สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของระบบ [11, 16] ขณะที่ Hydrogen ถูกมองเป็นพลังงานในอนาคต [15]

เมื่อเปรียบเทียบพบว่า Renewable Energy มีความพร้อมใช้งานสูงและต้นทุนลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีข้อจำกัดด้านความไม่แน่นอน (Intermittency) ขณะที่ Hydrogen มีศักยภาพสูงในระยะยาว แต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและเทคโนโลยี ในบริบทของประเทศไทยพลังงานหมุนเวียน เช่น Solar และ Biomass มีความเหมาะสมสูงในระยะสั้น ขณะที่ Hydrogen ควรได้รับการพัฒนาในระยะยาว

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบวัตถุประสงค์ข้อ (1) ในด้านการวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงาน และ วัตถุประสงค์ข้อ (2) ในการสังเคราะห์แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

3.4 การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน

งานวิจัยในกลุ่มนี้แสดงให้เห็นว่า Waste-to-Energy (WtE) และ Circular Economy เป็นแนวทางเสริมที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ในเชิงสังเคราะห์ งานของ Bjelic [19] และ Khalid [20] แสดงให้เห็นว่า WtE สามารถลดปริมาณของเสียและผลิตพลังงานได้ ขณะที่ Nieto [21] ชี้ให้เห็นความท้าทายของการจัดการขยะจากแผงโซลาร์เซลล์ในอนาคตเมื่อเปรียบเทียบพบว่า WtE มีข้อดีด้านการลดของเสีย แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนและเทคโนโลยี ขณะที่ Circular Economy ต้องอาศัยนโยบายสนับสนุนที่เข้มแข็ง

การเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ผลการศึกษานี้ตอบ วัตถุประสงค์ข้อ (2) และ (3) โดยแสดงแนวทางลดคาร์บอนและเสนอการประยุกต์ใช้ในบริบทประเทศไทย

การปิด Research Gap จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบพบว่างานวิจัยนี้สามารถเติมเต็มช่องว่างทางการวิจัย (Research Gap) ได้ในหลายมิติ ได้แก่

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบตามแนวทาง PRISMA การศึกษานี้ไม่เพียงแต่รวบรวมองค์ความรู้ที่มีอยู่ แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์และเชื่อมโยงองค์ความรู้เพื่อเติมเต็มช่องว่างทางการวิจัยที่ปรากฏในงานก่อนหน้าอย่างเป็นระบบ

ประการแรก งานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาเทคโนโลยีเฉพาะด้าน เช่น พลังงานหมุนเวียน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะหรือเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนแบบแยกส่วน ส่งผลให้ขาดมุมมองเชิงระบบของการเปลี่ยนผ่านพลังงาน การศึกษานี้ได้แก้ไขข้อจำกัดดังกล่าวโดยใช้กระบวนการสังเคราะห์เชิงธีม (Thematic Synthesis) เพื่อบูรณาการเทคโนโลยีและมาตรการหลักออกเป็น 4 กลุ่มสำคัญ ได้แก่ นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและการจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนการจัดกลุ่มและวิเคราะห์เชิงระบบดังกล่าวช่วยให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบพลังงาน ซึ่งเป็นการเติมเต็มช่องว่างด้านการสังเคราะห์แบบบูรณาการทั้งระบบอย่างชัดเจน

ประการที่สอง งานวิจัยระดับสากลส่วนใหญ่อ้างอิงบริบทของประเทศพัฒนาแล้ว ซึ่งมีโครงสร้างพลังงาน นโยบาย และศักยภาพทางเศรษฐกิจที่แตกต่างจากประเทศไทย การศึกษานี้จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงบริบท (Contextual Analysis) โดยประเมินความเหมาะสมของเทคโนโลยีและมาตรการต่าง ๆ ภายใต้ข้อจำกัดและโอกาสของประเทศไทย ทั้งในด้านโครงสร้างพื้นฐานพลังงาน ความพร้อมทางเทคโนโลยีและกลไกนโยบาย ส่งผลให้สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้จากระดับสากลสู่การประยุกต์ใช้ในระดับประเทศได้อย่างเป็นรูปธรรม

ประการที่สาม การศึกษานี้ได้เสริมการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) ระหว่างเทคโนโลยีและแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพิจารณาทั้งจุดแข็ง ข้อจำกัด ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี และความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ของแต่ละแนวทาง พร้อมทั้งจัดลำดับบทบาทของเทคโนโลยีตามช่วงเวลา ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มักนำเสนอผลในลักษณะการสรุปรายบทความ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบนี้ช่วยให้สามารถระบุเส้นทางการเปลี่ยนผ่านพลังงานที่เหมาะสมได้อย่างมีระบบและเติมเต็มช่องว่างด้านการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การปิดช่องว่างดังกล่าวอยู่ในระดับของการสังเคราะห์เชิงแนวคิดและข้อเสนอเชิงนโยบายเป็นหลัก โดยยังมีข้อจำกัดในด้านการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) และการจำลองสถานการณ์ (Scenario Modeling) ซึ่งควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในงานวิจัยอนาคตเพื่อยืนยันความเหมาะสมของแนวทางในเชิงปฏิบัติ

4. บทสรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ บทความที่ผ่านการคัดเลือกจำนวน 42 ฉบับสามารถสังเคราะห์ออกเป็น 4 ประเด็นหลัก ได้แก่ (1) นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน (2) โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะและโรงไฟฟ้าเสมือน (3) การบูรณาการพลังงานหมุนเวียนและ (4) การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเชิงวิพากษ์พบว่าเทคโนโลยีและมาตรการแต่ละกลุ่มมีระดับความพร้อม ศักยภาพในการลดก๊าซเรือนกระจก ต้นทุน และความเหมาะสมกับบริบทประเทศไทยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่อาจสรุปได้ว่าแนวทางใดแนวทางหนึ่งเพียงลำพังจะเป็นคำตอบต่อเป้าหมาย Carbon Neutrality และ Net Zero แต่จำเป็นต้องใช้การออกแบบเชิงระบบที่บูรณาการหลายแนวทางเข้าด้วยกัน

ในมิติแรก กลุ่มนโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน มีจุดเด่นตรงที่เป็นเครื่องมือที่สามารถกำหนดทิศทางและแรงจูงใจให้ภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรมปรับตัวพร้อมกัน งานของ Hu และคณะ [5] และ Liang และคณะ [8] แสดงให้เห็นว่าการติดตามการไหลของคาร์บอนและการใช้แบบจำลองระบบพลังงานแบบบูรณาการช่วยให้การประเมินการ

ปล่อยมีความแม่นยำมากขึ้น ขณะที่ Li และคณะ [6] เสนอการประยุกต์ใช้ Blockchain เพื่อเพิ่มความโปร่งใสของการซื้อขายคาร์บอน และ Lyu และคณะ [7] ชี้ให้เห็นบทบาทของการค้าพลังงานข้ามภูมิภาคในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรพลังงานสะอาด โดยในเชิงวิเคราะห์กลุ่มมาตรการนี้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญคือสามารถขยายผลในระดับประเทศได้รวดเร็วหากมีการออกแบบกฎหมายและระบบกำกับดูแลรองรับ แต่ข้อจำกัดสำคัญคือการพึ่งพาความพร้อมของข้อมูลระบบ MRV และความเข้มแข็งของสถาบันกำกับดูแล ซึ่งยังเป็นจุดอ่อนในหลายประเทศกำลังพัฒนา [9, 10] รวมถึงประเทศไทยด้วย ดังนั้นแม้ ETS, Carbon Pricing และ Carbon Tracking จะมีศักยภาพสูงในเชิงนโยบาย แต่ในบริบทไทยยังต้องลงทุนกับโครงสร้างพื้นฐานข้อมูล การทวนสอบโดยบุคคลที่สาม และความพร้อมของภาคอุตสาหกรรมก่อน จึงจะเกิดผลจริงในทางปฏิบัติ กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์มาตรการลดคาร์บอนและวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในด้านการเสนอแนวทางเชิงนโยบายที่เหมาะสมกับประเทศไทย

ในมิติที่สอง โครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid) และโรงไฟฟ้าเสมือน (VPP) เป็นกลุ่มเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในฐานะโครงสร้างพื้นฐานรองรับการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงาน งานของ Hu และคณะ [12], Fan และคณะ [13] และ Guo และคณะ [14] สะท้อนแนวโน้มร่วมกันว่า Smart Grid, Microgrid และ VPP ช่วยลดความผันผวนของพลังงานหมุนเวียน เพิ่มความยืดหยุ่นของระบบและบริหารทรัพยากรกระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในเชิงเปรียบเทียบจุดแข็งของเทคโนโลยีกลุ่มนี้คือไม่เพียงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทางอ้อมผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้า แต่ยังเป็น “เทคโนโลยีเชื่อมต่อ” ที่ทำให้ Renewable Energy, Storage และ EV ทำงานร่วมกันได้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของกลุ่มนี้คือเงินลงทุนเริ่มต้นสูง ความซับซ้อนของระบบควบคุมและสื่อสารและความจำเป็นต้องมีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญสูง อีกทั้งผลตอบแทนทางเศรษฐกิจมักไม่เกิดขึ้นทันทีเหมือนการลงทุนด้านการผลิตไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นในบริบทประเทศไทย กลุ่ม Smart Grid และ VPP จึงมีความเหมาะสมในระยะกลางมากกว่าระยะสั้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีพลังงานหมุนเวียนหนาแน่น เขตเมืองอัจฉริยะ เขตอุตสาหกรรม และโครงข่ายที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 1 ในด้านการวิเคราะห์แนวโน้มเทคโนโลยีพลังงานและเชื่อมโยงบางส่วนกับวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในแง่การออกแบบระบบไฟฟ้าในอนาคต

ในมิติที่สาม การบูรณาการพลังงานหมุนเวียน งานของ Qian และคณะ [11], Deng และคณะ [17], Beyazit [16], Wang และคณะ [15] และ Liu และคณะ [18] แสดงให้เห็นว่า Renewable Energy โดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมและการเชื่อมต่อกับระบบไฮโดรเจน มีบทบาทสูงต่อการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล ในเชิงเปรียบเทียบพลังงานหมุนเวียนมีจุดแข็งสำคัญคือเทคโนโลยีมีความพร้อมสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ต้นทุนของพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมลดลงมากและสามารถลดการปล่อยได้จริงในระยะสั้นเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีเกิดใหม่ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดสำคัญคือปัญหาความไม่แน่นอนของการผลิต การต้องพึ่งพาระบบกักเก็บพลังงานหรือโครงข่ายอัจฉริยะและข้อจำกัดด้านพื้นที่ ขณะที่ไฮโดรเจนมีศักยภาพสูงในฐานะเทคโนโลยีระยะยาว มีข้อจำกัดเรื่องต้นทุน การจัดเก็บ ความปลอดภัย และโครงสร้างพื้นฐาน [15, 16, 17] ดังนั้นหากพิจารณาความพร้อมเชิงเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ร่วมกันจะเห็นว่าพลังงานหมุนเวียนเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทยในระยะสั้นถึงระยะกลาง โดยเฉพาะ Solar, Biomass และรวมเข้ากับ Storage ส่วน Hydrogen ควรถูกวางเป็นการลงทุนเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาวมากกว่าการใช้งานเชิงพาณิชย์เต็มรูปแบบในปัจจุบัน กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 1 ในด้านการวิเคราะห์เทคโนโลยีพลังงานและวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์แนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ในมิติที่สี่ การจัดการของเสียและเศรษฐกิจหมุนเวียนเป็นกลุ่มที่มีลักษณะเด่นต่างจากกลุ่มอื่น เนื่องจากมุ่งลดการปล่อยผ่านการจัดการทรัพยากรและของเสียมากกว่าการเปลี่ยนแหล่งผลิตพลังงานโดยตรง งานของ Bjelic และคณะ [19] ชี้ว่า Waste-to-Energy (WtE) สามารถเป็นกลไกสำคัญในการลดของเสียและเพิ่มการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า ขณะที่ Khalid และคณะ [20] แสดงศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ เช่น ขี้เลื่อยในการใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล และ Nieto และคณะ [21] เตือนถึงปัญหาขยะจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อาจกลายเป็นความเสี่ยงใหม่ของการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในอนาคต ในเชิงสังเคราะห์กลุ่มนี้มีข้อได้เปรียบตรงที่เชื่อมโยงเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจหมุนเวียนและความ

มันคงทางพลังงานเข้าด้วยกัน แต่ข้อจำกัดคือประสิทธิภาพและความคุ้มค่าขึ้นอยู่กับชนิดของของเสีย ปริมาณการรวบรวม ระบบคัดแยก และความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐานท้องถิ่น ดังนั้นความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ของ WtE จึงมักสูงในเขตเมืองหรือพื้นที่อุตสาหกรรมที่มีของเสียต่อเนื่องมากกว่าพื้นที่ชนบท ในบริบทประเทศไทยแนวทางนี้มีศักยภาพในระยะสั้นถึงระยะกลาง โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ เขตอุตสาหกรรม และระบบจัดการขยะเทศบาล แต่จำเป็นต้องพัฒนาคู่ขนานไปกับกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อม การคัดแยกของเสียและการวางแผนการกำจัดขยะเทคโนโลยีพลังงานสะอาดในอนาคต เช่น PV Waste กลุ่มนี้จึงตอบวัตถุประสงค์ข้อ 2 ในด้านการสังเคราะห์แนวทางลดคาร์บอนและวัตถุประสงค์ข้อ 3 ในด้านข้อเสนอเชิงประจักษ์สำหรับประเทศไทย

เมื่อพิจารณาร่วมกันทั้ง 4 กลุ่ม พบข้อค้นพบสำคัญ 3 ประการ ประการแรก ไม่มีเทคโนโลยีใดสามารถตอบโจทย์การลดก๊าซเรือนกระจกได้ครบทุกมิติด้วยตนเอง แต่ละแนวทางมีบทบาทต่างกันในแต่ละช่วงเวลา ประการที่สอง เทคโนโลยีที่มีความพร้อมสูงและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในปัจจุบัน เช่น Renewable Energy, Energy Efficiency และ WtE มีศักยภาพในการขับเคลื่อนระยะสั้นมากกว่าเทคโนโลยีเกิดใหม่อย่าง Hydrogen หรือ CCS ที่แม้มีศักยภาพเชิงเทคนิคสูง แต่ยังมีต้นทุนและความไม่พร้อมเชิงโครงสร้างพื้นฐาน ประการที่สาม ความสำเร็จของการเปลี่ยนผ่านพลังงานไม่ได้ขึ้นกับเทคโนโลยีอย่างเดียว แต่ขึ้นกับการออกแบบเชิงระบบซึ่งรวมถึงนโยบาย โครงสร้างตลาดไฟฟ้า ข้อมูล การกำกับดูแลและการยอมรับของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย

ดังนั้นหากพิจารณาในบริบทประเทศไทย การสังเคราะห์นี้นำไปสู่ข้อเสนอเชิงระบบว่า การบรรลุ Carbon Neutrality และ Net Zero ควรใช้แนวทางแบบลำดับขั้น กล่าวคือ ระยะสั้น ควรเร่งขยายพลังงานหมุนเวียน การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน และระบบ WtE ที่พร้อมใช้งาน ระยะกลาง ควรลงทุนใน Smart Grid, VPP, ระบบกักเก็บพลังงาน และกลไกตลาดคาร์บอนที่มีประสิทธิภาพ และระยะยาวควรพัฒนา Hydrogen, CCS และโครงสร้างพื้นฐานคาร์บอนต่ำขั้นสูง ทั้งนี้ การจัดลำดับดังกล่าวไม่ได้เป็นเพียงการเรียงตามระดับเทคโนโลยี แต่สะท้อนถึงความสมดุลระหว่างศักยภาพ การลดการปล่อย ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเหมาะสมต่อโครงสร้างพลังงานของประเทศไทย

ตารางที่ 1 ตารางสังเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยีและแนวทางหลัก

กลุ่มเทคโนโลยี/ แนวทาง	จุดแข็ง	ข้อจำกัด	ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี	ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์	ความเหมาะสมกับประเทศไทย	ช่วงเวลา
นโยบายและกลไกตลาดคาร์บอน [5, 6, 7, 8, 11]	สร้างแรงจูงใจเชิงเศรษฐกิจ	ต้องมีระบบกำกับดูแลที่เข้มแข็ง	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	เหมาะสมแต่ต้องพัฒนาฐานข้อมูลก่อน	สั้น-กลาง
Smart Grid และ VPP [12, 13, 14]	เพิ่มเสถียรภาพระบบ	ลงทุนสูง ระบบซับซ้อน	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง	เหมาะสมในพื้นที่เมือง/อุตสาหกรรม	กลาง
Renewable Energy Integration [11, 15, 16]	ลด GHG ได้สูง	ต้องมี Storage/Grid Support	สูงสำหรับ Solar/Biomass ปานกลางสำหรับ Hydrogen	สูงสำหรับ Solar/Biomass ยังต่ำสำหรับ Hydrogen	เหมาะสมมาก โดยเฉพาะ Solar และ Biomass	สั้น-ยาว

กลุ่มเทคโนโลยี/ แนวทาง	จุดแข็ง	ข้อจำกัด	ความพร้อมเชิงเทคโนโลยี	ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์	ความเหมาะสมกับประเทศไทย	ช่วงเวลา
Waste-to-Energy / Circular Economy [19, 20, 21]	ลดของเสียและสร้างมูลค่าเพิ่ม	ขึ้นกับระบบคัดแยกและปริมาณของเสีย	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	เหมาะสมในเขตเมืองและอุตสาหกรรม	สั้น-กลาง

โดยสรุปการทบทวนวรรณกรรมครั้งนี้ไม่ได้เพียงรวบรวมเทคโนโลยีหรือมาตรการที่เกี่ยวข้องกับการลดก๊าซเรือนกระจก แต่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าแต่ละแนวทางมีบทบาทแตกต่างกันในเชิงเวลา เชิงระบบ และเชิงบริบทประเทศ การสังเคราะห์เชิงเปรียบเทียบช่วยให้เห็นว่าแนวทางที่มีความพร้อมสูงในปัจจุบัน เช่น พลังงานหมุนเวียนและการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานควรเป็นฐานหลักของการลดการปล่อยในระยะสั้น ขณะที่ Smart Grid, VPP และกลไกตลาดคาร์บอนเป็นตัวเร่งสำคัญในระยะกลาง ส่วน Hydrogen และเทคโนโลยีคาร์บอนต่ำขั้นสูงควรได้รับการพัฒนาเชิงยุทธศาสตร์ในระยะยาว ข้อค้นพบนี้ช่วยยกระดับบทความจากการสรุปผลรายบทความไปสู่การสร้างองค์ความรู้เชิงระบบสำหรับการออกแบบนโยบายพลังงานคาร์บอนต่ำของประเทศไทย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังปิดช่องว่างได้ในระดับการสังเคราะห์เชิงแนวคิดและข้อเสนอเชิงนโยบายมากกว่าการยืนยันเชิงปริมาณ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรต่อยอดด้วยการวิเคราะห์เชิงแบบจำลอง การประเมินต้นทุนและประโยชน์เฉพาะสำหรับประเทศไทย

5.เอกสารอ้างอิง

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change, *Paris Agreement*, 2015. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [2] National Institute for Environmental Studies (NIES), *Thailand Net Zero 2050 Roadmap*, 2023. [Online]. Available: https://www-iam.nies.go.jp/aim/pdf/Thailand_Net_Zero_2050Roadmap.pdf
- [3] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, *Draft Climate Change Act*, 2024. [Online]. Available: <https://www.dcce.go.th/datacenter/3345/>
- [4] Matthew J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, 2021. [Online]. Available: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>
- [5] J. Hu, K. Qin, R. Ma, W. Liu, J. Zhang, L. Pang, and J. Zhang, "A study on carbon emission flow tracking for new type power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 151, 110455, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110455
- [6] J. Li, X. Liu, and X. Shao, "Collaborative carbon emission reduction in power supply and demand," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 157, 109840, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109840
- [7] W. Lyu, Z. Cui, M. Yuan, and E. Shan, "Cooperation for trans-regional electricity trading from the perspective of carbon quota: A cooperative game approach," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 156, 109773, 2023. doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109773
- [8] H. Liang, L. Xu, Y. Zhao, S. Zhang, C. Chen, J. Tang, L. Yang, and Z. Lin, "Day-ahead joint scheduling of multiple park-level integrated energy systems considering coupling uncertainty of electricity-carbon-gas prices,"

- International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 158, 109933, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109933
- [9] C. G. Ogbonna, C. C. Nwachi, I. O. Okeoma, and O. A. Fagbami, "Understanding Nigeria's transition pathway to carbon neutrality using the multilevel perspective," *Carbon Neutrality*, vol. 2, no. 24, 2023. doi: 10.1007/s43979-023-00065-5
- [10] O. Ideki, B. Barikor, and O. Ajoku, "Assessment of natural resources for energy transition in Rivers State," *Discover Energy*, vol. 4, 119, 2024. doi: 10.1007/s43937-024-00039-3
- [11] T. Qian, Q. Wu, Q. Hu, Z. Guo, and Z. Wu, "Coordinated planning for offshore wind and electricity–hydrogen system based on stochastic dual dynamic programming: A case study of coastal provinces in China," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 163, 110341, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110341
- [12] S. Hu, Y. Chen, and J. Feng, "A flexible interactive coordination control method of commercial virtual power plant based on WCVAR," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 160, 110128, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110128
- [13] P. Fan, S. Ke, J. Yang, Y. Wen, L. Xie, Y. Li, and S. Kamel, "A frequency cooperative control strategy for multimicrogrids with electric vehicles based on improved evolutionary deep reinforcement learning," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 159, 109991, 2024. doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109991
- [14] J. Guo, C. Dou, D. Yue, B. Zhang, Z. Zhang, and Z. Zhang, "Cloud-edge-end collaboration-based joint design of frequency control and transmission communication for virtual power plants," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 166, 110564, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110564
- [15] L. Wang, X. Guo, J. Liu, C. Wang, Y. Wang, Y. Qiu, Z. Ling, X. Zeng, and D. Yuan, "Plasma-assisted hydrogen production: Technologies, challenges, and future prospects," *Processes*, vol. 13, no. 4, 1157, 2025. doi: 10.3390/pr13041157
- [16] N. I. Beyazit, "Comparative study of hydrogen storage and metal hydride systems: Future energy storage solutions," *Processes*, vol. 13, no. 5, 1506, 2025. doi: 10.3390/pr13051506
- [17] Z. Deng, J. Du, J. Tian, Z. Gan, B. Wang, and C. Zhao, "Toward hydrogen energy of electric power: Characteristics and main case studies in Shenzhen," *Processes*, vol. 11, no. 3, 728, 2023. doi: 10.3390/pr11030728
- [18] J. Liu, L. Wei, M. Zhou, Z. Zhang, B. Yuan, and Z. Wu, "Evaluating the substitution of coal-fired power plants with renewable energy," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 168, 110716, 2025. doi: 10.1016/j.ijepes.2025.110716
- [19] D. Bjelic, D. Neskovic Markic, D. Prokic, B. N. Malinovic, and A. Andrejevic Panic, "Waste to energy as a driver towards a sustainable and circular energy future for the Balkan countries," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 14, no. 3, 2023. doi: 10.1186/s13705-023-00435-y
- [20] Y. Khalid, A. Tahir, N. Akhtar, I. Khan, F. Tahir, M. Arshad, and A. Raza, "From waste to energy: Investigating sawdust combustion as a cleaner alternative to coal," *Carbon Neutral Systems*, vol. 1, no. 10, 2025. doi: 10.1007/s44438-025-00010-2
- [21] M. Nieto, B. Morone, F. Garcia Rosillo, M. A. Munoz-Garcia, and M. d. C. Alonso-Garcia, "Photovoltaic waste generation in the context of sustainable energy transition in EU member states," *Resources*, vol. 14, no. 3, 37, 2025. doi: 10.3390/resources14030037

วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม

Journal of Energy and Environment Technology

คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับ: บทความควรมีความยาวไม่เกิน 9 หน้า กระดาษ A4 การตั้งค่าหน้ากระดาษ ขอบด้านบน 3 ซม. และด้านล่าง 1.5 ซม. ขอบด้านขวาและซ้าย 2.25 ซม. พิมพ์ด้วย ตัวอักษร “Browallia New” ขนาด 14 โดยหัวข้อต่าง ๆ ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวธรรมดาและพิมพ์ชิดขอบ ทั้งสองด้าน การลำดับหัวข้อของเนื้อเรื่อง ให้ใช้เลขกำกับ บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีหัวข้อย่อยให้ใช้เลข ระบบทศนิยมกำกับหัวข้อย่อย เช่น 2.1 ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวหนา

คำแนะนำในการเรียงลำดับเนื้อหา: ให้เรียงลำดับตามหัวข้อต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง (Title): ควรกระชับ ชัดเจน ครอบคลุมเนื้อหาสำคัญ ชื่อเรื่องภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 ตัวหนา ตำแหน่งชิดซ้ายของหน้ากระดาษ

ชื่อผู้เขียน: ระบุชื่อเต็ม-นามสกุลเต็ม ของชื่อผู้เขียนให้ครบทุกคน และลงเครื่องหมายดอกจันกำกับท้ายรายชื่อสำหรับผู้ประสานงาน ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวธรรมดา ตำแหน่งชิดซ้ายของหน้ากระดาษ

ที่อยู่หรือหน่วยงาน: ระบุชื่อหน่วยงานหรือสถาบันใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวเอียง และ E-mail address ที่ติดต่อ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวธรรมดา ตำแหน่งชิดขอบกระดาษด้านซ้าย

บทคัดย่อ (Abstract): ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้นำบทคัดย่อภาษาไทยขึ้นก่อนภาษาอังกฤษ ซึ่งต้องมีเนื้อหาตรงกัน ให้พิมพ์คอลัมน์เดียว บรรทัดแรกเว้น 1 Tab เนื้อหาในบทคัดย่อควรระบุวัตถุประสงค์โดยย่อ ผลการวิจัย และบทสรุปโดยย่อ หัวข้อบทคัดย่อใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด 14 และพิมพ์ชิดขอบทั้งสองด้าน

คำสำคัญ (Keyword): ให้มีคำสำคัญเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษอยู่คนละหน้า ใต้บทคัดย่อ (Abstract) หัวข้อคำสำคัญใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวธรรมดาเนื้อหา (Text)

บทความวิจัยประกอบด้วยบทนำ (Introduction): บอกความสำคัญ หรือที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษาวัดดูประสพ และอาจรวมการทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods): กล่าวถึงรายละเอียด การวิเคราะห์ และการทดลองที่กระชับและชัดเจน

ผลการทดลอง (Results): บอกผลที่พบอย่างชัดเจน สมบูรณ์ และมีรายละเอียดครบถ้วน อาจมีรูปภาพหรือตารางที่ชัดเจนประกอบคำอธิบายได้

อภิปรายผลและสรุปผล (Discussion and Conclusion): อาจเขียนรวมกับผลการทดลองได้ เป็นการประเมินการตีความ และการวิเคราะห์ในแง่มุมต่าง ๆ ควรมีการอ้างหลักการหรือทฤษฎีมาสนับสนุนหรือหักล้างอย่างเป็นเหตุเป็นผลและอาจมีข้อเสนอแนะที่จะนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี): ระบุสั้น ๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากแหล่งใดบ้าง

ตารางและภาพ: ต้องมีความคมชัดและให้แทรกไว้ในบทความ มีคำอธิบายสั้นๆ แต่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วนและเข้าใจ กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมีคำอธิบายไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูป ให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า “รูปที่...”

ภาคผนวก (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง (References): บทความทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงเอกสารในบทความโดยเอกสารอ้างอิงระบบ Vancouver ดังตัวอย่างต่อไปนี้

[หนังสือ] ชื่อผู้แต่ง. ชื่อหนังสือ. ครั้งที่พิมพ์. ชื่อเมืองที่พิมพ์: ชื่อสำนักพิมพ์; ปีพิมพ์.

[วารสาร] ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อย่อของวารสาร. ปีพิมพ์; เล่มที่ (ฉบับที่): เลขหน้า.

[วิทยานิพนธ์และการศึกษาค้นคว้าอิสระ] ชื่อผู้เขียน. ชื่อเรื่อง [ประเภทหรือระดับปริญญา]. เมืองที่พิมพ์: ชื่อมหาวิทยาลัย; ปีพิมพ์.

[หนังสือรวมเรื่อง] ชื่อผู้แต่ง. ปีที่พิมพ์. ชื่อเรื่อง. ชื่อบรรณาธิการ (บรรณาธิการ), ชื่อหนังสือ (ครั้งที่พิมพ์ตั้งแต่พิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นต้นไป, หน้า). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์.

[หนังสือพิมพ์] ชื่อผู้แต่ง. (วันที่ เดือน ปีที่พิมพ์). ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือพิมพ์. เลขหน้าแรก-หน้าสุดท้าย.

[สื่ออิเล็กทรอนิกส์] ชื่อโฮมเพจ/เว็บไซต์ [อินเทอร์เน็ต]. ชื่อเมืองที่พิมพ์: ชื่อสำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์ [ปรับปรุงเมื่อปี เดือน วันที่; เข้าถึงเมื่อปี เดือน วันที่]. เข้าถึงได้จาก: URL.

เกณฑ์การพิจารณา: บทความจะต้องได้รับการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชานั้น 2-3 คน ซึ่งกองบรรณาธิการ อาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้น และทรงไว้ ซึ่งสิทธิในการตัดสินใจพิมพ์หรือไม่ก็ได้

“บทความที่ลงพิมพ์ เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น
ผู้เขียนต้องรับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากบทความนั้น”

วารสารวิชาการ

เทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม

2026

