



วารสารวิชาการ

เทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม

Journal of Energy and Environment Technology
of Graduate School SiamTechnology College



2025

บัณฑิตวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ISSN 2392 – 5701

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568
Vol. 12 , No.2, July – December 2025

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

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568): Vol. 12 No. 2 (July – December 2025)

ISSN (Print): 2392-5701

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

วัตถุประสงค์	เพื่อสนับสนุนและกระตุ้นให้มีการเขียนผลงานทางวิชาการ เผยแพร่ผลงานทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิชาการและนักศึกษาทั้งภายในและภายนอก รวมทั้งเป็นสื่อกลางทางการศึกษา ค้นคว้า และเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการ
จุดมุ่งหมาย	เป็นศูนย์กลางเพื่อสนับสนุน ถ่ายทอด องค์ความรู้ และเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ และการวิจัยที่มีคุณภาพ ให้เกิดประโยชน์ต่อสังคม ชุมชน ส่วนรวมของประเทศได้อย่างต่อเนื่องในวารสารรูปแบบสิ่งพิมพ์ และวารสารอิเล็กทรอนิกส์
เงื่อนไข/ข้อกำหนด	<ol style="list-style-type: none">1. รับต้นฉบับบทความที่เป็นไปตามเกณฑ์ รูปแบบ มาตรฐาน และแนวปฏิบัติที่วารสารกำหนดไว้โดยผ่านความเห็นชอบจากวารสารแล้วเท่านั้น (ไม่รับต้นฉบับบทความที่ไม่เป็นไปตามที่ระบุไว้)2. บทความที่ส่งขอรับการพิจารณาจะต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารอื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในขั้นตอนพิจารณาเพื่อเผยแพร่ในวารสารอื่น3. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นข้อคิดเห็นของผู้แต่ง/ผู้พิมพ์/ผู้เขียน เท่านั้น และต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น4. 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 อินเทอร์เน็ตเซอร์วิส 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 สายศร รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ ดวงเดือน รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ปรากฏเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ ด้วงทองสุข รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ กองสุวรรณ รองศาสตราจารย์ ดร.สายพิณ ไชยนั้นท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุโกศล วโนทยาพิทักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา สำราญพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต แต่งศรี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ติรอด ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา เครือซาลี ดร.สุทธิลักษณ์ ชุนประวัติ ดร.กฤติเดช ดวงใจบุญ ดร.กนกอร รจนากิจ ดร.ติณณภพ จุ่มอิน ดร.กวินเวทย์ พิพิธนันทนธร ดร.ทรงพล นครศรีเรื่องศักดิ์ อาจารย์วิษณุ บุญมาก อาจารย์ปิยะนัฐ ใจตรง อาจารย์เฉลิมพล เมืองลี อาจารย์จิรวัดน์ กรุณา อาจารย์สงกรานต์ ภารกุล อาจารย์กัญญ์ณัฐ สุริยันต์ อาจารย์วีริศร์ รัตนนิมิตร อาจารย์ปัญญาไพฑัฒนกร บุญพร้อม อาจารย์สารสิน โคตรธาดา	มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม มหาวิทยาลัยเซนต์ปีเตอร์สเบิร์ก มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา มหาวิทยาลัยธนบุรี มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ มหาวิทยาลัยเซนต์ปีเตอร์สเบิร์ก มหาวิทยาลัยเซนต์ปีเตอร์สเบิร์ก มหาวิทยาลัยธนบุรี มหาวิทยาลัยปทุมธานี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

หน้า

1. ให้ข้อคิด แนวทาง คำปรึกษา รวมทั้งข้อเสนอแนะในการดำเนินการจัดทำวารสารให้มีคุณภาพ เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้การดำเนินงานจัดทำวารสารสำเร็จลุล่วงด้วยดี
2. พิจารณาและประเมินบทความที่ส่งเข้าสู่กระบวนการของวารสารตามความเหมาะสม

ฝ่ายประสานงานและเลขานุการกองบรรณาธิการ

อาจารย์ชลิตา โปะมา

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์สารสิน โคตรธาดา

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewers) ปีที่ 12 ฉบับที่ 2

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ ภูแก้วล้วน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐกฤต ปานขลิบ

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎา เครือชาติ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ดร.ชยพล ผู้พัฒนา

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ดร.จุฑารัตน์ แก้วบุญชู

มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร.บงกชรัตน์ สุษะหมุด

มหาวิทยาลัยมหิดล

ดร.ติณณภพ จุ่มอิน

มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

ดร.กฤติเดช ดวงใจบุญ

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ดร.ไพฑูรย์ เหล่าดี

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ดร.ชนเสฏฐ์ อัครัญญ์ภูติส

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ดร.สุทธิลักษณ์ ชุนประวัติ

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

ดร.ไพโรจน์ หอมอ่อน

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์จิรวัดน์ กรรณา

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์สงกรานต์ ภารกุล

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์ก่าจิต ใจตรง

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์วีรศร์ รัตนนิมิตร

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์ปัญญาพัชรภร บุญพร้อม

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์สารสิน โคตรธาดา

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

อาจารย์ภัทรมนตรี ธนเดชา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

อาจารย์เฉลิมพล เมืองลือ

มหาวิทยาลัยปทุมธานี

บทบรรณาธิการ

ในบริบทของการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมในระดับโลก การพัฒนาเทคโนโลยีได้ปรับเปลี่ยนทิศทางไปสู่แนวทางที่ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการลดผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ อันเป็นพื้นฐานสำคัญของการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งนี้ เทคโนโลยีพลังงานสะอาดนับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทในการขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันและอนาคต ด้วยเจตนารมณ์ของวิทยาลัยเทคโนโลยีสยามที่มุ่งมั่นส่งเสริมและพัฒนาองค์ความรู้ในสาขาดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 2 ประจำปีที่ 12 ได้รับการจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพ ซึ่งครอบคลุมหลากหลายสาขาวิชา ได้แก่ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ และตอบสนองต่อความท้าทายของการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยามตระหนักถึงความสำคัญของการบูรณาการองค์ความรู้จากหลากหลายศาสตร์ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาแนวคิด นวัตกรรม และแนวทางการแก้ไขปัญหาที่สอดคล้องกับบริบทของสังคมในยุคปัจจุบัน วารสารฉบับนี้จึงเป็นเวทีหนึ่งในการส่งเสริมการสร้างสรรค์ทางวิชาการที่มีคุณภาพต่อการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

กองบรรณาธิการขอเชิญชวนนักวิจัย นักวิชาการ และผู้สนใจ ส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารฉบับนี้ โดยขอความร่วมมือในการปฏิบัติตามข้อกำหนด และแนวทางที่วารสารกำหนดไว้อย่างเคร่งครัด ทั้งนี้เพื่อรักษามาตรฐานทางวิชาการ และสร้างความน่าเชื่อถือในระดับสากล

สุดท้ายนี้ ขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อคณะกรรมการที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้อ่านทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอด ทั้งนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงาน และสิ่งแวดล้อม จะยังคงเป็นแหล่งบ่มเพาะองค์ความรู้ทางวิชาการ และเป็นแรงผลักดันให้เกิดการพัฒนาที่ยั่งยืนในทุกมิติ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐกฤต ปานชลธิ

บรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยี พลังงานและสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
1. EFFECT OF ENERGY AND ENVIRONMENT ON WELDED JOINTS BETWEEN SS304 AND Q245 USING GTAW <i>Kanok-on Rodjanakid Nattapong Kunla Sonthaya Khamdech Anusorn Phongprapa</i>	1-14
2. Virtual Simulation Program to Enhance Learning of Bomb Calorimeter Operation for Engineering Education <i>Poorisa Sangbunluerit Ratchadaporn Kingkaew Kritsakon Aongkanon Nutthapon Wongyao</i>	15-23
3. การศึกษาวิเคราะห์การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่ยั่งยืน : กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ <i>อิงศัณภัศ กรศิริชัยวัชร กวินเวทย์ พิพิธนาชั้นยธรร วันเพ็ญ วิโรจน์เจริญวงศ์</i>	24-36
4. การเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างจากนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟ และประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท <i>ณัฐพงศ์ ม้าเทศ ดารินทร์ วีระชัย ชลธิชา มั่งดี ธนาพร เทียมใจ จิราภรณ์ สาทิงค์ รมิตา อุประ ฤทธิ์ติกร สมปาน</i>	37-49
5. การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบติดตามแสงอัตโนมัติ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ <i>สารสิน ไคตรธาดา ชลิตา โปะมา อนุรักษ บัวจัญญ เทพวารินทร์ จาปาศักดิ์ วิศคารโด อลิคานดรี สมรักษ์ กาญจโน</i>	50-56
6. การปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าว <i>กฤติเดช ดวงใจบุญ</i>	57-70
7. การอนุรักษ์พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง กรณีศึกษา : บริษัทผลิตและจำหน่ายอาหารแปรรูปแช่แข็งในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสมุทรสาคร <i>ประหยัด มีบุญเกิด</i>	71-81
8. การแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะและปริมาณไมโครพลาสติกในดิน ณ ศูนย์จัดการขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร <i>ศุภวัฒน์ ชัยเกษม วีร์ราษฎร์ ณ ร้อยเอ็ด กนกวรรณ เอี่ยมเพชร รัตตะวัน พูลทรัพย์ พรพิมล ทำทอง สุนิภา วงษ์ทอง</i>	83-96

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิชาการ	หน้า
9 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล ฐกฤต ปานชลธิบ	97-103
10 การทบทวนงานวิจัยอย่างมีระบบ: การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี ในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์เพื่อความยั่งยืน อริศโนชา เพ็ญหนู เสรีย์ ตู๊ประกาย กฤษดา พิศลยบุตร อนุวัต เจริญสุข นันทน์ภัสร์ อินย์ม วัฒนา จันทะโคตร	104-116
11 การพัฒนาพลังงานในประเทศไทยอย่างยั่งยืน จอร์จ เคนดารี มารี่ เคนดารี จงจิตร์ หิรัญลาม	117-128

EFFECT OF ENERGY AND ENVIRONMENT ON WELDED JOINTS BETWEEN SS304 AND Q245 USING GTAW

Kanok-on Rodjanakid^{1*} Nutthapong Kunla¹ Sonthaya Khamdech¹ Anusorn Phongprapa¹

¹Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, BangkokThonburi University, 10170

*Corresponding author Email : kanok-on.rodj@gmail.com

Received: August 16, 2025

Revise: November 29, 2025

Accepted: December 12, 2025

Abstract

This research aims to study the effect of energy and environment on welded joints of SS304 and Q245 steel of gas tungsten arc welding (GTAW) using filler metal AWS A5.9: ER309L. The specimen dimension was 150 × 100 mm with a thickness of 6 mm. The results of the experiment found that characteristics of deep penetration and melting between the weld metal and consistent metal work and there is perfection between the weld metal and the base metal. The welding GTAW technique process will produce an average maximum tensile strength of 463.64 MPa. The maximum hardness in the heat affected zone (HAZ SS304) is 182 HV and the lowest hardness in the base metal zone (HAZ SS304) is 130 HV. The microstructure structures of the weld zone consist of dendrite ferrite and austenite matrix, which resulted in the heat affected zone will have higher hardness than the base metal. Temperature results obtained from the infrared thermometer and numerical simulation different of 5% which is an acceptable value. The summary result, it can be concluded that the gas tungsten arc welding (GTAW) uses less energy than the shielded metal arc welding (SMAW) due to the lower heat consumption, but produces higher quality and cleaner results. Environmentally, GTAW welding has a lower impact than SMAW welding, particularly in terms of smoke and slag generation, making it more environmentally friendly.

Keywords: Gas tungsten arc welding, Metallurgical, Mechanical properties, Numerical simulation

1. Introduction

Modern welding processes require a greater variety of methods to achieve the desired objectives of specific applications. Welded construction between carbon steels and stainless steel is widely used in chemical, petroleum, natural gas, nuclear energy and power generation sectors, and exhibits advantages, such as low cost for carbon steels and good corrosion resistance for stainless steels [1]. Generally, welding is done using shielded metal arc welding (SMAW) welding method because it is convenient for field work. To select the appropriate welding process for joining the two types of materials, as shown in Figure 1, gas tungsten arc welding (GTAW), which is characterized by its high controllability and low equipment cost, is widely used for precision sheet metal welding. Also known as tungsten inert gas (TIG) welding, it is a well-known welding technique for a wide range of materials [2]. The gas tungsten arc welding (GTAW) is also less energy-efficient than the shielded metal arc welding (SMAW) due to its lower heat consumption, yet it produces higher quality and cleaner results. GTAW welding has a lower environmental impact than SMAW welding, especially in terms of fumes and slag generation, making it more environmentally friendly. However, SMAW welding is still a widely used welding process, especially in maintenance and field applications, where it is more convenient than GTAW welding [3].



Figure 1 The specimens of SS304 and Q245 welded by gas tungsten arc (GTAW) method

Several studies have focused on analyzing metallurgical, mechanical properties, and the thermal effects associated with welding joints. Himanshu Vashishtha studied the mechanical properties and microstructure of dissimilar welding between AISI 201 and AISI 304 for GTAW and SMAW processes [4]. The experimental results showed that at welding speeds of 2 mm/s and 2.7 mm/s, the welds were successfully obtained via the GTAW process. In addition, in the heat affected zone, there were smaller dendritic components obtained from the high welding speed, which resulted in an increase in the microstructure hardness and better weld metal tensile strength for the GTAW process. Chang' an Li studied the base metal of stainless-steel clad plates filled with carbon steel filler metal, and the microstructures and mechanical properties of joints with diverse filler metals were analysed and compared [5]. The results indicate that a local hardening zone (LHZ) forms in the weld filled with filler metals of stainless steel and carbon steel because of the formation of martensite phase in the first layer of weld with filler metal of carbon steel. The results of the side bending test indicate that the LHZ protrudes from the weld, and the crack occurs near the LHZ if the area of the LHZ on the cross section of joint is larger than 17 % of that of the whole cross section of the joint. Mehran Ghafouria studied the welding distortions, temperature measurement and solid-state phase transformation of ultra-high strength steel S960 [6]. The experimental results show that the simulation predicts that the welded materials in HAZ and FZ have a bainite-martensite microstructure, in which martensite has a smaller share than bainite. Comparison between the prediction of angular distortion caused by welding and out-of-plane bending deformation using SSPT model shows higher accuracy level. I. Reda Ibrahim examined the mechanical properties in dissimilar butt joints between Ni medium manganese and nickel-chromium austenitic stainless steels processed by GTAW [7]. The experimental results showed that the microstructure consisted of austenite and delta ferrite matrix obtained by welding dissimilar butt joints. It was also found that the weld still has a low tensile strength value at 610 MPa, which is lower than the base metal (BM) M-Mn SS and Ni-Cr SS. The cause is due to the uneven dendritic structure of the weld zone where Cr-carbide precipitation occurs. C-H Huang [8] investigated mechanical and corrosion properties of dissimilar welded joints between SUS304 stainless steel and SS400 low carbon steel. The experimental results showed that the microstructure around the weld and SUS304 showed more granular corrosion and corrosion bumps as the immersion time increased. The samples were immersed in sodium chloride solution for 21 days, and the EDS results showed a decrease in chromium content, which led to increased corrosion. Mahmoud Khedr examined mechanical properties and microstructure of two joints of Medium-Mn stainless steel with Low-and High-alloyed steel using the gas tungsten arc welding technique [9]. The microstructure in the weld zone was found to be mainly composed of austenite matrix and a small fraction of ferrite (3.5–5.7%). The tensile stress of MMn–SS/NiCr–SS welds was higher than that of MMn–SS/LCS welds, with values of 610 and 340 MPa, respectively. Jinkamon Lujian investigated ER308L and ER309L filler metal on dissimilar metals between carbon steel and 3CR12 ferritic stainless steel using the gas tungsten arc welding technique [10]. The results of using ER308L welding wire at 70A welding current revealed that the microstructure consisted of delta ferrite and austenite, and when compared with 100A welding current, delta ferrite, austenite and martensite were present. In addition, no carbide formation was found in the weld metal zone when using ER308L welding wire. The delta ferrite content was higher than that of ER309L welding wire, and the delta ferrite content increased with increasing hardness.

Abdulrahman Shuaibu Ahmad analyses the residual stress and deformation field induced by double-pass TIG welding of Al 2219 plate [11]. The FE model was developed using ABAQUS and FORTRAN packages utilising Goldak's ellipsoid heat source model. The FE model was experimentally validated, and the compared results show good agreement with average variations of 18.8% and 17.4% in residual stresses and deformation, respectively. S. Nuchim examined residual stress and distortion in Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) grade EH-36 steel plates of butt joints welding by hybrid GTAW and SMAW process [12]. The thermal measurements show a close agreement between the experimental and numerical simulation thermocouple data, with a temperature deviation of only 5%. Residual stress analysis using X-ray diffraction reveals that ultrasonic stress relaxation reduces the maximum residual stress from an average of 193.4 MPa to 39.1 MPa. Distortion analysis shows that the maximum FEM deformation is 0.2873 mm, with a deviation of 12% from the coordinate measurement (CMM) results, while the minimum FEM deformation is 0.031922 mm, a difference of 3%. Saulius Baskutis study utilized a metal inert gas welding (MIG) to make a dissimilar weld of stainless steel AISI 304, 314, 316L, 420 grades and a standard structural steel S355MC [13]. The results obtained of welds in all grades of austenitic steels can withstand tensile tests with an average tensile strength of 472 MPa. In addition, cracking was detected in the base metal zone, indicating that the use of 308LSI filler metal is only suitable for welding austenitic stainless steels and dissimilar structural steels and is not suitable for welding martensitic structural steels.

This research aims to study the effects of gas tungsten arc welding with AWS A5.9: ER309L filler metal on SS304 and Q245 by performing macro and microstructural analysis, tensile test, hardness measurement, measuring the alloying elements in the weld line using EDS (Energy dispersive spectroscopy) technique and thermal analysis. Finally, the experimental results are analyzed and summarized.

2. Welding Procedure and Experiment

2.1 Welding materials

In this welding of dissimilar materials SS304 and Q245 steel plates were selected, dimensions of width 100 mm, length 150 mm, thickness 6 mm. The first plate is SS304 stainless steel with chemical composition as shown in Table 1. The second plate was Q245 steel with chemical composition as shown in Table 2.

Table 1 Chemical composition of SS304 (%wt)

Materials	SS304
C	≤ 0.080
Mn	≤ 2.00
Si	≤ 0.75
P	≤ 0.045
S	≤ 0.030
Cr	18.0 – 20.0
Ni	8.0 – 10.5
N	≤ 0.10

Table 2 Chemical composition of Q245 (%wt)

Materials	Q245
C	≤ 0.20

<http://jeet.siamtechu.net>

Mn	0.5 – 1.0
Si	≤ 0.35
P	≤ 0.025
S	≤ 0.015
Al	≤ 0.020

2.2 Filler metal

The filler metal used was AWS A5.9: ER309L, a diameter of 2.4 mm. with the chemical composition shown in Table 3. Figure 2 shows the welding process using (GTAW) according to AWS D1.1 standards.

Table 3 Chemical composition of ER309L (%wt)

Filler metal	AWS A5.9: ER309L
C	≤ 0.030
Si	0.3 – 0.65
Mn	1.0 – 2.5
P	≤ 0.030
S	≤ 0.030
Ni	12 – 14
Cr	23 – 25
Mo	≤ 0.75
Cu	≤ 0.75



Figure 2 Gas tungsten arc welding process (GTAW)

2.3 Workpiece preparation and welding process

Preparation of the workpiece for welding was performed by creating a V-groove joint at an angle of 60 degree as shown in Figure 3. The welding process using gas tungsten arc welding (GTAW) in the 6G welding position by specifying the welding parameters as shown in Table 4. For welding processes using tungsten filler metal arc to generate heat and gas tungsten arc welding (GTAW), shielding gas during welding uses argon gas. The shielding gas flow volume can be set using a flow meter installed at the tank head, which can adjust the gas flow volume as needed. The welder will control the welding speed. For this experiment the speed is 13.7 mm/min which is related to the welding current. If high welding current is used and welding speed is set to increase, it will affect the quality of production. The amount of heat entering the weld line no matter whether it's a lot or a

little will affect the properties of the weld line and HAZ such as hardness and tensile strength, etc. However, only 60% of the heat entering the weld line comes from TIG welding using Argon gas to cover it. Some of the heat from the arc is lost to the flow of gas, as well as radiation and other factors.

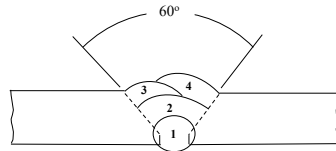


Figure 3 Standard requirements for welding procedure

Table 4 Welding parameters used in GTAW process

Parameter	Unit
Electrode diameter	2.4 mm
Arc Voltage	120 Volt
Current intensity	14 A
Welding speed	13.7 mm/min
Shielding gas flow volume	16 liters/min

2.4 Metallurgical and EDS Techniques

The metallographic examination was performed using an Olympus OLS 4000 laser microscope, as shown in Figure 4 which captured detailed images of the workpiece in 3D with high resolution. The welds were treated to study the weld characteristics and phase changes structures of SS304 stainless steel (Base metal: BM1), heat-affected zone 1 (HAZ1) of SS304 stainless steel, weld metal zone (WM), heat-affected zone 2 (HAZ2) of Q245 steel, and base metal 2 of Q245 steel (BM2). In addition, the chemical composition was examined using EDS (Energy dispersive spectroscopy) technique using a Scanning Electron Microscope (SEM) model JOEL: JSM-7800F prime, which was used to analyze the chemical composition of the elements in the weld metal zone.

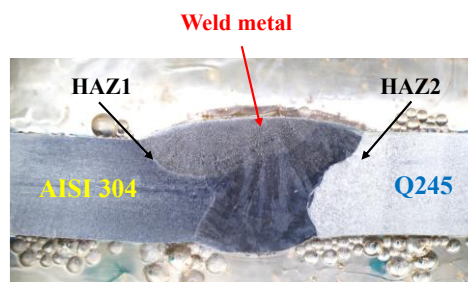


Figure 4 Position of metallurgical structure inspection in the specimen

2.5 Tensile test

Tensile testing using a universal testing machine, as shown in Figure 5. INSTRON model 8801, which is a longitudinal tensile testing machine for materials, prepared the specimens for tensile testing. The test parameters can be directly input from the touch screen. The test processing is in the form of numbers and graphs. In this research, this test is used to determine the yield strength, the ultimate tensile strength and percent elongation of the weld metal. The specimens were prepared for tensile testing according to ASTM E8/E8M-22 standard, as shown in Figure 6.



Figure 5 Universal testing machine model INSTRON: 8801

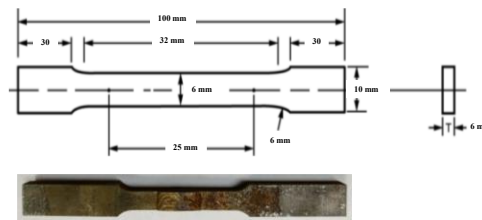


Figure 6 Preparation of specimens for tensile testing according to ASTM E8/E8M-22 standards

2.6 Hardness measurement

The hardness test was performed using Vicker hardness tester model SHIMADZU: HMV-G. The hardness values will be measured in various areas of the weld, such as the base metal, the heat affected zone (HAZ), and the weld metal as shown in Figure 7. The test was performed according to ASTM E3-11 standard using a force of 200 kgf (HV0.2 (1.961N) and a holding time of 15 seconds. The compression was started in the 2 lines, the top and bottom line of the GTAW welding pass.

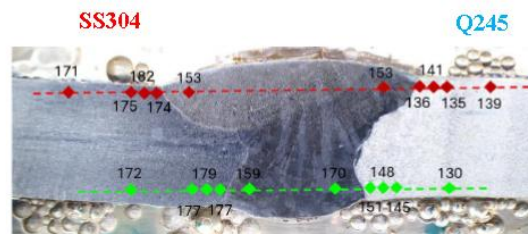


Figure 7 Area of hardness test points in the specimen

2.7 Thermal analysis

Using the assumptions described above, the conservation equations can be formulated. In a stationary, orthogonal curvilinear coordinate system (x, y, z) [11], the three-dimensional heat-transfer equation governing the time-dependent formation of solid material can be written as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

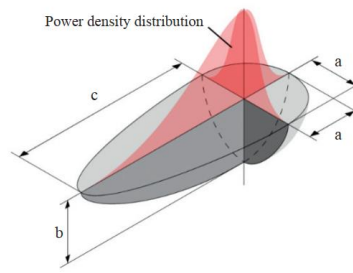


Figure 8 Three-dimensional shape of the heat source [11]

Where ρ denotes the mass density, c the specific heat capacity, and kx_i the components of the thermal-conductivity tensor. Q represents the applied heat input, while a , b and c correspond to the lengths of the ellipsoidal axes in the x , y , and z directions, respectively, as illustrated in Figure 8. T describes the temperature variation as a function of the axial coordinate x_i and time t , and x_i indicates the principal spatial axis. Based on these definitions [11], the stress relationship can be expressed as:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} e + 2G \varepsilon_{ij} - (3\lambda + 2G) \delta_{ij} \alpha (T - T_0) \quad (2)$$

where σ_{ij} is the stress tensor, T_0 is the reference temperature at zero stress, α is the expansion coefficient, ε_{ij} is the strain tensor, and δ_{ij} is equal to 1 when $i = j$ or $i \neq j$.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad e = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (3)$$

where ν is the Poisson's ratio, and E is the modulus of elasticity.

According to the double-ellipsoid heat-source model, the source is divided into front and rear halves, each with its own heat-flux distribution [11]. The model uses Goldak's volumetric heat-flux formulation, where the heat flux in the front and rear regions is defined by equations (4) and (5), respectively.

For the front heat source,

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f\eta VI}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_f^2} e^{-3z^2/c^2} \quad (4)$$

and for the rear heat source,

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r\eta VI}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b_r^2} e^{-3z^2/c^2} \quad (5)$$

where V is the voltage during welding, I is the arc current, and η is the arc efficiency with $b_f = a$, $b_r = 4b_f$, and $f_f + f_r = 2$; b_f is the distance of the front heat flux, b_r is the distance of the rear heat flux [10]. The geometric parameter a , b_f , b_r and c are schematically. The relationship between these heat-deposited fractions and geometric parameters is as below [11]:

$$f_f = \frac{2b_f}{(b_f + b_r)} \quad (6)$$

$$f_r = \frac{2b_r}{(b_f + b_r)} \quad (7)$$

The front half of the source corresponds to a quadrant of one ellipsoidal emitter, while the rear half corresponds to a quadrant of a second ellipsoidal emitter. The figure also illustrates the resulting power-density distribution along the y-axis [11].

Temperature measurement of welding used an infrared thermometer, FLUKE model 62 MAX to the side surfaces of the parent material. The positions at which the 4 points were measured are schematically the heat source location along from the weld centerline as shown in Figure 9. The numerical thermal simulation of the welded SS304 stainless steel and Q245 steel was performed using a 3D model as shown in Figure 10. The plate dimensions were 100 mm wide, 150 mm long and 6 mm thick. The coordinate system of the model and the mesh division consisted of the total number of elements = 3652, the total number of nodes = 6161 and the number of DOF = 6078. To ensure accuracy and minimize the error, 3-time numerical simulations were conducted with different numbers of elements [12]. Finally, the configuration giving the smallest error was selected. Due to the symmetry of the weld sample, only half of the weld was analyzed using the centerline of the weld as the axis of symmetry. The heat transfer data from the simulation were measured at four positions T_1 , T_2 , T_3 and T_4 on the weld model at time intervals of 150 and 450 s. These positions included the positions of the heat source at the centerline of the weld at distances of 12, 18 and 30 mm from the centerline as shown in Figure 11.



Figure 9 Measuring temperature on the surface of the workpiece with an infrared thermometer

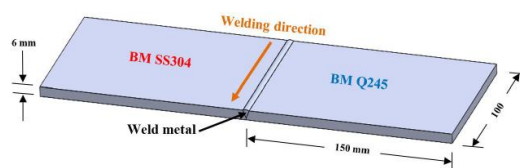


Figure 10 Three-dimension model

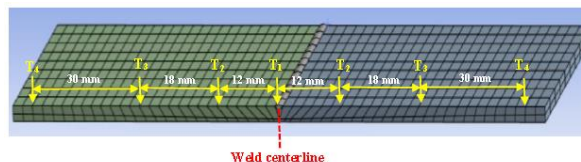


Figure 11 Heat transfer position

3. Result and discussion

3.1 Metallurgical and EDS Techniques

Microstructural examination by optical microscope (OM) as shown in Figure 12 the base metal zone of SS304 stainless steel (Base metal: BM1) at a magnification of 500x, 50 μm . The microstructure is generally a twin-phase austenitic stainless steel [5]. Figure 13 is an image of the heat affected zone (HAZ1) of SS304 stainless steel at a magnification of 100x, 200 μm . The microstructure of both weld metals consists of primary ferrite dendrites with interdendrite austenite. Interestingly, both have relatively high delta ferrite content [7], probably because of low carbon content of both filler metals in the weld in this work, which is consistent with the role that carbon tends to play in stabilizing the austenite phase in the weld metal.

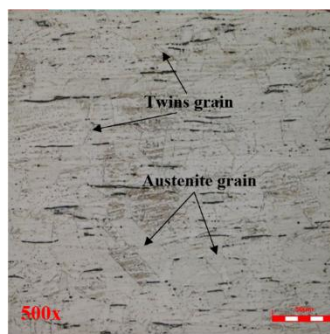


Figure 12 Microstructure in the base metal zone of SS304 stainless steel (Base metal: BM1)

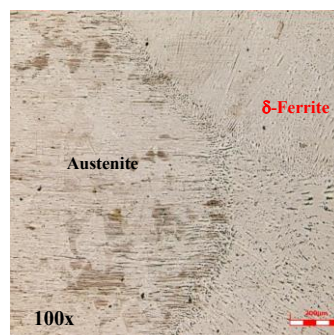


Figure 13 Microstructure in the heat affected zone (HAZ1)

Figure 14, The microstructure in the weld metal (WM) at 100x, 200 μm , consists of ferrite dendrite and austenite matrix [5, 7]. The chemical composition was also examined by EDS (Energy dispersive spectroscopy) technique using scanning electron microscope (SEM). The results of the analysis revealed that most of the elements are components of the welding wire with chromium as the highest content. The details of other elements are shown in Table. 5

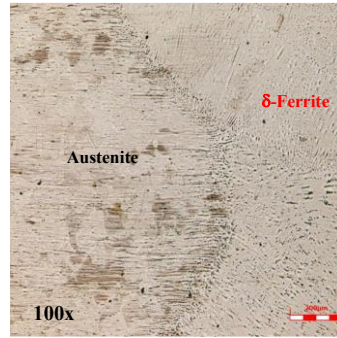


Figure 14 Microstructure in the weld metal zone (WM)

Table 5 Chemical composition of weld metal zone

Element	%wt
Cr	21.59
Ni	10.17
Fe	66.31
Mn	1.93

Figure 15 shows the heat affected zone (HAZ2) of Q245 steel at a magnification of 500x, 50 μm . The microstructure is generally composed of ferrite and pearlite, with pearlite distributed on the grain boundaries of the ferrite [5]. Figure 16 is an image of the base metal area of Q245 steel (Base metal: BM2) at 1000x, 40 μm . The microstructure is generally composed of ferrite and pearlite, with pearlite distributed on the grain boundaries of the ferrite [5].

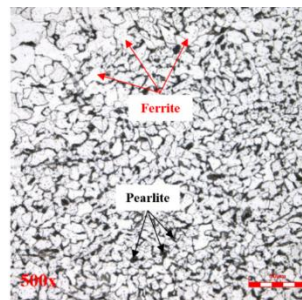


Figure 15 Microstructure in the heat affected zone (HAZ2)

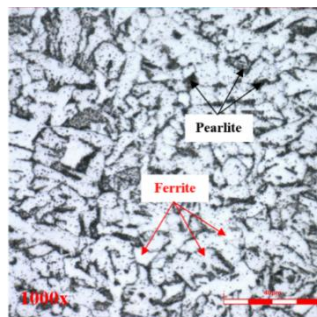


Figure 16 Microstructure in the base metal zone of Q245 steel (Base metal: BM2)

3.2 Tensile test

The tensile test results from the stress-strain curves of the welded specimens in Figure 17 show that all stresses have close values due to fracture of the specimens resulting from the tensile test. However, it was also found that all fractures occurred in the base metal Q245, especially at the HAZ, as shown in Figure 18. Therefore, it can be concluded that the most fragile part of the welded specimens is the base metal Q245 as shown in Table 6 [5, 7, 9, 13].

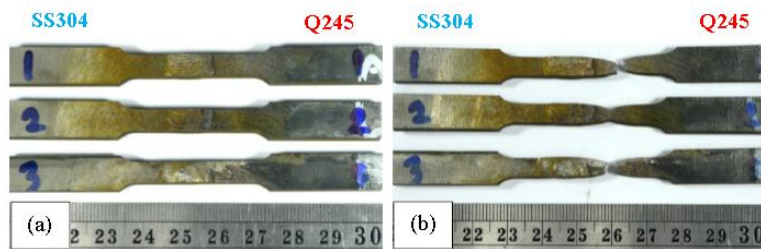


Figure 17 Tensile test specimen (a) before tensile testing (b) after tensile testing

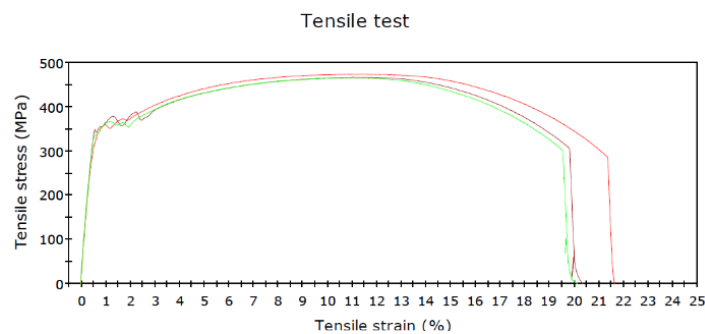


Figure 18 Stress-strain curves of the 3 specimens

Table 6 Tensile test results

No.	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation %	Location of fracture
1	333.84	463.85	20.59	BM Q245
2	337.28	457.12	19.59	BM Q245
3	338.82	469.95	18.97	BM Q245
Average	336.65	463.64	19.72	BM Q245

3.3 Hardness measurement

The results of the hardness test from the GTAW welding process are shown in Figure 19. The hardness profile of the weld is divided into 5 zones: base metal (BM SS304), heat affected zone (HAZ SS304), weld metal (WM), heat affected zone (HAZ Q245) and base metal (BM Q245). The trend of hardness value in each area of all 10 points along line 1 (Red line), it was found that the highest hardness value was at point 3, the heat effected zone is 182 HV, and the lowest hardness value was at point 9 is 135 HV. The heat effected zone (HAZ SS304) from test points 2-4 had a slightly higher hardness value than the weld metal (WM) at points 5-6 but had a higher hardness value than the heat effected zone (HAZ Q245) at points

7-9 [5, 7, 9, 13]. The trend of hardness value in each area of all 10 points along line 2 (Green line), it was found that the highest hardness value was at point 3, the heat affected zone is 179 HV, and the lowest hardness value was at point 10 is 130 HV. The heat affected zone (HAZ SS304) from test points 2-4 had a slightly higher hardness value than the weld metal (WM) at points 5-6 but had a higher hardness value than the heat affected zone (HAZ Q245) at points 7-9 [5, 7, 9, 13].

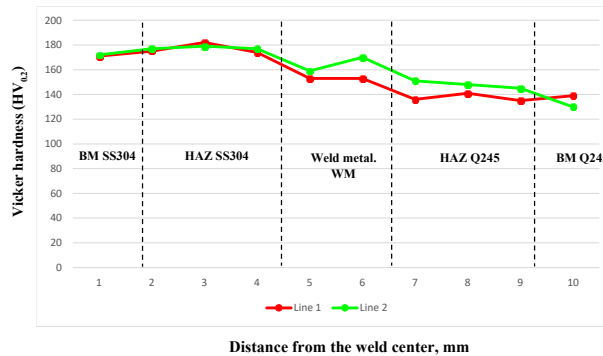


Figure 19 Hardness profile showing hardness of the weld metals and both sides

From the experiment, it was found that the weld metal when heated from welding causes the structure to change into a solid structure, therefore resulting in an increase in the hardness value. And the welding process in the heat effect zone next to the base metal area will have a harder value than the weld metal but will be higher than the base metal and will give the same results for both test point compression lines.

3.4 Thermal analysis

The temperature measurements taken while welding sheet metal pieces with an infrared thermometer measuring device were at follows position T_1 reached 327 °C, position T_2 recorded 280 °C, position T_3 measured 170 °C, and position T_4 showed 138 °C. Figure 20 illustrates the results of the thermal simulation, depicting the temperature distribution on the plate from the numerical simulation performed 3 times. Temperature at position T_1 , located at the weld centerline center line, reached a peak of 309.63 °C. Uneven cooling due to convection and radiation caused a rapid decrease in temperature after the heat source moved past the location. For the subsequent positions, position T_2 showed 274.04 °C, position T_3 showed 167.28 °C, and position T_4 showed 131.69 °C. The heat generated during welding was transferred to the lower-temperature regions of the plate by conduction, while heat was dissipated into the environment through radiation and convection [11, 12]. When comparing the results of infrared thermometer measurements and numerical simulations gives temperature values that are not significantly different at 5% difference, which is an acceptable value. Meanwhile, the results also show that the heat distribution characteristics of the temperature are similar to the research of Abdulrahaman Shuaibu Ahmad et al [11, 12].

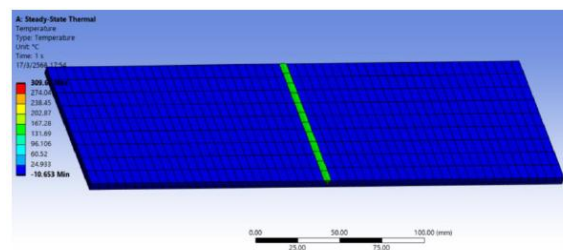


Figure 20 Temperature distribution obtained from numerical simulations

4. Conclusion

The main results for dissimilar welding between SS304 and Q245 steel using GTAW can be summarized as follows.

The microstructure in the weld metal zone consists of dendrite ferrite and austenite matrix. In addition, the results of the chemical composition examination using EDS technique found that many elements are components of the filler metal with chromium as the highest at 21.59%, followed by nickel at 10.17% in this weld metal zone.

The tensile test results showed that the stress-strain curves of the welded specimens were close to each other due to the fracture of the specimens resulting from the tensile test. However, all fractures were found to occur in the Q245 base metal, especially in the HAZ hot affected zone.

The hardness test found that the highest hardness value was in the heat affected zone (HAZ SS304) is 182 HV and the lowest hardness value was in heat affected zone (HAZ SS304). When the weld metal zone receives heat from welding, it changes its structure into a solid structure, which results in an increase in hardness value. In the welding process, the heat affected zone adjacent to the base metal will have a higher hardness value than the weld metal zone but higher than the base metal.

The accuracy of the temperature field with an infrared thermometer and numerical simulations gives temperature values that are not significantly different at 5% difference. This is due to the uneven cooling effect due to convection and radiation, resulting in a rapid decrease in the maximum temperature when the heat source passes through a certain location at a constant speed at the accumulated heat is transferred to the low temperature region of the plate by conduction and lost to the surrounding environment by radiation and convection.

The GTAW welding uses less energy than SMAW welding due to the lower heat consumption, but produces higher quality and cleaner results. Environmentally, GTAW welding has a lower impact than SMAW welding, particularly in terms of smoke and slag generation, making it more environmentally friendly.

5. References

- [1] N. Jahanzeb, J.H. Shin, J. Singh, Y.U. Heo, S.H. Choi. (2017). Effect of microstructure on the hardness heterogeneity of dissimilar metal joints between 316L stainless steel and SS400 steel. *Materials Science and Engineering*, A007, 338-350.
- [2] VJ Varghese, MR Suresh and DS Kumar. (2013). Recent developments in modeling of heat transfer during TIG welding- a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64, 749-754.
- [3] Difference Box. (November 20, 2025). Difference Between SMAW and TIG Welding Processes. [Online], From: <https://www.differencebox.com/engineering/difference-between-smaw-and-tig-welding-processes/>
- [4] H. Vashishtha, RV. Taiwade, S. Sharma, A.P. Patil. (2017). Effect of welding processes on microstructural and mechanical properties of dissimilar weldments between conventional austenitic and high nitrogen austenitic stainless steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 49-59.
- [5] C. Li, G. Qina, Y. Tang, B. Zhanga, S. Lina, P. Gengb. (2020). Microstructures and mechanical properties of stainless-steel clad plate joint with diverse filler metals. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 2522-2534.
- [6] M. Ghafouria, J. Ahnb, J. Mourujärvic, T. Björka, J. Larkiolac. (2020). Finite element simulation of welding distortions in ultra-high strength steel S960 MC including comprehensive thermal and solid-state phase transformation models. *Engineering Structures*, 219, 110804.
- [7] I.R Ibrahim, M. Khedr, T.S. Mahmoud, H.A. Abdel-Aleem, A. Hamada. (2021). Study on the Mechanical

Performance of Dissimilar Butt Joints between Low Ni Medium-Mn and Ni-Cr Austenitic Stainless Steels Processed by Gas Tungsten Arc Welding. *Metals*, 11, 1439.

[8] C-H Huang, C-H Hou, T-S Hsieh, L. Tsai, C-C Chiang. (2022). Investigation of distinct welding parameters on mechanical and corrosion properties of dissimilar welded joints between stainless steel and low carbon steel. *Science Progress*, 105, 1-8.

[9] M. Khedr, I. R Ibrahim, M. Jaskari, M Ali, H. A. Abdel-Aleem, T.S. Mahmoud, A. Hamada. (2023). Microstructural Evolution and Mechanical Performance of Two Joints of Medium-Mn Stainless Steel with Low- and High-Alloyed Steels. *Materials*, 16, 1624.

[10] J.Luijan, P. Surin, K. Eidhed. (2023). Investigation of ER308L and ER309L filler wires on dissimilar metals between carbon steel and 3CR12 ferritic stainless steel by GTAW through boiler fabrication in a sugar factory. *Materials Research Express*, 10, 1-4.

[11] Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong and Lin Nie Abdulrahman Shuaibu Ahmad, Yunxin Wu, Hai Gong and Lin Nie. (2019). Finite Element Prediction of Residual Stress and Deformation Induced by Double-Pass TIG Welding of Al 2219 Plate. *Materials*, 12, 2251.

[12] S. Nuchim, P. Bunyawanchakul, N. Angsuseranee, V. Boonmag. (2025). Residual Stress and Distortion Analysis for TMCP Steel Grade EH36 Butt Welding Parts in GTAW- SMAW Hybrid Welding Process using Finite Element Method. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15, 20077-20084.

[13] S. Baskutis, J. Baskutiene, R. Bendikiene, A. Ciuplys and K. Dutkus. (2021). Comparative Research of Microstructure and Mechanical Properties of Stainless and Structural Steel Dissimilar Welds. *Materials*, 14, 6180.

Virtual Simulation Program to Enhance Learning of Bomb Calorimeter Operation for Engineering Education

Poorisa Sangbunluerit¹ Ratchadaporn Kingkaew¹ Kritsakon Aongkanon^{2*} Nutthapon Wongyao²

¹ *Industrial Education Program in Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi*

² *Department of Mechanical Education, Faculty of Industrial Education and Technology*

* *Corresponding author E-mail: chukrit.aong@kmutt.ac.th*

Received: October 22, 2025

Revise: November 8, 2025

Accepted: December 12, 2025

Abstract

This study aimed to develop and evaluate a virtual simulation-based learning program for bomb calorimeter operation to enhance practical learning in thermal technology courses. The program was developed using Unity and Vuforia platforms, based on the ADDIE instructional design model and grounded in Constructivist Learning Theory and Multimedia Learning Theory. The participants were 18 fourth-year students majoring in Mechanical Technology Education. Research instruments included the virtual simulation program, an expert evaluation form, and a user satisfaction questionnaire. The expert evaluation indicated that the developed program achieved a very good level of quality, with mean scores of $\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50 for content quality and $\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.40 for media design. User satisfaction was rated high ($\bar{X} = 4.20$, S.D. = 0.00). A paired-sample t-test revealed a statistically significant improvement in post-test scores compared to pre-test scores ($p < 0.05$), confirming that the virtual simulation effectively enhanced students' conceptual understanding of energy analysis and combustion processes. In conclusion, the developed virtual simulation serves as a high-quality instructional tool that reduces the limitations of real laboratory practice in terms of safety, time, and cost. It also supports flexible, self-directed learning and can be applied to thermal energy-related courses. Future developments may include integrating interactive quizzes or augmented reality (AR) features to further enrich engagement and the overall learning experience.

Keywords: Virtual Simulation, Bomb Calorimeter, thermal technology, Multimedia Learning, User Satisfaction

1. Introduction

Practical laboratory-based learning plays a crucial role in engineering and technical education by enabling students to apply theoretical knowledge to real-world scenarios [1, 2]. However, many educational institutions face limitations in delivering hands-on experiences due to resource constraints, equipment maintenance, and safety concerns [3]. The COVID-19 pandemic further highlighted these challenges, necessitating alternative approaches to laboratory education [4]. Recent advancements in digital technologies have enabled the development of virtual laboratories, simulation-based tools, and augmented reality (AR) environments that replicate physical lab experiences [5, 6]. These virtual tools are increasingly adopted in science, engineering, and energy education, offering flexibility, cost-efficiency, and enhanced learning engagement [7, 8].

A recent meta-analysis by Li and Li (2024) [9] confirmed that virtual laboratories significantly improve conceptual understanding and student engagement in engineering education (Hedges' $g = 0.686$, 95% CI 0.414–0.959). Similarly, Makransky and Mayer (2022) [6] demonstrated that immersive virtual reality environments,

grounded in Multimedia Learning Theory, increase learner retention and motivation through visual and interactive stimuli.

In Thailand, virtual laboratory models have been applied successfully in engineering education [10]. In energy-related subjects such as calorimetry, students must understand thermodynamic principles and experiment with devices such as the bomb calorimeter [11]. However, the high cost, operational risks, and limited availability of this equipment create barriers to consistent student access. To address these limitations, this study proposes the development of a virtual simulation program using Unity and Vuforia platforms to support the learning of bomb calorimeter operation.

To address these limitations, this study developed a virtual simulation program for learning bomb calorimeter operation using the Unity and Vuforia platforms. The program was designed to create a safe, realistic, and interactive learning environment. It follows the ADDIE instructional design model grounded in Constructivist Learning Theory and Multimedia Learning Theory, emphasizing learner engagement, visualization, and conceptual understanding in energy and thermal engineering education.

2. Objectives

1. To design and develop a virtual simulation-based learning program for bomb calorimeter operation
2. To evaluate the content and media quality of the developed program through expert review.
3. To assess student satisfaction with the virtual simulation program.
4. To compare learning achievement before and after using the program.

3. Research Methodology

3.1 The development process followed the ADDIE model:

- Analysis: Identified key concepts in bomb calorimeter operation, following standardized procedures for heat of combustion testing [12] Learners' needs and difficulties were analyzed to ensure relevant and accurate content.
- Design: Created flowcharts and interface structure according to Constructivist Learning Theory and Mayer's Multimedia Learning Principles, integrating text, animation, and interactive 3D models.
- Development: Used Unity [13] and Vuforia [14] for simulation creation, ensuring accurate energy calculation and realistic visualization based on ASTM D4809-20 standards.
- Implementation: Introduced the program to 18 students in the Mechanical Technology Education program
- Evaluation: Used expert reviews and Likert-scale surveys to assess content quality, usability, and learner satisfaction.

3.2 Instruments:

- Virtual program : Developed 3D-based simulation of bomb calorimeter operation.
- Expert evaluation forms : Three experts—two in thermal engineering and one in educational technology—assessed content and media quality ($IOC \geq 0.50$).
- Satisfaction questionnaire : Measured students' engagement, usability, and overall satisfaction (Cronbach's Alpha ≥ 0.70).

3.3 Sample:

18 fourth-year students, Mechanical Technology Education, selected by purposive sampling.

3.4 Statistical Analysis:

Mean (\bar{X}), Standard Deviation (S.D.) were used for descriptive analysis, and a paired-sample t-test was applied to compare students' learning achievement before and after using the program.

3.5 Conceptual and Theoretical Framework

The development of the virtual simulation program was grounded in three interconnected frameworks: Constructivist Learning Theory, Cognitive Theory of Multimedia Learning, and the ADDIE instructional design model.

First, the constructivist approach guided the overall learning philosophy, emphasizing that learners build knowledge through active participation, experimentation, and reflection. This principle supports the use of hands-on, interactive simulation where students can observe, test, and conceptualize the combustion process within a virtual environment.

Second, Mayer's Cognitive Theory of Multimedia Learning provided the foundation for the media design. According to this theory, learners achieve better understanding when information is presented through both verbal and visual channels. Therefore, the program integrates 3D animations, graphical interfaces, and descriptive text to enhance cognitive engagement and retention.

Finally, the ADDIE model served as a structured framework for instructional design. Each phase—Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation—was systematically aligned with the constructivist and multimedia learning principles to ensure that the simulation supported learner-centered interaction and effective conceptual understanding in energy and thermal engineering education.

4. Results and Discussion

The evaluation results of the virtual simulation program for bomb calorimeter usage are summarized in three key aspects: content quality, media design, and user satisfaction.

1. Content Quality: Experts assessed the content for accuracy, relevance, and alignment with course objectives. The program received a mean score of $\bar{X} = 4.50$ with S.D. = 0.50, indicating high quality.

2. Media Design: The design elements including graphics, interactivity, and layout were rated by media specialists. The program received $\bar{X} = 4.50$ with S.D. = 0.40, showing excellent visual design and usability.

3. User Satisfaction: A survey was conducted among 18 fourth-year students using a 5-point Likert scale. The mean score was $\bar{X} = 4.20$ with no deviation (S.D. = 0.00), reflecting a unanimous positive experience.

Users highlighted the program's clarity, ease of use, and usefulness in supplementing real-world lab limitations. It served as an effective self-learning tool outside classroom hours. The results are shown in Table 1.

Table 1 Summary of Evaluation Results

Evaluation Aspect	Mean (\bar{X})	S.D.
Content Quality	4.50	0.50
Media Design	4.50	0.40
User Satisfaction	4.20	0.00

4.1 Comparison with Traditional Teaching Methods

The following table compares the virtual simulation-based approach with conventional bomb calorimeter instruction methods, based on instructional design strategies observed in engineering education [10], as shown in Table 2

Table 2 Comparison with Traditional Teaching Methods

Aspect	Traditional Instruction	Virtual Simulation
Accessibility	Requires physical access to equipment, limited availability	Available anytime, anywhere digitally
Learning Style	Teacher-centered, limited interaction	Learner-centered, interactive experience
Risk & Safety	Risk of handling hazardous substances	Risk-free digital environment
Cost	High maintenance and operational cost	Low recurring cost after development
Visualization	2D textbook or live demo	3D animated interaction and immersion

4.2 Statistical Analysis

To analyze the effectiveness of the virtual simulation program, a paired-sample t-test was conducted comparing pre-test and post-test scores of the 18 participating students. The results indicated a statistically significant improvement in post-test scores ($p < 0.05$), demonstrating that the virtual program effectively enhanced students' conceptual understanding of bomb calorimeter operation. Statistical analyses were performed using Jamovi (Version 2.6) and R (Version 4.4) statistical software packages [15, 16].

Table 3 Comparison of Pre- and Post-Test Scores (n = 18)

Group	n	Mean	S.D.	df	t-test	Sig(1-tailed)
Pre-test	18	7.00	3.09	17	8.599*	<.001
Post-test	18	13.33	1.08			

* $p < 0.05$ indicates a statistically significant difference at the 0.05 level.

The mean post-test score ($\bar{X} = 13.33$, S.D. = 1.08) was considerably higher than the pre-test score ($\bar{X} = 7.00$, S.D. = 3.09). The paired-sample t-test result ($t = 8.599$, $p < 0.01$) confirms a significant improvement in learning achievement. This demonstrates that the virtual simulation program effectively enhanced students' conceptual understanding through interactive, hands-on learning activities.

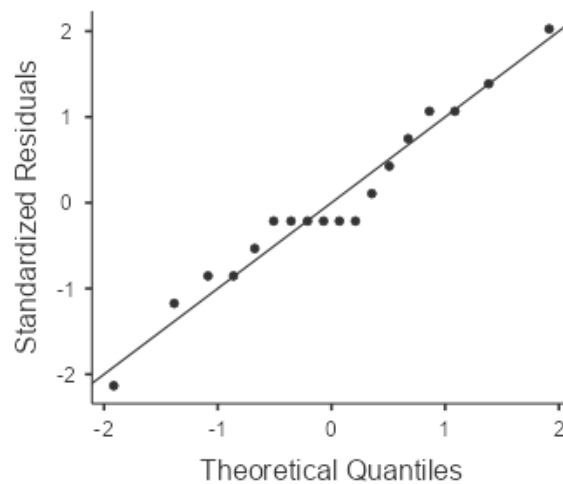


Figure 1. Q–Q Plot of Standardized Residuals for Pre- and Post-Test Scores

The data points are distributed close to the diagonal reference line, indicating that the residuals follow a normal distribution. This satisfies the assumption of normality required for the paired-sample t-test and supports the validity of the statistical results.

4.3 Supporting Diagrams and Screenshots

The actual bomb calorimeter device used in traditional lab instruction is shown in Figure 1 shows the actual bomb calorimeter used in traditional instruction, while Figure 2 outlines the learning sequence designed using the ADDIE model. To support visual planning, Figure 3 illustrates the graphic layout and component design process conducted using Adobe Illustrator, which served as the foundation for the user interface and instructional visuals. Figure 4 presents the simulation interface created using Unity, and Figure 5 shows the coding stage conducted in Visual Studio.



Figure 2. Bomb Calorimeter used in laboratory instruction.

The bomb calorimeter used in conventional laboratory instruction for measuring the heat of combustion in solid and liquid fuels. The device includes a combustion chamber, oxygen supply, and water jacket for capturing released thermal energy. It plays a key role in teaching fundamental thermodynamic concepts and energy analysis. However, due to its high operational cost and safety concerns, access is often limited. This image was taken from the actual laboratory setup used in the Mechanical Technology Education program.

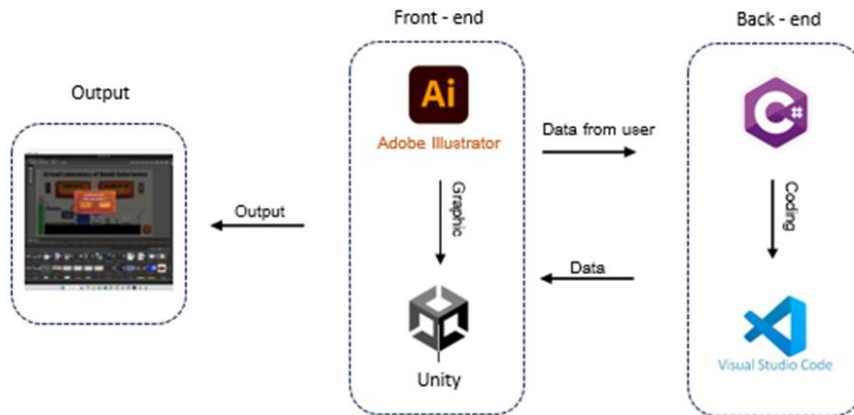


Figure 3. Flowchart of the simulation learning system based on ADDIE model.

Flowchart of the simulation-based learning system developed following the ADDIE instructional design model. The diagram outlines five phases: Analysis, Design, Development, Implementation, and Evaluation. Each phase guided the development process to ensure systematic and pedagogically sound outcomes. The flow begins with concept identification and ends with student feedback assessment. This structure served as the instructional backbone of the simulation program.

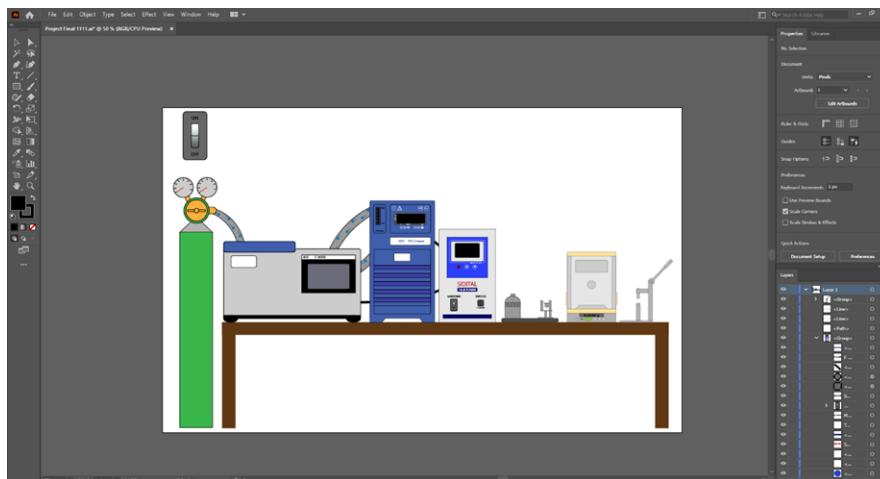


Figure 4. illustrates the graphic layout and component design process conducted using Adobe Illustrator, aligning with virtual lab design principles applied in prior engineering education studies [10].

Graphic layout and component design of the simulation interface created using Adobe Illustrator. The design includes visual elements such as buttons, labels, thermodynamic icons, and control panels for user

interaction. These components were aligned with virtual lab design principles to promote clarity and engagement. The layout helped translate abstract theoretical content into accessible visuals. This visual framework formed the foundation of the Unity-based simulation interface.



Figure 5. User interface of the virtual simulation developed using Unity.

User interface of the bomb calorimeter virtual simulation developed using the Unity platform. The interface allows students to simulate experimental steps, adjust variables, and observe thermal reactions in a 3D environment. The simulation mimics real-world bomb calorimeter operations while eliminating risks. Interactive features promote hands-on learning outside of traditional lab constraints. The design enhances engagement and reinforces conceptual understanding.

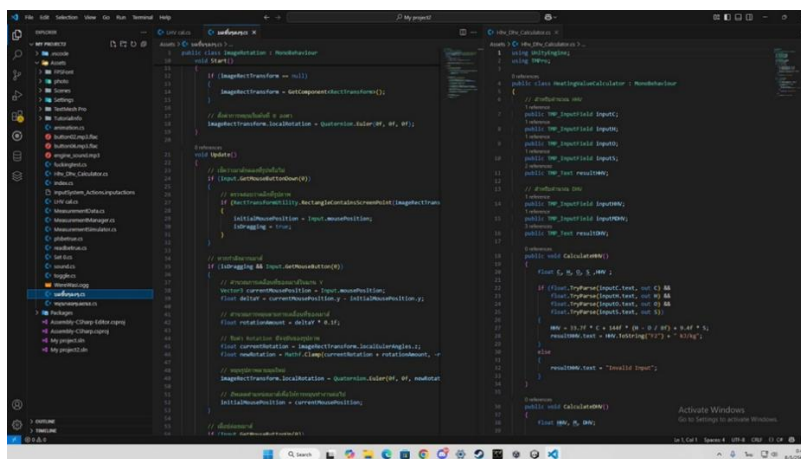


Figure 6. Programming and system integration using Visual Studio during the development of simulation features.

Programming and system integration implemented using Visual Studio during the development of simulation features. C# scripts were developed to control interactivity, process calculations, and manage user

inputs. The coding environment enabled logic-based simulation behaviors including fuel selection, temperature response, and result visualization. Integration with Unity ensured seamless execution of user interactions. This phase translated the visual design into a fully functional learning tool.

5. Conclusion

This study successfully developed and evaluated a virtual simulation program for bomb calorimeter learning using Unity and Vuforia platforms. The findings confirmed the program's effectiveness in enhancing students' conceptual understanding, engagement, and satisfaction. The integration of Constructivist Learning Theory, Mayer's Multimedia Learning Theory, and the ADDIE model ensured pedagogical soundness and technological quality throughout the design process. The developed simulation serves as a scalable and sustainable solution for laboratory-based instruction in energy and technical education, addressing common limitations such as safety risks and limited accessibility. Future research should explore the inclusion of augmented reality (AR) features, embedded assessments, and multilingual options to expand usability and learning personalization.

6. Acknowledgements

The authors would like to express their sincere appreciation to all experts and student participants for their valuable feedback, constructive suggestions, and active engagement throughout the study. Their contributions greatly enhanced the quality and validity of this research.

References

- [1] Kolb, D. A., *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984.
- [2] Prince, M., "Does active learning work? A review of the research," *Journal of Engineering Education*, vol. 93, no. 3, pp. 223–231, 2004.
- [3] Ma, J., and Nickerson, J. V., "Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review," *ACM Computing Surveys*, vol. 38, no. 3, pp. 1–24, 2006.
- [4] Hodges, C., Moore, S., Lockee, B., Trust, T., and Bond, A., "The difference between emergency remote teaching and online learning," *EDUCAUSE Review*, Mar. 27, 2020. [Online]. Available: <https://er.educause.edu/articles/2020/3/the-difference-between-emergency-remote-teaching-and-online-learning>
- [5] De Jong, T., Linn, M. C., and Zacharia, Z. C., "Physical and virtual laboratories in science and engineering education," *Science*, vol. 340, no. 6130, pp. 305–308, 2013.
- [6] Makransky, G., and Mayer, R. E., "Benefits of taking a virtual reality science lab course: A research review," *Applied Cognitive Psychology*, vol. 36, no. 2, pp. 314–327, 2022.
- [7] Kapp, K. M., *The Gamification of Learning and Instruction: Game-Based Methods and Strategies for Training and Education*. San Francisco, CA: Pfeiffer, 2012.
- [8] Wang, T., Liu, Y., Gallagher, M., Ma, Y., and Liu, Y., "The design and implementation of a virtual laboratory platform for energy engineering education," *International Journal of Education and Development using ICT*, vol. 17, no. 1, pp. 78–95, 2021.

- [9] Li, H., and Li, Z., "A meta-analysis of the effectiveness of virtual laboratories in engineering education," *Computers & Education*, vol. 207, 104924, 2024.
- [10] Wongsawat, P., Kittipiyakun, P., and Chokchai, T., "Design of virtual lab in engineering education," *Journal of Technical Education*, vol. 5, pp. 25–33, 2022.
- [11] Punyasompun, S., "Thermal analysis using bomb calorimeter," in *Proceedings of the KMUTT Engineering Conference*, 2021, pp. 45–49.
- [12] ASTM International, *Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (ASTM D4809-20)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.
- [13] Unity Technologies, "Unity Real-Time Development Platform 2023," Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://unity.com>
- [14] Vuforia Developer Portal, "Augmented Reality SDK 2023," Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://developer.vuforia.com>
- [15] The jamovi project, *jamovi* (Version 2.6) [Computer Software], 2024. [Online]. Available: <https://www.jamovi.org>
- [16] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (Version 4.4) [Computer Software], 2024. [Online]. Available: <https://cran.r-project.org>

การศึกษาวิเคราะห์การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่ยั่งยืน : กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

AN ANALYTICAL STUDY ON THE PRODUCT CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE PRODUCTION TECHNOLOGIES: A CASE STUDY OF CONCENTRATED CAR WASH PRODUCTS IN A CHEMICAL MANUFACTURING INDUSTRY IN SAMUT PRAKAN PROVINCE

อิงค์ณภัศ กรศิริชัยวณิช¹ กวินเวทย์ พิพิธานันยธร^{1*} วันเพ็ญ วิโรจน์เจริญวงศ์²

Ingnaphat Kornsirichaiwat¹ Kawinwet Pipitthanathunyathorn^{1*} Wanphen Wirojcharoenwong²

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

²นักวิจัยอิสระ

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

Received: November 5, 2025

Revise: December 23, 2025

Accepted: December 26, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์แหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น และนำเสนอแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยประยุกต์ใช้แนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบจนถึงการจัดการซากผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Grave) ภายใต้ระบบธุรกิจกับผู้บริโภค (Business to Consumer: B2C) ผลการศึกษาพบว่า ขั้นตอนการใช้งานของผลิตภัณฑ์เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 81.40 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ คิดเป็นร้อยละ 15.75 การจัดการซากร้อยละ 1.23 การกระจายสินค้าร้อยละ 1.08 และการผลิตร้อยละ 0.53 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์สะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบผลิตภัณฑ์และรูปแบบการใช้งานของผู้บริโภคเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการศึกษานี้ประกอบด้วย การเลือกใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่สามารถรีไซเคิลหรือย่อยสลายได้ การจัดหาวัตถุดิบที่มีการปล่อยคาร์บอนต่ำ การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการใช้พลังงานหมุนเวียนและแนวคิด Lean Manufacturing การเพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ ตลอดจนการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ประหยัดพลังงานและน้ำควบคู่กับการส่งเสริมโครงการ Reuse/Refill และการจัดการซากตามหลัก 3Rs โดยสรุป ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการแนวคิด LCA เข้ากับการออกแบบผลิตภัณฑ์ การจัดการพลังงาน และการบริหารห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน สามารถลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์สำหรับการจัดการคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ของประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนด้านการผลิตและการบริโภคอย่างยั่งยืน (SDG 12) และการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13) รวมถึงแนวทางการมุ่งสู่สังคมคาร์บอนต่ำ ภายใต้กรอบ Net Zero และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ การประเมินวัฏจักรชีวิต ผลิตภัณฑ์ล้างรถ

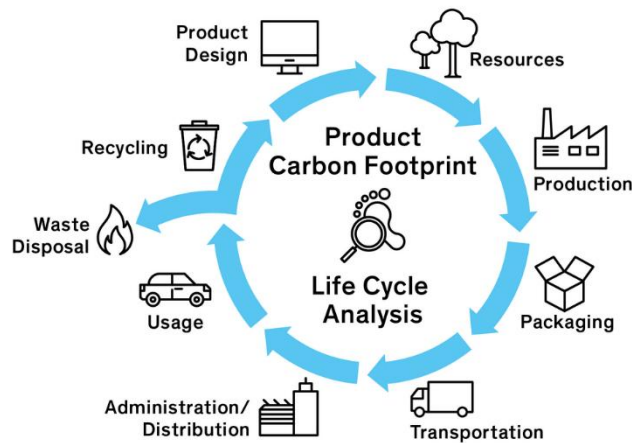
ABSTRACT

This study aims to evaluate the primary sources of greenhouse gas (GHG) emissions from concentrated car wash products manufactured by Standard Manufacturing Co., Ltd., and to propose appropriate, sustainable strategies for reducing these emissions. The assessment employs a cradle-to-grave Life Cycle Assessment (LCA) framework within a Business-to-Consumer (B2C) system, providing foundational data for analyzing and mitigating GHG emissions across the entire supply chain. The process is divided into five key stages: raw material acquisition, production, product distribution, consumer use, and end-of-life waste management. Results indicate that the consumer use stage contributes the highest GHG emissions at 81.4% of the total, followed by raw material acquisition (15.75%), waste management (1.23%), distribution (1.08%), and production (0.53%). Reduction strategies encompass all life cycle phases: adopting recycled or biodegradable packaging materials; prioritizing domestic raw materials and environmentally certified suppliers; enhancing production efficiency through high-efficiency motors, renewable energy systems, and Lean Manufacturing principles; optimizing logistics via route planning, consolidated delivery schedules, and clean-energy vehicles; designing energy- and water-efficient products, promoting Reuse/Refill programs, and providing sustainable usage guidelines; implementing the 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) for waste management, developing packaging return initiatives, and partnering with certified waste disposal facilities. Additionally, corporate carbon management plans, employee and supplier training, and regular Carbon Footprint of Product (CFP)/Carbon Footprint Organization (CFO) reporting foster continuous improvement aligned with Net Zero goals. The integration of LCA and targeted GHG reduction measures across the supply chain is essential for enhancing product sustainability and effectively minimizing environmental impacts.

Keywords: Product Carbon Footprint, Life Cycle Assessment, Concentrated Car Wash Products

1. บทนำ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตนับเป็นแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ที่มีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ ซึ่งมีลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้า วัตถุดิบจากปิโตรเคมี และบรรจุภัณฑ์พลาสติกในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง งานวิจัยด้านการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ซึ่งให้เห็นว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มนี้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงขั้นตอนการผลิต แต่เกิดขึ้นตลอดวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบ การผลิต การกระจายสินค้า การใช้งาน ไปจนถึงการจัดการซากผลิตภัณฑ์ [1], [2] ภายใต้บริบทดังกล่าวการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of Products: CFP) จึงได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในฐานะเครื่องมือเชิงปริมาณที่ใช้วัดและวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Cradle-to-Grave) ตามกรอบการประเมิน LCA ภายใต้มาตรฐานสากล เช่น ISO 14067 และ GHG Protocol ซึ่งช่วยให้องค์กรสามารถระบุแหล่งหรือขั้นตอนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูง (carbon hotspots) และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบมาตรการลดการปล่อยที่มีประสิทธิภาพและสามารถตรวจสอบได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นการประเมิน CFP ในระดับผลิตภัณฑ์ทั่วไปหรือในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขณะที่การศึกษาการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ทำความเข้าใจในระดับโรงงานผลิต โดยเฉพาะในบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ยังมีอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้แนวโน้มอุตสาหกรรมและความสำคัญของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) ในยุคที่ความยั่งยืนกลายเป็นหัวใจหลักของธุรกิจ [3]



รูปที่ 1 การประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) [4]

โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยังขาดงานวิจัยที่วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกระหว่างขั้นตอนหลักของวัฏจักรชีวิต ได้แก่ ขั้นตอนการผลิต การกระจายสินค้า และการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรูปแบบการใช้พลังงานและทรัพยากรที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ช่องว่างดังกล่าวทำให้การกำหนดมาตรการลดคาร์บอนในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดยังขาดความแม่นยำและไม่สอดคล้องกับสภาพการดำเนินงานจริงของโรงงานผลิต งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวผ่านการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในระดับโรงงานผลิต

อุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการซึ่งเป็นผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นสำหรับทั้งภาคอุตสาหกรรมและผู้บริโภคทั่วไป ถูกเลือกเป็นกรณีศึกษาเพื่อสะท้อนความท้าทายที่ผู้ประกอบการ SMEs เผชิญในการบริหารจัดการผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในปี พ.ศ. 2567 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นมีระดับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂-eq) สูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรม โดยแหล่งปล่อยที่สำคัญมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผสมและบรรจุ รวมถึงการผลิตบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิด HDPE ในปริมาณมาก ขณะเดียวกัน บริษัทฯ ยังขาดระบบติดตามและบริหารจัดการพลังงานและคาร์บอนอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ไม่สามารถระบุจุดที่เกิดการสูญเสียพลังงานและกำหนดมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพจากบริบทดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ในระดับโรงงานผลิต พร้อมทั้งวิเคราะห์แหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรชีวิต เพื่อนำไปสู่การเสนอแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เหมาะสมกับบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในประเทศไทย

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังมีส่วนสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) โดยเฉพาะ SDG 12 การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน ผ่านการส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการออกแบบกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ผ่านการพัฒนาแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคอุตสาหกรรม ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพัฒนาแนวทางลดการปล่อยคาร์บอนในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์และเป็นต้นแบบการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในระดับ SMEs ของประเทศไทย ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างศักยภาพการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการขับเคลื่อนสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในระยะยาว

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินแหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

2. เพื่อเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการลดและบริหารจัดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอย่างยั่งยืน กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

3. ขอบเขตของการวิจัย

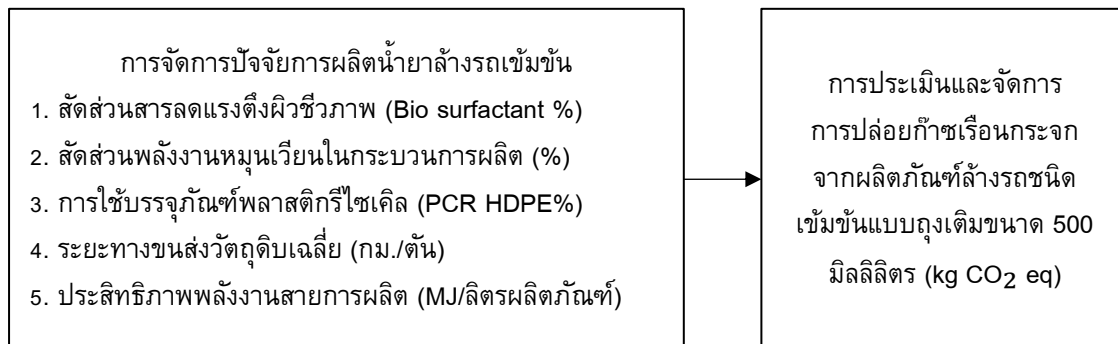
แนวทางการลดอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ ผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ มีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

ขอบเขตด้านเนื้อหาที่ใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย 1) แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก 2) แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment - LCA) 3) แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol) 4) มาตรฐานการวัดปริมาณและการรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ผลิตภัณฑ์ ISO - 14067

ขอบเขตด้านประชากร ประชากรสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร เท่านั้น

ขอบเขตด้านพื้นที่การวิจัยครั้งนี้ เน้นศึกษาขอบเขตด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษากรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ เท่านั้น โดยดำเนินการศึกษาวิจัยตั้งแต่ มกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2567

4. กรอบแนวคิดที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

5. ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย

1. สามารถประเมินแหล่งที่มาหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

2. สามารถนำเสนอแนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

3. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์ด้านสิ่งแวดล้อม กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

6. การทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นการเปลี่ยนแปลงระยะยาวของอุณหภูมิ ปริมาณฝน และรูปแบบภูมิอากาศอื่น ๆ ซึ่งส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า และการผลิตภาคอุตสาหกรรมที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases: GHGs) ออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming) และความไม่สมดุลระบบนิเวศในระดับโลก จากรายงานคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [5]

ก๊าซเรือนกระจก (GHGs) [6] คือก๊าซในบรรยากาศที่ดูดซับและแผ่รังสีความร้อนกลับสู่พื้นโลก ส่งผลให้เกิด "ปรากฏการณ์เรือนกระจก" ซึ่งช่วยรักษาอุณหภูมิโลกให้อยู่ในระดับเหมาะสมต่อการดำรงชีวิต อย่างไรก็ตาม การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า และกิจกรรมอุตสาหกรรมหลังยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมได้เพิ่มปริมาณก๊าซเหล่านี้อย่างรวดเร็ว ทำให้สมดุลพลังงานของโลกถูกรบกวนและนำไปสู่ภาวะโลกร้อนปัจจุบัน UNFCCC และ IPCC (2023) กำหนดให้ติดตามก๊าซหลัก 7 ชนิด ได้แก่ CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ และ NF₃ ซึ่งแต่ละชนิดมีศักยภาพในการกักเก็บความร้อนต่างกัน ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลก แม้อิอน้ำ (H₂O) จะเป็นก๊าซเรือนกระจกตามธรรมชาติที่มีผลมากที่สุด แต่ไม่อยู่ในขอบควบคุมเนื่องจากสามารถปรับสมดุลตามอุณหภูมิโลก

แนวคิดเกี่ยวกับการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment : LCA)

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิของผลิตภัณฑ์ตลอดวัฏจักรชีวิต (Cradle-To-Grave) หรือบางกรณีจำกัดถึงขั้นตอนผลิต (cradle-to-gate) โดยอิงตามมาตรฐาน ISO14040/44, ISO 14067 และ GHG Protocol กระบวนการเริ่มจากการกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่ (Goal & Scope) ก่อนเก็บข้อมูลปริมาณวัตถุดิบ พลังงาน และการขนส่ง (LCI) เพื่อคำนวณค่าการปล่อยเป็น kgCO₂e ตามค่า GWP₁₀₀ ของ IPCC จากนั้นวิเคราะห์ผลกระทบ (LCIA) เช่น ภาวะโลกร้อน การเป็นกรด และยูโทรฟิเคชัน ก่อนสรุปผลและเสนอแนวทางลดการปล่อย เช่น ใช้วัสดุรีไซเคิล พลังงานหมุนเวียน หรือปรับปรุงกระบวนการผลิตที่สามารถประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงสถานการณ์ (Scenario analysis) LCA แบบไดนามิกและ Consequential LCA เพื่อประเมินผลกระทบในมิตินโยบายและเศรษฐกิจ ช่วยให้องค์กรออกแบบกลยุทธ์สิ่งแวดล้อมได้อย่างยั่งยืนยิ่งขึ้น

แนวคิดเกี่ยวกับมาตรฐานการทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก (GHG Protocol)

แนวคิดของ GHG Protocol เป็นกรอบมาตรฐานสากลในการคำนวณ รายงาน และบริหารการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพัฒนาโดย WRI และ WBCSD เพื่อให้องค์กรสามารถดำเนินการตามข้อกำหนดด้านสภาพภูมิอากาศ เช่น CDP, TCFD และ SBTi ได้อย่างถูกต้อง โปรโตคอลนี้ยึดหลัก 5 ประการ คือ ความเกี่ยวข้อง ความครบถ้วน ความสม่ำเสมอ ความโปร่งใส และความแม่นยำ พร้อมกำหนดขอบเขตการปล่อยเป็น Scope 1, 2 และ 3 ครอบคลุมทั้งองค์กรและห่วงโซ่อุปทาน มาตรฐานสำคัญ ได้แก่ Corporate Standard, Product Life Cycle, Scope 3 Standard, และ Land Sector Guidance รวมถึง Net Zero Standard ที่มุ่งสอดคล้องกับเป้าหมาย 1.5°C โดยรวม GHG Protocol เป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยองค์กรลดการปล่อยคาร์บอนอย่างเป็นระบบ เพิ่มความโปร่งใส และสร้างความเชื่อมั่นต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ท่ามกลางแนวโน้ม Net Zero และ CBAM ในระดับโลก [4]

มาตรฐานการวัดปริมาณและการรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ ISO 14067

มาตรฐาน [6] ISO 14067: 2018 เป็นแนวทางสากลสำหรับการคำนวณและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) โดยอิงหลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ครอบคลุมตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบจนถึงการจัดซอกสินค้า เพื่อให้ข้อมูลโปร่งใส ตรวจสอบได้ และใช้ระบุจุดที่ปล่อยคาร์บอนสูง (hot spots) เช่น บรรจุภัณฑ์หรือกระบวนการขนส่ง องค์ประกอบสำคัญได้แก่การกำหนดขอบเขตระบบ หน่วยการทำงาน เกณฑ์การตัดข้อมูล และคุณภาพข้อมูล พร้อมการทวนสอบโดยบุคคลที่สามเพื่อความน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาหลายงานชี้ว่าการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์สามารถลด CFP ได้กว่าร้อยละ 10 ทั้งนี้ ISO 14067 ยังสนับสนุนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ยั่งยืนและลดต้นทุนโลจิสติกส์ แต่ความท้าทายคือการเก็บ

ข้อมูลครบถ้วนในห่วงโซ่อุปทานและการจัดการความไม่แน่นอนของข้อมูล
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแนวโน้มการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (CFP) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในหลายภาคส่วน ทั้งภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และพลังงาน [4] ประสิทธิภาพของมาตรการกำหนดราคาคาร์บอนต่อเศรษฐกิจมหภาค [6] ซึ่งถึงศักยภาพของเทคโนโลยีจัดการน้ำแบบ AWD ในการลด CH₄ โดยไม่กระทบผลผลิต ขณะที่การสร้างฐานข้อมูล LCI และ CFP มาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมชีวภาพไทย ช่วยยกระดับการขอฉลากคาร์บอนของ TGO ในภาคอุตสาหกรรมเคมีแสดงให้เห็นว่าการปรับสูตรผลิตภัณฑ์ การใช้พลังงานหมุนเวียน และระบบ LCA แบบผสมสามารถลด CFP ได้ร้อยละ 18 - 35 โดยยังคงความคุ้มค่า ส่วนงานต่างประเทศ [7] และ [8] สนับสนุนแนวคิดการใช้วัตถุดิบชีวภาพ บรรจุภัณฑ์ยั่งยืน และสูตรเข้มข้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยรวมงานวิจัยสะท้อนทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีสะอาดและมาตรการเศรษฐศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่สอดคล้องกับเป้าหมาย Net Zero ภาคการผลิตไทย

7. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงประยุกต์ (Applied research) ซึ่งเป็นวิธีการแสวงหาความรู้ เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นตลอดทั้งห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นจนถึงผู้ค้าปลีกในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ซึ่งกำหนดแผนการดำเนินงานของการประเมินวัฏจักรชีวิต ประกอบด้วย

1. การกำหนดเป้าหมายและขอบเขต (Goal and scope definition) งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นกรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยศึกษาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น ขนาด 500 มิลลิลิตร วิเคราะห์และประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบจนถึงการส่งมอบให้กับลูกค้าซึ่งเป็นลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) โดยพิจารณาข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม 2567 รวมทั้งสิ้น 12 เดือน

2. การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ รวบรวมข้อมูลการได้มาซึ่งวัตถุดิบ จนถึง การส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าลักษณะธุรกิจต่อธุรกิจ (Business to Consumer: B2C) ซึ่งประกอบด้วย

1. การได้มาซึ่งวัตถุดิบและการขนส่งวัตถุดิบ เป็นการเก็บข้อมูล ปริมาณการใช้วัตถุดิบ 1 ชิ้น และนำมาคำนวณค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor: EF) ในส่วนของการขนส่งวัตถุดิบมายังโรงงานผลิตจะคำนวณตามระยะทางระหว่างโรงงานผู้ผลิตวัตถุดิบจนถึงโรงงานผลิต โดยในการคำนวณจะคำนวณทั้งขาไปที่มีอัตราการบรรทุกร้อยละ 100 และขากลับ มีอัตราการบรรทุกร้อยละ 0

2. กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้น กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ

3. การบรรจุภัณฑ์ ก่อนการบรรจุภัณฑ์จะต้องทดสอบเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ และบรรจุภัณฑ์ลงกล่องลังกระดาษ เพื่อขนส่งไปยังลูกค้าในที่ต่าง ๆ

4. การขนส่งผลิตภัณฑ์ จะคำนวณจากระยะทางตั้งแต่โรงงานผลิตจนถึงศูนย์กระจายสินค้าลูกค้า ซึ่งในการคำนวณการขนส่งจะคำนวณทั้งขาไปที่มีน้ำหนักในการขนส่งผลิตภัณฑ์และขากลับที่ไม่มีน้ำหนักในการขนส่ง

3. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม (Life cycle impact assessment) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากข้อมูลการใช้ทรัพยากรและการปลดปล่อยของเสียจากสารขาเข้าและขาออกแต่ละกระบวนการจากขั้นตอนการวิเคราะห์บัญชีรายการวัฏจักรชีวิต (Life cycle inventory) การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คำนวณได้จากสมการ [6] ดังนี้

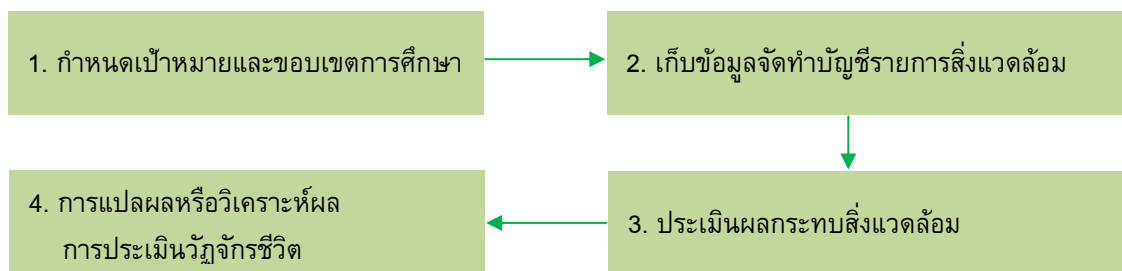
$$\text{Impact score} = \text{Emission factor} \times \text{Inventory value}$$

โดยที่ Impact Score	คือ	ผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น
Emission factor	คือ	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดผลกระทบ
Inventory value	คือ	ปริมาณสารที่ใช้หรือปล่อยออกมา

ทั้งนี้ค่า Emission Factor อ้างอิงแหล่งข้อมูล [4] ดังนี้

- 1) ค่า Emission Factor แบ่งตามประเภทกลุ่มอุตสาหกรรม
- 2) ค่า Emission Factor สำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ขององค์กร
- 3) ข้อกำหนดเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ (Product Category Rules)

4. การแปลผลหรือวิเคราะห์ผลการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life cycle interpretation) การแปลผลเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยในขั้นตอนนี้เป็นการนำผลการศึกษาจากการวิเคราะห์บัญชีรายการสิ่งแวดล้อมและการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นมาสรุปผลการประเมินวัฏจักรชีวิต ทั้งนี้ผลการประเมินวัฏจักรชีวิตต้องสอดคล้องกับเป้าหมายและขอบเขตการศึกษาที่กำหนดไว้ โดยเนื้อหาผลสรุปจะสามารถบ่งชี้ถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และนำไปสู่แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการ เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้วิธีดำเนินการวิจัยตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการประเมินวัฏจักรชีวิต

ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และวิธีการสุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัย ได้แก่ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร ทั้งนี้ผู้ให้ข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ได้แก่ ผู้อำนวยการฝ่ายขายและหัวหน้าฝ่ายขาย ผู้จัดการฝ่ายผลิต และหัวหน้างานฝ่ายผลิต ผู้จัดการแผนกจัดหาวัตถุดิบ หัวหน้าฝ่ายวางแผนการผลิต หัวหน้างานขนส่ง จำนวนทั้งหมด 8 คน คัดเลือกแบบเจาะจง เป็นวิธีการเลือกกลุ่มเป้าหมาย โดยเฉพาะผู้ที่มีความรู้ ความชำนาญ และประสบการณ์ในด้านการผลิต ทั้งนี้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ 1) การวิเคราะห์เอกสาร (Document Analysis) เป็นการตรวจสอบบันทึกการผลิต รายงานการใช้พลังงาน บันทึกการซื้อวัตถุดิบ และรายงานการจัดการของเสียจากบริษัท 2) การประเมินวงจรชีวิต (LCA) 3) การวัดปริมาณตรวจสอบและรายงานการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตาม GHG Protocol Tools และ ISO 14064 และ 4) มิเตอร์วัดการใช้ไฟฟ้า น้ำ หรือเชื้อเพลิงในโรงงาน

วิธีการเก็บข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยตนเอง ทั้งนี้เนื่องจากผู้วิจัยได้ปฏิบัติงานในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษาโดยดำเนินการรวบรวมข้อมูลที่ครอบคลุม ดังนี้ 1) ทำหนังสือจากคณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน มหาวิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอกเพื่อขอความอนุเคราะห์ในการเข้าไปเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 2) นัดหมายวันเวลา เพื่อชี้แจงประสานงานกับเจ้าหน้าที่ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษา 3) จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ โปรแกรม Microsoft Excel จากรูปแบบขององค์กรบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์กรมหาชน) เพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลการผลิต กระบวนการทำงาน

หรือพฤติกรรมของพนักงาน รวมถึงการสังเกต การสัมภาษณ์ (Interview) หรือการบันทึกข้อมูลจากเอกสารภายใน และ 4) จัดเก็บข้อมูลที่เก็บรวบรวม บันทึกในรูปแบบตาราง ฐานข้อมูล หรือบันทึกย่อ เพื่อจัดระเบียบและวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการปกป้องความลับของข้อมูลพนักงานหรือข้อมูลที่เป็นความลับทางการค้าของบริษัท ทั้งนี้การวิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพรรณนา และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมาน เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มและลักษณะทั่วไปของข้อมูลที่รวบรวมได้ ได้แก่ 1) ความถี่ (Frequency) ใช้เพื่อแสดงจำนวนครั้งที่เหตุการณ์หรือปรากฏการณ์เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่ง 2) ร้อยละ (Percentage) ใช้เพื่อแสดงสัดส่วนของคำตอบแต่ละประเภทในรูปของเปอร์เซ็นต์ ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบข้อมูลได้ง่ายและชัดเจนและ 3) ค่าเฉลี่ย (Mean) ใช้เพื่อแสดงค่ากลางของข้อมูล

8. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิตกรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นกรณีศึกษาตลอดทั้งห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ที่แสดงให้เห็นลำดับกระบวนการครบวงจร ตั้งแต่ต้นน้ำ (การได้มาซึ่งวัตถุดิบ) จนถึงปลายน้ำ (การกำจัดของเสีย) ตามรูปที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ผลิตภัณฑ์และเป็นระบบที่สามารถนำไปวิเคราะห์การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของห่วงโซ่อุปทานได้อย่างมีประสิทธิภาพรายละเอียด ดังนี้

1. ขอบเขตของกระบวนการ (System Boundary) โดยกระบวนการทั้งหมดอยู่ภายใต้ระบบ Business to Consumer (B2C) ครอบคลุมตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ (Cradle-to-Grave) ได้แก่ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การผลิตวัตถุดิบ การกระจายสินค้า การใช้งานผลิตภัณฑ์ การจัดการของเสียหลังการใช้งาน

2. รายละเอียดกระบวนการ (Process Description) ประกอบด้วย

2.1 เป็นการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) โดยมุ่งเน้นการจัดหาวัตถุดิบและทรัพยากรที่จำเป็นในการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบหลัก / วัสดุขายผลิต (เช่น ขวดพลาสติก ฉลาก บรรจุภัณฑ์) พลังงานไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ (ขวด, กล่อง) น้ำประปา เชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการผลิตหรือขนส่ง ซึ่งวัตถุดิบทั้งหมดถูกตรวจสอบคุณภาพก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้มั่นใจว่ามีคุณสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด

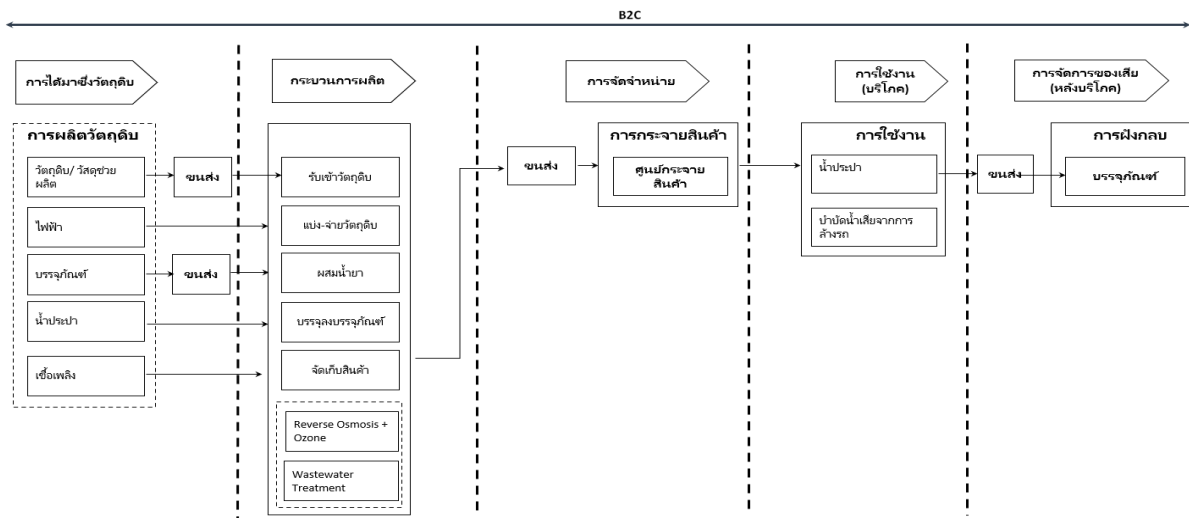
2.2 การผลิตวัตถุดิบ (Production Process) เป็นกระบวนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนย่อย การรับเข้าวัตถุดิบ เป็นการตรวจสอบ ปริมาณและคุณภาพก่อนการผลิต การแบ่ง – จ่ายวัตถุดิบ เป็นการจัดเตรียมและแบ่งส่วนตามสูตรการผลิต การผสมวัตถุดิบ คือผสมตามสัดส่วนที่กำหนด เพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน บรรจุภัณฑ์ เป็น การนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านการตรวจสอบเข้าสู่ภาชนะบรรจุ การจัดเก็บสินค้าในคลัง เป็นการนำเข้าสู่คลังเก็บเพื่อรอการกระจายสินค้า โดยระบบสนับสนุนภายในโรงงานประกอบด้วย Reverse Osmosis + Ozone System สำหรับใช้ในการกรองและฆ่าเชื้อน้ำให้ได้มาตรฐานคุณภาพ Wastewater Treatment System เป็นระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

2.3 การกระจายสินค้า (Distribution Process) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จสมบูรณ์จะถูกส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า (Distribution Center) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมสินค้า จัดเรียงตามคำสั่งซื้อ และจัดเตรียมเพื่อการขนส่ง โดยใช้ยานพาหนะที่เหมาะสมเพื่อลดการปล่อยคาร์บอนจากการขนส่ง

2.4 การใช้งาน (Product Use Phase) เป็นขั้นตอนเมื่อลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการใช้งานจริง เช่น การใช้น้ำประปาในการบริโภคหรือการผลิตต่อเนื่อง การเกิดน้ำเสียจากการใช้งาน ซึ่งจะต้องผ่านการบำบัดก่อนปล่อยคืนสู่ระบบ การใช้งานของลูกค้ามีส่วนสำคัญในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ เพราะเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานและทรัพยากรโดยตรง

2.5 การจัดการของเสีย (Waste Management Process) เป็นขั้นตอนเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์หรือบรรจุภัณฑ์ จะมีการจัดการของเสีย ได้แก่ รวบรวมบรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้ว เพื่อเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลหรือกำจัดอย่างถูกวิธีขนส่งของเสีย ไปยังหน่วยกำจัดหรือศูนย์รีไซเคิลตามหลักสิ่งแวดล้อม ของเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จะเข้าสู่

กระบวนการกำจัดขั้นสุดท้าย เช่น การฝังกลบหรือเผาทำลาย

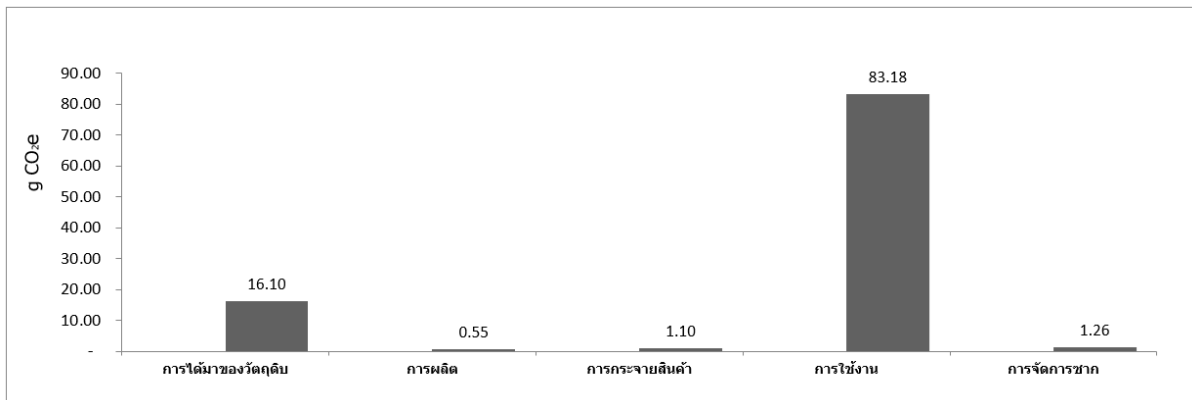


รูปที่ 3 วัฏจักรน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นจนถึงลูกค้า

การวิเคราะห์การประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร ตลอดทั้งห่วงโซ่การผลิต ตั้งแต่การได้มาซึ่งน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นในลักษณะธุรกิจกับลูกค้า (Business to Consumer : B2C) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel จากรูปแบบขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) โดยกระบวนการที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้น มากที่สุดคือ การใช้งาน ปล่อย GHG รวมเท่ากับ 83.1832 gCO₂e รองลงมาคือ การได้มาซึ่งวัตถุดิบ รวมเท่ากับ 16.0961 gCO₂e การจัดการซาก รวมเท่ากับ 1.2576 gCO₂e การกระจายสินค้า รวมเท่ากับ 1.1031 gCO₂e และปล่อย GHG น้อยที่สุดคือ การผลิต รวมเท่ากับ 0.5462 gCO₂e ตามตารางที่ 1 และรูปที่ 4

ตารางที่ 1 สรุปการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้น แบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร

ลำดับ	ช่วงวัฏจักรชีวิต	การปล่อยจากวัตถุดิบ/ พลังงาน (gCO ₂ e)	การปล่อยจากการ ขนส่ง (gCO ₂ e)	ผลรวม (gCO ₂ e)	สัดส่วน (ร้อยละ)
1	การได้มาซึ่งวัตถุดิบ	16.0294	0.0667	16.0961	15.75
2	การผลิต	0.5462	0	0.5462	0.53
3	การกระจายสินค้า	0	1.1031	1.1031	1.08
4	การใช้งาน	83.1832	0	83.1832	81.40
5	การจัดการซาก	1.2488	0.0087	1.2576	1.23
รวม		101.008	1.179	102.186	100



รูปที่ 4 ร้อยละการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้ำยาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติมขนาด 500 มิลลิลิตร

สำหรับแนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG Mitigation Measures) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเทคนิคและสังเคราะห์จากการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญจำนวน 8 คน ครอบคลุมทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Stages) ได้แก่ การได้มาของวัตถุดิบ การผลิต การกระจายสินค้า การใช้งาน และการจัดการซาก โดยรายละเอียดดังนี้

1. การได้มาวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition Phase) แนวทางที่ผู้ให้ข้อมูลเสนอสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง ได้แก่

1.1 ปรับเปลี่ยนวัสดุบรรจุภัณฑ์เป็นชนิดรีไซเคิลได้หรือย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Bio-based/Compostable Packaging)

1.2 ส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศ เพื่อลดการขนส่งระยะไกลและลดคาร์บอนจาก Logistics

1.3 ประสานงานกับซัพพลายเออร์ให้มีมาตรฐานสิ่งแวดล้อม ISO 14001 หรือ Carbon Footprint for Organization (CFO)

1.4 พัฒนา Green Procurement Policy เพื่อกำหนดเกณฑ์เลือกวัตถุดิบที่มีคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่ำ

1.5 สร้างระบบตรวจสอบย้อนกลับ (Traceability) เพื่อควบคุมแหล่งวัตถุดิบที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ

2. การผลิต (Production Phase) แนวทางการลด GHG ที่สามารถดำเนินการได้ในโรงงาน ได้แก่

2.1 ปรับปรุงประสิทธิภาพระบบผสมและบรรจุผลิตภัณฑ์โดยใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง (High-efficiency Motors)

2.2 ใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น ติดตั้งโซลาร์เซลล์ (Solar Rooftop) สำหรับผลิตไฟฟ้าใช้ในกระบวนการผลิต

2.3 ปรับเปลี่ยนระบบ ไฟส่องสว่างและอุปกรณ์ในสายการผลิต เป็นแบบ LED ประหยัดพลังงาน

2.4 นำระบบ Lean Manufacturing / Kaizen / TPM มาใช้เพื่อลดของเสียและลดการใช้พลังงาน

2.5 จัดทำระบบ Monitoring พลังงานแบบเรียลไทม์ (Energy Management System) ควบคุมจุดที่มีการใช้ไฟฟ้าสูงผิดปกติ

3. การกระจายสินค้า (Distribution Phase) แนวทางลดคาร์บอนในห่วงโซ่อุปทานที่ผู้ให้ข้อมูลเสนอ

3.1 วางแผนเส้นทางการขนส่งด้วยระบบ Route Optimization เพื่อประหยัดเชื้อเพลิง

3.2 รวมรอบการขนส่ง (Shipment Consolidation) เพื่อเพิ่มอัตราบรรทุกสินค้าในแต่ละเที่ยว

3.3 ส่งเสริมการใช้รถขนส่งพลังงานไฟฟ้า (EV Truck) หรือรถที่ใช้เชื้อเพลิงสะอาด เช่น B20

3.4 บำรุงรักษาการขนส่งอย่างสม่ำเสมอ เช่น ตรวจสอบยาง น้ำมันเครื่อง ให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.5 ลดการใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ชั่วคราว เช่น พาเลทหรือฟิล์มห่อ ด้วยการใช้ระบบคืนบรรจุภัณฑ์ (Returnable

Packaging System)

4. การใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Use Phase) เป็นช่วงที่มีการปล่อย GHG สูงสุดจึงควรเน้นมาตรการ ดังนี้
 - 4.1 ออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ ประหยัดพลังงานและทรัพยากรน้ำมากขึ้น
 - 4.2 พัฒนา คู่มือการใช้งานอย่างยั่งยืน (Eco-use Manual) เพื่อให้ผู้บริโภคเข้าใจวิธีใช้ที่ลดคาร์บอน
 - 4.3 ส่งเสริมให้ลูกค้านำผลิตภัณฑ์กลับมาใช้ซ้ำ (Reuse / Refill Program)
 - 4.4 ใช้เทคโนโลยี Reverse Osmosis + Ozone ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นลดพลังงานในขั้นตอนบำบัดน้ำ
 - 4.5 สื่อสารและสร้างแรงจูงใจให้ผู้บริโภคมีพฤติกรรมลดการใช้พลังงาน เช่น การตั้งอุณหภูมิ การเปิดปิดเครื่องอัตโนมัติ
5. ระยะการจัดการซาก (End-of-Life Phase) แนวทางที่ผู้ให้ข้อมูลเห็นว่าควรดำเนินการในเชิงระบบ ได้แก่
 - 5.1 ส่งเสริมการจัดการของเสียตามหลัก 3Rs (Reduce-Reuse-Recycle)
 - 5.2 พัฒนาโครงการคืนบรรจุภัณฑ์เก่าแลกส่วนลด ดึงบรรจุภัณฑ์กลับเข้าสู่ระบบ
 - 5.3 ทำงานร่วมกับผู้รับกำจัดของเสียที่มีมาตรฐาน โรงงานกำจัดของเสียที่ผ่านการรับรองจากกรมโรงงานฯ
 - 5.4 ใช้ระบบ Wastewater Treatment และการกรองน้ำด้วย Reverse Osmosis เพื่อลดของเสียก่อนปล่อยคืนสิ่งแวดล้อม
 - 5.5 ตรวจสอบและปรับปรุงช่องทางรีไซเคิลให้ครอบคลุมพื้นที่จำหน่ายสินค้า
6. แนวทางเสริมเชิงกลยุทธ์ (Cross-cutting Strategies) จากข้อเสนอรวมของผู้ให้สัมภาษณ์ ดังนี้
 - 6.1 จัดทำแผนการจัดการคาร์บอนองค์กร (Corporate Carbon Management Plan) เพื่อกำหนดเป้าหมายและตัวชี้วัด (KPIs)
 - 6.2 จัดอบรมพนักงานและซัพพลายเออร์เรื่องการจัดการคาร์บอนฟุตพริ้นต์และแนวทาง Net Zero
 - 6.3 จัดทำรายงาน CFP และ CFO เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงต่อเนื่อง
 - 6.4 เข้าร่วมโครงการ T-VER โครงการลดก๊าซเรือนกระจกโดยสมัครใจ เพื่อรับรองผลการลดคาร์บอน

9. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยใช้กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์ล้างรถชนิดเข้มข้นแบบถุงเติม ขนาด 500 มิลลิลิตร กรณีศึกษาอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ผลการศึกษาพบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ในแต่ละช่วงของวัฏจักรชีวิตมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขั้นตอนการใช้งาน (Use Phase) เป็นแหล่งปล่อย GHG สูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 81.40 ของการปล่อยทั้งหมด รองลงมาคือ ขั้นตอนการได้มาซึ่งวัตถุดิบ (Raw Material Acquisition) คิดเป็นร้อยละ 15.75 ขณะที่ขั้นตอนการผลิต การกระจายสินค้า และการจัดการซาก มีสัดส่วนการปล่อยรวมกันน้อยกว่าร้อยละ 2 ของการปล่อยทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าในกลุ่มผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดและผลิตภัณฑ์เคมีสำหรับผู้บริโภค พบว่าสัดส่วนการปล่อย GHG ในขั้นตอนการใช้งานของกรณีศึกษานี้สูงกว่าค่าเฉลี่ยของอุตสาหกรรม ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 60-70 ของการปล่อยทั้งหมด ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ารูปแบบการใช้งานของผู้บริโภคที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำและพลังงานโดยตรง มีอิทธิพลต่อระดับคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ในระดับที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ในกลุ่มเดียวกัน

แนวทางการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงเทคนิคควบคู่กับการสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลสำคัญแสดงให้เห็นถึงมาตรการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตลอดทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ในช่วงการได้มาซึ่งวัตถุดิบ แนวทางที่มีความสำคัญ ได้แก่ การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์รีไซเคิลหรือบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศเพื่อลดการขนส่งระยะไกล และการกำหนดนโยบายการจัดซื้อสีเขียว (Green Procurement) เพื่อเป็นกรอบในการคัดเลือกซัพพลายเออร์ที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ชี้ว่าการจัดหาวัตถุดิบโดยให้ความสำคัญกับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมสามารถช่วยลดการปล่อยคาร์บอน

จากห่วงโซ่อุปทานได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน SDG 12 ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและการสร้างความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมห่วงโซ่อุปทาน [9], [10]

ในขั้นตอนการผลิต แนวทางการลดการปล่อย GHG ที่เหมาะสม [11] ได้แก่ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์และมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง การนำพลังงานหมุนเวียน เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มาใช้ในกระบวนการผลิต และการปรับปรุงกระบวนการทำงานตามหลัก Lean Manufacturing และ Kaizen ซึ่งมีหลักฐานจากงานวิจัยสนับสนุนว่าการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในภาคการผลิตสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ในช่วงประมาณร้อยละ 10–20 มาตรการเหล่านี้ไม่เพียงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานขององค์กรในระยะสั้น แต่ยังมีส่วนสนับสนุนเป้าหมายการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตาม SDG 13 ในระยะยาว

ในขั้นตอนการกระจายสินค้า การบริหารจัดการโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การวางแผนเส้นทางการขนส่งให้เหมาะสม (Route Optimization) การรวมรอบการขนส่ง และการเลือกใช้นพาหนะพลังงานสะอาด สามารถช่วยลดการใช้พลังงานและการปล่อยคาร์บอนจากกิจกรรมด้านโลจิสติกส์ได้อย่างเป็นรูปธรรม ขณะเดียวกัน ในช่วงการใช้งานของผู้บริโภค ซึ่งเป็นช่วงที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงที่สุด แนวทางที่มีความสำคัญ ได้แก่ การออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ช่วยลดการใช้และพลังงาน การจัดทำคู่มือการใช้งานที่ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการสร้างความตระหนักรู้เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคให้เอื้อต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก มาตรการเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนทั้ง SDG 12 ด้านการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน และ SDG 13 ด้านการรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับผู้ใช้ปลายทาง [12]

สำหรับขั้นตอนการจัดการซาก แนวทางที่เหมาะสมประกอบด้วยหลักการประยุกต์ใช้หลัก 3Rs (Reduce–Reuse–Recycle) การพัฒนาโครงการคืนบรรจุภัณฑ์หลังการใช้งาน และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานกำจัดของเสียที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน ซึ่งมาตรการเหล่านี้สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในช่วงปลายน้ำของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรของระบบการผลิตและการบริโภคโดยรวม ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนและเป้าหมาย SDG 12 อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ในระดับองค์กร การดำเนินมาตรการเชิงกลยุทธ์ เช่น การจัดทำแผนการจัดการคาร์บอนองค์กร การพัฒนาศักยภาพของพนักงานและซัพพลายเออร์ผ่านการอบรม การจัดทำและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) อย่างต่อเนื่อง รวมถึงการเข้าร่วมโครงการลดก๊าซเรือนกระจกโดยสมัครใจ เช่น โครงการ T-VER จะช่วยบูรณาการการลดการปล่อยคาร์บอนเข้าสู่การดำเนินงานขององค์กรอย่างเป็นระบบ และสนับสนุนการขับเคลื่อนสู่เป้าหมาย Net Zero ในระยะยาว [13], [14]

โดยสามารถจัดข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติออกเป็นสองระยะ ได้แก่ ระยะสั้น ซึ่งมุ่งเน้นมาตรการที่สามารถดำเนินการได้ทันทีภายในโรงงาน เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การปรับปรุงกระบวนการผลิต และการจัดการโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ และระยะยาว ซึ่งเน้นการกำหนดนโยบายองค์กรด้านการจัดการคาร์บอน การพัฒนาความร่วมมือกับซัพพลายเออร์และผู้บริโภค การรายงาน CFP/CFO อย่างต่อเนื่อง และการเข้าร่วมกลไกตลาดคาร์บอน เช่น T-VER จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ตามแนวทางการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ไม่เพียงช่วยระบุช่วงของวัฏจักรชีวิตที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงเท่านั้น แต่ยังเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการกำหนดมาตรการเชิงนโยบายและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ เพื่อยกระดับความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์ องค์กร และสังคมโดยรวม

10. ข้อเสนอแนะ

1. ควรส่งเสริมวิธีการล้างรถที่ใช้น้ำน้อย เช่น การล้างแบบพ่นละออง หรือ Dry Wash
2. ใช้พลังงานสะอาด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และระบบบำบัดน้ำกลับมาใช้ใหม่
3. ปรับปรุงเส้นทางการขนส่งให้เหมาะสมเพื่อลดระยะทางและการปล่อยคาร์บอน
4. ใช้ผลการประเมินนี้ในการยื่นขอฉลากคาร์บอนฟุตพริ้นต์และจัดทำรายงานความยั่งยืนประจำปี

11. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์แห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลที่สำคัญและมีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ การอนุญาตให้เข้าถึงกระบวนการผลิต ข้อมูลการจัดการวัตถุดิบ การกระจายสินค้า และการดำเนินงานด้านสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์น้ำยาล้างรถชนิดเข้มข้นสามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ครบคลุม และมีความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณในความเมตตา ความร่วมมือและความเอื้อเฟื้อของทีมงานทุกท่านเป็นอย่างสูง

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Finkbeiner M, Inaba A, Tan R, Christiansen K, Klüppel HJ. The new ISO standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *Int J Life Cycle Assess.* 2006;11(2):80–85.
- [2] Schmidt P, Kahl H, Müller C. Energy efficiency and carbon footprint reduction in manufacturing: A review. *J Manuf Syst.* 2017;45:291–304.
- [3] Accenture. *Powered for Change: 2023 Report* [Internet]. 2023 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document-2/Accenture-Powered-for-Change-Report.pdf>
- [4] Lehmann M. *Life cycle assessments (LCA) and product carbon footprints (PCF)* [Internet]. 2025 [cited 2025 Jan 29]. Available from: <https://www.myclimate.org/en/get-active/corporate-clients/product-carbon-footprints-pcf-and-life-cycle-assessments-lca-myclimate/>
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Sixth assessment report (AR6): Synthesis report*. Geneva: IPCC; 2023.
- [6] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. *คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร* [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 29 ม.ค. 2568]. แหล่งที่มา: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=YOhKdlpIVmpkSE5mYVhNPQ>
- [7] International Organization for Standardization. *ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*. Geneva: ISO; 2018.
- [8] Sriphirom P, Rossopa B. Assessment of greenhouse gas mitigation from rice cultivation using alternate wetting and drying and rice straw biochar in Thailand. *Agric Water Manag.* 2023;290:108586.
- [9] Montazeri H, Montazeri F. CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: Impact of outlet openings. *Renew Energy.* 2018;118:502–520.
- [10] Rahman A, Ali R, Kabir SN, Rahman M, Al Mamun R, Hossen A. Agricultural mechanization in Bangladesh: Status and challenges towards achieving the sustainable development goals (SDGs). *AMA Agric Mech Asia Afr Lat Am.* 2020;51(4):106–120.
- [11] Cucuzzella C, Salvia G. Consumer behavior and LCA: Implications for environmental sustainability. *J Clean Prod.* 2018;190:536–548.
- [12] Gu Y, Tan R, Chen Y. End-of-life management and carbon reduction strategies in product supply chains. *Resour Conserv Recycl.* 2018;135:1–10.
- [13] Zhu Q, Geng Y, Fujita T, Hashimoto S. Green supply chain management in leading manufacturers: Case studies in China. *Manag Res Rev.* 2013;36(4):365–384.
- [14] McKinnon A, Browne M, Whiteing A, Piecyk M. *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. London: Kogan Page; 2015.

การเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างจากนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟและประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท

COMPARISON OF LIGHT INTENSITY FROM INNOVATIVE LAMP COVERS AND THE EFFICIENCY OF THE MATERIALS USED TO CREATE EACH TYPE OF LAMP COVER

ณัฐพงษ์ ม้าเทศ^{1,*} ดารินทร์ วีระชัย¹ ชลธิชา มุ่งดี¹ ธนาพร เทียมใจ¹ จิราภรณ์ ลาพิงค์¹ รมิดา อูประ¹
ฤทธิติกร สมปาน¹

Nutthaphong Mated^{1,*} Darin Werachai¹ Chonthicha Mungdee¹ Thanaporn Thiamchai¹
Jiraporn Laping¹ Ramida Aupara¹ Rittikorn Sompan¹

¹ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

*Corresponding author, E-mail: Nutthaphong.Ma@up.ac.th

Received: November 24, 2025

Revise: December 28, 2025

Accepted: December 29, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนา นวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟจากวัสดุเหลือใช้ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของจากนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟ โดยมีวัสดุ 8 ประเภท ได้แก่ แผ่นซีดี กระจกออะลูมิเนียม ฟิวเจอร์บอร์ด พลาสติกใส โฟม ไม้ ก่อกระดาษ และฟอยล์ ต่อระดับความเข้มของแสงสว่าง โดยควบคุมตัวแปรด้วยหลอดไฟ LED ขนาด 15 วัตต์ ติดตั้งที่ความสูง 2 เมตร ภายใต้ฝาครอบรูปทรงพีระมิดตัดยอดมุมเอียง 40 องศา เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือเครื่องวัดความเข้มของแสงสว่าง (Lux meter) ยี่ห้อ EXTECH รุ่น 407026 ตามมาตรฐาน CIE 1931 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและการทดสอบแบบ Independent Samples t-test เพื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างระหว่างกลุ่มที่ติดตั้งฝาครอบวัสดุแต่ละชนิดกับกลุ่มที่ไม่ติดตั้งฝาครอบ อีกทั้งยังวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างระหว่างวัสดุฝาครอบหลอดไฟทั้ง 8 ประเภท

ผลการศึกษพบว่าประเภทของวัสดุส่งผลต่อระดับความเข้มของแสงสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยฟอยล์ให้ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงสูงสุด 77.6 ลักซ์ รองลงมาคือโฟม 74.0 ลักซ์ และกระจกออะลูมิเนียม 70.1 ลักซ์ ซึ่งสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ไม่ติดตั้งฝาครอบ 30.4 ลักซ์ อย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการออกแบบและพัฒนาวัสดุฝาครอบหลอดไฟโดยเลือกใช้วัสดุรูปทรงทางเรขาคณิตที่เหมาะสมร่วมกับวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสูง และการกระจายแสงที่ดีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างได้มากกว่าร้อยละ 155.26 ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยปรับปรุงสภาพแวดล้อมในการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐานทางด้านความปลอดภัยและอาชีวอนามัย แต่ยังสามารถใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและการจัดการวัสดุเหลือใช้ตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อความยั่งยืนในสถานประกอบการ

คำสำคัญ: การกระจายแสง ฝาครอบหลอดไฟ ความเข้มของแสงสว่าง วัสดุสะท้อนแสง การเปรียบเทียบวัสดุ

ABSTRACT

The objective of this research was to design and develop an innovative lamp cover using recycled materials and to evaluate the luminous efficiency of eight different material types: compact discs, aluminum cans, future boards, clear plastic sheets, foam, wood, cardboard, and foil. The experimental variables were controlled using a 15-watt LED

bulb installed at a height of 2 meters, enclosed within a frustum of a quadrilateral pyramid structure with a 40-degree incline. The light intensity data were collected using an EXTECH 407026 lux meter in accordance with CIE 1931 standards. Data analysis was performed using descriptive statistics, Independent Samples t-tests to compare the illumination levels between each material type and the control group (without a cover), and One-way Analysis of Variance (ANOVA) to determine the significant differences in mean light intensity among the eight material types.

The results indicated that the type of material significantly influenced light intensity ($p < 0.05$). Foil yielded the highest mean intensity at 77.6 lux, followed by foam 74.0 lux and aluminum cans 70.1 lux, all of which were significantly higher than the control group 30.4 lux. The findings demonstrate that the strategic design of lamp covers, utilizing optimized geometric dimensions combined with high-reflectivity and superior light distribution materials, can enhance lighting efficiency by more than 155.26%. This innovation not only improves the working environment in compliance with occupational health and safety standards but also promotes energy efficiency and sustainable waste management based on circular economy principles within the workplace.

Keywords: Light diffusion, Lamp covers, Light intensity, Reflective material, Material comparison

1. บทนำ

แสงสว่างเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ตั้งแต่การทำงาน การพักผ่อน ไปจนถึงการสร้างบรรยากาศในสถานที่ต่าง ๆ [1] การเลือกใช้หลอดไฟและวัสดุฝาครอบหลอดไฟที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงอย่างยิ่ง ไม่ว่าจะเป็นในด้าน ของประสิทธิภาพการใช้งาน อายุการใช้งาน ความสวยงาม และความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน [2], [3], [4] โดยในสถานการณ์การประสบนอันตรายหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงาน ปี 2563 - 2567 ของสำนักงานกองทุนเงินทดแทน สำนักงานประกันสังคม กระทรวงแรงงาน ที่ได้รวบรวมสถิติโรคที่เกิดขึ้นจากสาเหตุทางกายภาพ โดยเฉพาะโรคจากแสงอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งพบว่า มีพนักงานหยุดงานเกิน 3 วัน จำนวน 8 คน และหยุดงานไม่เกิน 3 วัน จำนวน 105 คน [5]

การออกแบบฝาครอบหลอดไฟในสถานที่ทำงาน มีบทบาทสำคัญในการควบคุมทิศทางและความเข้มของแสงที่ถูกปล่อยออกมา โดยสามารถทำให้แสงสว่างกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง หรือมุ่งเน้นในจุดที่ต้องการได้ นอกจากนี้ ฝาครอบยังสามารถช่วยป้องกันแสงจ้า และลดการสะท้อนแสงที่ไม่พึงประสงค์ได้อีกด้วย นวัตกรรมในด้านฝาครอบหลอดไฟมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่หลากหลายในการประดิษฐ์ฝาครอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นวัสดุพลาสติก กระดาษ อะคริลิก หรือแม้แต่วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการกระจายแสง [6], [7]

กฎหมายด้านแสงสว่างในสถานที่ทำงานยังมีการบังคับแก่นายจ้าง โดยนายจ้างนั้นต้องจัดให้สถานประกอบการมีความเข้มของแสงสว่างไม่ต่ำกว่ามาตรฐาน อีกทั้งยังต้องใช้หรือจัดให้มีฉาก แผ่นฟิล์มกรองแสง หรือมาตรการอื่นที่เหมาะสม และเพียงพอเพื่อป้องกันมิให้แสงตรงหรือแสงสะท้อนจากแหล่งกำเนิดแสงหรือดวงอาทิตย์ที่มีแสงจ้า ส่องเข้านัยน์ตาของพนักงานโดยตรงในขณะที่ทำงาน [8] ตามกฎหมายและมาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2561 ในบริเวณพื้นที่ใช้ประโยชน์ในสำนักงาน มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง ไม่ต่ำกว่า 300 (ลักซ์) และไม่มีจุดใดจุดหนึ่งในพื้นที่ มีความเข้มของแสงสว่างต่ำกว่า 150 (ลักซ์) แต่ถ้าหากตามมาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ณ บริเวณที่พนักงานทำงาน โดยเฉพาะงานประจำในสำนักงาน เช่น งานเขียน งานพิมพ์ งานบันทึกข้อมูล งานคอมพิวเตอร์ประมวลผลข้อมูล การจัดเก็บแฟ้ม หรือการอ่าน จะต้องมีความเข้มของแสงสว่างอยู่ในช่วง 400-500 (ลักซ์) ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่างจะต้องไม่ต่ำกว่า 400 (ลักซ์) ถึงจะปลอดภัยและเป็นไปตามกฎหมายกำหนด [9]

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นเพื่อการออกแบบพัฒนาวัตกรรมการของวัสดุฝาครอบหลอดไฟและการเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างจากฝาครอบหลอดไฟที่ทำจากวัสดุต่างๆ โดยจะวิเคราะห์ประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบแต่ละประเภท จากการใช้เครื่องมือตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง และอ้างอิงผลให้เป็นไปตามกฎหมายและมาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง ของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2561 [9] อีกทั้ง เพื่อประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างจากการทดลอง การตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างของประเภทวัสดุฝาครอบหลอดไฟที่ต่างชนิดกัน และเพื่อนำผลการเลือกใช้ฝาครอบหลอดไฟที่เหมาะสมในสถานการณ์ต่างๆ

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อออกแบบพัฒนาวัสดุฝาครอบหลอดไฟ

2.2 เพื่อประเมินและเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างจากการทดลองโดยใช้วัสดุฝาครอบหลอดไฟประเภทต่างๆ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบพัฒนาวัสดุฝาครอบหลอดไฟ รวมทั้งเพื่อประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างจากการทดลอง อีกทั้งยังเพื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างจากวัสดุฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท ทั้งนี้ วัสดุฝาครอบหลอดไฟที่นำมาใช้ในการทดลอง ได้มาจากการประดิษฐ์และประกอบ โดยคัดเลือกจากวัสดุเหลือใช้และหาได้ง่ายในครัวเรือนและสถานที่ทำงาน ประกอบด้วย แผ่นซีดี, กระป๋องอะลูมิเนียม, พิวเจอร์บอร์ด, พลาสติกใส, โฟม, ไม้, กอลงกระดาด, และฟอยล์ โดยอ้างอิงคู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร ของสมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย ในการคำนึงถึงคำนึงถึง ปริมาณและคุณภาพแสงที่เหมาะสม [13]

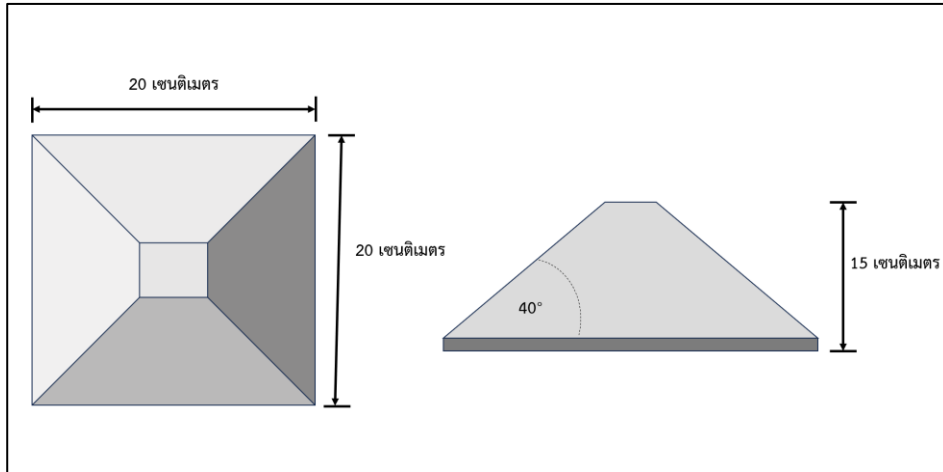
3.1 ออกแบบพัฒนาวัสดุฝาครอบหลอดไฟ

การออกแบบลักษณะทางกายภาพของฝาครอบหลอดไฟ (Physical Design of Lamp Cover) เพื่อให้การทดสอบประสิทธิภาพการส่องสว่างสอดคล้องกับมาตรฐานการกระจายแสง ผู้วิจัยได้ออกแบบฝาครอบหลอดไฟต้นแบบโดยคำนึงถึงหลักเกณฑ์ทางเรขาคณิตและการรวมแสง (Light Concentration) โดยมีรายละเอียดโครงสร้างดังนี้

รูปทรงเรขาคณิต (Geometric Shape) ฝาครอบถูกออกแบบในรูปทรง พีระมิดฐานสี่เหลี่ยมตัดยอด (Frustum of a Quadrilateral Pyramid) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมทิศทางแสงและลดการสูญเสียความเข้มของแสงภายในโครงสร้าง

มิติขนาด (Dimensions): ส่วนฐาน (Base) มีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร และยาว 20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมสำหรับการครอบคลุมพื้นที่การกระจายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสู่พื้นผิวทำงาน ความสูง (Height): กำหนดความสูงตามแนวตั้ง 15 เซนติเมตร เพื่อสร้างระยะห่างที่พอเหมาะระหว่างหลอดไฟและปากเปิดของฝาครอบ ช่วยในการจัดการความร้อนและการสะท้อนแสงภายใน

มุมเอียงของแผงสะท้อนแสง (Incline Angle) แผงวัสดุแต่ละด้านถูกทำมุมเอียง 40 องศา กับแนวระนาบฐาน ซึ่งเป็นมุมที่คำนวณมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงแบบพุ่งตรง (Direct Reflection) จากผนังด้านข้างลงสู่พื้นที่เป้าหมายด้านล่างตามหลักการสะท้อนของแสง



รูปที่ 1 การออกแบบลักษณะทางกายภาพของนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟ

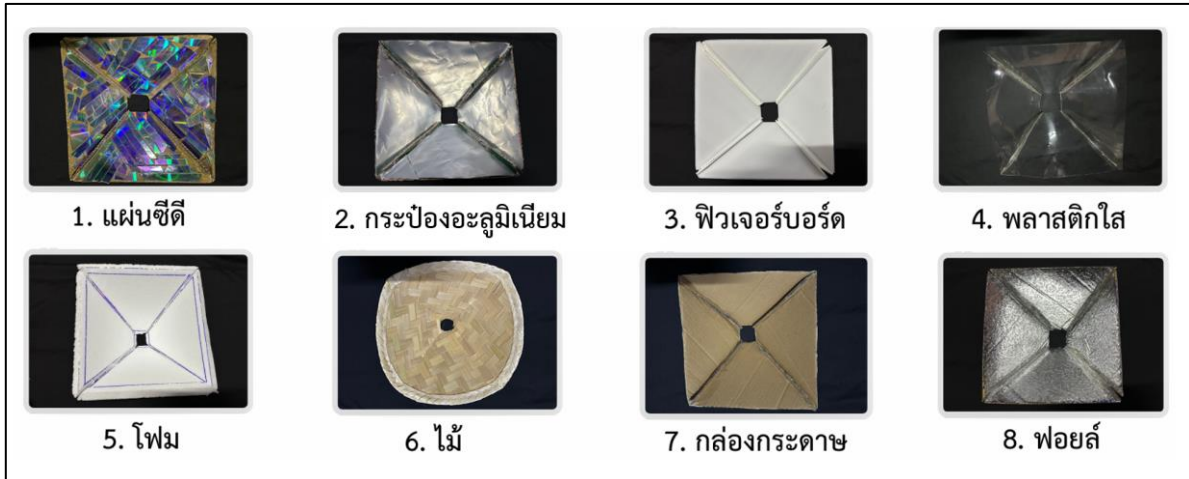
3.2 กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยในครั้งนี้คือ วัสดุฝาครอบหลอดไฟที่ประดิษฐ์จากวัสดุ 8 ประเภท ได้แก่ แผ่นซีดี, กระจกอะลูมิเนียม, พิวเจอร์บอร์ด, พลาสติกใส, โฟม, ไม้, กล่องกระดาษ และฟอยล์ ทั้งนี้ ในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุเพื่อประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟ คุณสมบัติทางแสงอันได้แก่ ค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) และค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการส่องสว่าง โดยจากการวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างวัสดุ 8 ประเภท สามารถจำแนกสมบัติทางแสงออกได้ตามลักษณะทางกายภาพและพื้นผิว ดังนี้

กลุ่มวัสดุที่มีประสิทธิภาพการสะท้อนแสงสูง ประกอบด้วย ฟอยล์อะลูมิเนียม แผ่นซีดี และโพลีเอทิลีน โดยเฉพาะฟอยล์อะลูมิเนียมมีค่าการสะท้อนแสงสูงที่สุดที่ 0.80 – 0.90 เนื่องจากมีคุณสมบัติการสะท้อนแบบกระจก (Specular Reflection) ในขณะที่โพลีเอทิลีนแม้จะมีค่าการสะท้อนแสงสูงใกล้เคียงกัน (0.75 – 0.85) แต่จะมีลักษณะการสะท้อนแบบพุ้งกระจาย (Diffuse Reflection) ซึ่งช่วยลดความจ้าตาได้ดีกว่า สำหรับแผ่นซีดีนั้นก็มีลักษณะเฉพาะในการกระเจิงแสง (Diffraction) ร่วมด้วย ทำให้การกระจายแสงมีความซับซ้อนกว่าวัสดุอื่น

กลุ่มวัสดุที่มีคุณสมบัติทั้งสะท้อนและดูดกลืน ได้แก่ กระจกอะลูมิเนียม และพิวเจอร์บอร์ดสีขาว ซึ่งมีค่าการสะท้อนแสงอยู่ในช่วง 0.60 – 0.75 โดยค่าการสะท้อนที่ลดลงในกระจกอะลูมิเนียมมักเกิดจากความโค้งงอของพื้นผิวและสิ่งพิมพ์สกรีน ส่วนพิวเจอร์บอร์ดจะแปรผันตามความหนาแน่นและเจดสีของพลาสติก

กลุ่มวัสดุที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงและวัสดุโปร่งแสง วัสดุประเภทไม้และกล่องกระดาษสีน้ำตาลมีค่าการดูดกลืนแสงสูงถึง 0.50 – 0.80 เนื่องจากพื้นผิวมีความขรุขระและมีโทนสีเข้ม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกระจายแสงสว่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่พลาสติกใสมีค่าการสะท้อนและการดูดกลืนแสงต่ำที่สุด (ต่ำกว่า 0.10) เนื่องจากคุณสมบัติหลักคือการส่องผ่านแสง (Transmittance) ที่สูงถึง 0.80 – 0.90 ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นตัวป้องกันหลอดไฟโดยไม่เน้นการเปลี่ยนทิศทางการแสง [14], [15]



รูปที่ 2 วัสดุฝาครอบหลอดไฟในแต่ละประเภทจากการออกแบบและพัฒนา

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่าง (Lux meter) ยี่ห้อ EXTECH รุ่น 407026 (Heavy Duty Light Meter) เป็นเครื่องมือหลักในการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นเครื่องวัดประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมและงานวิจัย โดยมีคุณลักษณะทางเทคนิคที่สำคัญดังนี้ ระบบเซนเซอร์ (Sensor System) ใช้โฟโตไดโอด (Photo Diode) พร้อมฟิลเตอร์แก้ค่าสี (Color Correction Filter) และระบบแก้ไขค่ามุมตกกระทบ (Cosine Correction) เพื่อให้ได้ค่าความเข้มของแสงสว่างที่ใกล้เคียงกับมาตรฐานการมองเห็นของมนุษย์มากที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียง 5% และฟังก์ชันการเลือกแหล่งกำเนิดแสง (Light Source Selection) เครื่องมือรุ่นนี้สามารถปรับโหมดการวัดให้เหมาะสมกับประเภทสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงได้ 4 ประเภท ได้แก่ ทั้งสแตน, ฟลูออเรสเซนต์, โซเดียม และปรอท ซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของช่วงคลื่นแสงช่วงการวัด (Measurement Range) รองรับการวัดได้สูงสุดถึง 50,000 Lux โดยมีความละเอียด (Resolution) สูงสุดที่ 1 Lux ในย่านการวัดต่ำสุด[15] ทำให้สามารถตรวจวัดค่าความเข้มของแสงสว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจากการสะท้อนของวัสดุที่แตกต่างกันได้อย่างแม่นยำ ใช้สำหรับวัดความเข้มของแสงสว่างที่ฝาครอบหลอดไฟของวัสดุแต่ละประเภท ทั้งนี้ เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างเป็นไปตามมาตรฐาน CIE 1931 ของคณะกรรมการการระหว่างประเทศว่าด้วยความส่องสว่าง (International Commission on Illumination) และยังมีการปรับเทียบความถูกต้องของเครื่องมือกับหน่วยปรับเทียบมาตรฐานปีละหนึ่งครั้ง ตามกฎหมายกำหนด [10] และใช้แบบบันทึกผลการเปรียบเทียบในการบันทึกค่าความเข้มของแสงสว่างและข้อมูลอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 3 เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่าง (Lux meter)

3.4 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1 จัดเตรียมสถานที่ทดสอบที่มีสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง

3.4.2 ติดตั้งหลอดไฟขนาด 15 วัตต์ ที่มีความสูง 2 เมตร และใช้ผ้าดำปิดคลุมพื้นที่ในการทดลองแต่ละครั้ง เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกพื้นที่การทดลอง และเพื่อควบคุมคุณภาพของแสงสว่างในการทดลอง โดยการกำหนดคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงและการควบคุมตัวแปร ผู้วิจัยเลือกใช้หลอดไฟประเภท แอลอีดี (LED: Light Emitting Diode) ขนาดกำลังไฟฟ้า 15 วัตต์ (เทียบเท่าความสว่างประมาณ 1,500 - 1,600 ลูเมน) อุณหภูมิสี 6,500 เคลวิน (Daylight) เป็นแหล่งกำเนิดแสงหลักในการทดลอง และยังเป็นขนาดกำลังไฟฟ้านิยมใช้ทั่วไปในอาคารสำนักงานและที่พักอาศัย และผู้วิจัยยังมีการควบคุมคุณภาพแสงของหลอดไฟ LED มีคุณสมบัติการส่องสว่างที่มีทิศทางแน่นอน (Directional Light) และมีค่าความถูกต้องของสี (CRI) ที่เสถียร รวมถึงมีการแผ่รังสีความร้อนต่ำกว่าหลอดไส้หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อต้องทดลองซ้ำหลายครั้ง

3.4.3 ก่อนเริ่มการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง ผู้วิจัยดำเนินการปรับให้เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างให้อ่านค่าที่ศูนย์ (Photometer Zeroing) เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพการทดลองและเป็นไปตามหลักเกณฑ์วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะการทำงานตามมาตรฐานกฎหมาย [10]

3.4.4 ทดลองตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างและแสงที่ผ่านฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท โดยใช้เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างยกสูงในแนวระนาบโดยมีระยะความสูงจากพื้น 75 เซนติเมตร [10]

3.4.5 การทดลองตรวจวัดความเข้มของแสงสว่าง แต่ละครั้งในการประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝาครอบหลอดไฟ โดยดำเนินการตรวจวัดจำนวน 5 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างของประเภทวัสดุฝาครอบหลอดไฟนั้นๆ

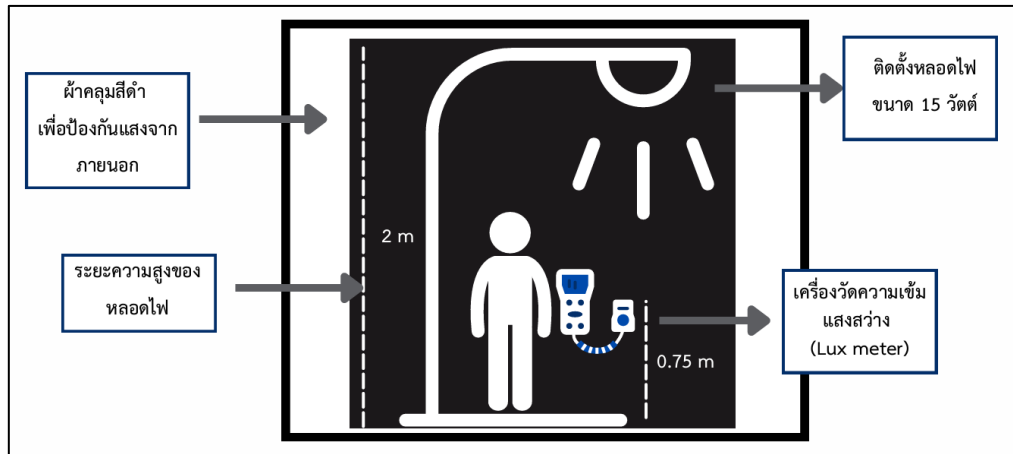
3.4.6 บันทึกค่าความเข้มของแสงสว่างเฉลี่ยในแบบบันทึกผลข้อมูล

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการด้วยการใช้โปรแกรมสถิติ SPSS โดยการวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics): วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: S.D.) ของค่าความเข้มของแสงสว่าง (Lux) เพื่ออธิบายลักษณะพื้นฐานและประสิทธิภาพการส่งผ่านแสงของวัสดุฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภท รวมถึงกลุ่มควบคุมที่ไม่ติดตั้งฝาครอบ

3.5.2 สถิติอ้างอิง (Inferential Statistics): การทดสอบค่าที (t-test): ใช้การทดสอบแบบ Independent Samples t-test เพื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างระหว่างกลุ่มที่ติดตั้งฝาครอบวัสดุแต่ละชนิดกับกลุ่มที่ไม่ติดตั้งฝาครอบ เพื่อทดสอบนัยสำคัญของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA): ใช้เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างระหว่างวัสดุฝาครอบหลอดไฟทั้ง 8 ประเภท ว่ามีผลต่อการส่องสว่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ อีกทั้ง การทดสอบรายคู่ (Post-hoc Comparison): ในกรณีที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบรายคู่ด้วยวิธีของ Scheffe (หรือ Tukey) เพื่อระบุคู่ของวัสดุที่มีความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างอย่างชัดเจน [17]



รูปที่ 3 การออกแบบสถานที่ทำการทดลองการตรวจวัดประเมินความเข้มของแสงสว่าง



รูปที่ 4 การติดตั้งหลอดไฟและการทดลองการตรวจวัดประเมินความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟ

4. ผลการวิจัย

จากการออกแบบพัฒนาวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟและการตรวจวัดประเมินระดับความเข้มของแสงสว่างจากการทดลองโดยใช้วัสดุฝ้าครอบหลอดไฟประเภทต่างๆ ได้แก่ แผ่นซีดี, กระป๋องอะลูมิเนียม, ฟิวเจอร์บอร์ด, พลาสติกใส, โฟม, ไม้, กล้องกระดาษ และฟอยล์ โดยใช้เครื่องวัดความเข้มของแสงสว่างตรวจวัดและประเมินพร้อมวิเคราะห์ข้อมูลค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่าง รวมถึงการเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างจากวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟแต่ละประเภทและการไม่ใช้ฝ้าครอบ พบว่า ผลการติดตั้งหลอดไฟและตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างแบบไม่ใส่วัสดุฝ้าครอบหลอดไฟ มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง 30.4 ลักซ์ และผลการตรวจวัดความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟที่มีค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่างสูงสุด ลำดับที่ 1 คือ ฟอยล์ 77.6 ลักซ์ ลำดับที่ 2 คือ โฟม 74 ลักซ์ ลำดับที่ 3 คือ กระป๋องอะลูมิเนียม 70.1 ลักซ์ ลำดับที่ 4 คือ ฟิวเจอร์บอร์ด 50.4 ลักซ์ ลำดับที่ 5 คือ ไม้ 45 ลักซ์ ลำดับที่ 6 คือ พลาสติกใส 44 ลักซ์ ลำดับที่ 7 คือ แผ่นซีดี 40.6 ลักซ์ และลำดับที่ 8 คือ กล้องกระดาษ 38 ลักซ์ ตามลำดับ โดยผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟในแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝ้าครอบหลอดไฟในแต่ละประเภท

ลำดับ	วัสดุฝ้าครอบหลอดไฟ	ระดับความเข้มของแสงสว่าง (Lux)					ค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
1	ไม่ใส่วัสดุฝ้าครอบ	30	31	30	31	30	30.4

2	แผ่นซีดี	41	40	40	41	41	40.6
3	กระป๋องอะลูมิเนียม	73	71	68	70	70	70.1
4	ฟิวเจอร์บอร์ด	52	50	50	49	51	50.4
5	พลาสติกใส	44	45	43	43	43	44
6	โฟม	73	73	73	77	74	74
7	ไม้	47	45	44	44	45	45
8	กล่องกระดาษ	38	38	37	37	40	38
9	ฟอยล์	78	77	77	78	78	77.6

จากผลการเปรียบเทียบระดับความเข้มของแสงสว่างของวัสดุฝาครอบหลอดไฟแต่ละประเภทดังกล่าว สามารถวิเคราะห์เพิ่มเติมได้ว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างที่ตรวจวัดได้นั้น เกิดจากคุณสมบัติด้านการสะท้อนแสง การดูดซับแสง และโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการส่งผ่านและกระจายแสง วัสดุที่มีความสามารถในการสะท้อนแสงสูง เช่น ฟอยล์ แสดงศักยภาพสูงสุดในการเพิ่มระดับความเข้มของแสงสว่าง โดยให้ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่างที่ 77.6 ลักซ์ พร้อมทั้งมีค่าความผันผวนระหว่างการวัดต่ำ แสดงถึงการกระจายแสงที่สม่ำเสมอ

วัสดุประเภท โฟม และ กระป๋องอะลูมิเนียม ซึ่งมีความสามารถในการสะท้อนและกระจายแสงในระดับดี รองลงมาจากฟอยล์ ให้ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่างที่ 74 ลักซ์ และที่ 70.1 ลักซ์ ตามลำดับ แม้จะพบค่าความเข้มของแสงสว่างบางครั้งมีความผันผวนเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สะท้อนถึงความมีประสิทธิภาพของพื้นผิวในการสะท้อนแสง

ส่วนวัสดุที่ให้ค่าความเข้มของแสงสว่างระดับปานกลาง เช่น ฟิวเจอร์บอร์ด, พลาสติกใส, และแผ่นซีดี มีค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่างอยู่ระหว่าง 40.6–50.4 ลักซ์ สอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่เน้นการกระจายแสงมากกว่าการสะท้อนโดยตรง ทำให้ระดับความสว่างที่ได้อยู่ในระดับปานกลางและมีความสม่ำเสมอในระดับที่เหมาะสม ขณะที่กล่องกระดาษ ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับแสง ให้ค่าความเข้มของแสงสว่างต่ำที่สุดในกลุ่ม โดยมีค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่าง 38 ลักซ์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการสะท้อนแสงที่จำกัดอย่างชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี ไม้ใช้วัสดุฝาครอบหลอดไฟในการทดลอง ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยของความเข้มของแสงสว่าง 30.4 ลักซ์ พบว่าแสงมีการกระจายอย่างไร้ทิศทางและไม่สามารถควบคุมพื้นที่ส่องสว่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของวัสดุฝาครอบหลอดไฟในการช่วยเพิ่มระดับความสว่างและควบคุมทิศทางแสงสว่างให้เป็นไปตามความต้องการ

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างระหว่างกลุ่มที่ไม่ใช้วัสดุฝาครอบและวัสดุฝาครอบประเภทต่าง ๆ

วัสดุฝาครอบหลอดไฟ	ค่าเฉลี่ย (Mean)	S.D.	t	p-value
ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ (ควบคุม)	30.4	0.55	-	-
แผ่นซีดี	40.6	0.55	29.35	< 0.001*
กระป๋องอะลูมิเนียม	70.1	1.82	41.52	< 0.001*
ฟิวเจอร์บอร์ด	50.4	1.14	35.19	< 0.001*
พลาสติกใส	44	0.89	27.96	< 0.001*
โฟม	74	1.73	43.19	< 0.001*

ไม้	45	1.22	24.33	< 0.001*
กล่องกระดาษ	38	1.22	12.67	< 0.001*
ฟอยล์	77.6	0.55	135.58	< 0.001*

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

จากตารางที่ 4.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างระหว่างกลุ่มที่ไม่มีการติดตั้งฝาครอบหลอดไฟ (Mean = 30.4, S.D. = 0.55) และกลุ่มที่มีการติดตั้งฝาครอบจากวัสดุทั้ง 8 ประเภท พบว่าวัสดุทุกชนิดส่งผลให้ความเข้มของแสงสว่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ โดยวัสดุประเภทฟอยล์ให้ผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความเข้มของแสงสว่างสูงสุด ($t = 135.58, p < 0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงแบบกระจก (Specular Reflection) และการออกแบบโครงสร้างที่ช่วยในการรวมแสงเข้าสู่พื้นที่เป้าหมาย

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) ของความเข้มของแสงสว่างระหว่างวัสดุประเภทต่าง ๆ

แหล่งที่มาของความแปรปรวน	SS	df	MS	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	12,456.24	8	1,557.03	1,142.18	< 0.001*
ภายในกลุ่ม	49.2	36	1.37		
รวม	12,505.44	44			

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) จากตารางที่ 4.3 พบว่า ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟมีความสัมพันธ์กับระดับความเข้มของแสงสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$ โดยมีค่าสถิติ $F(8, 36) = 1,142.18, p < .001$ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสมบัติทางแสงและลักษณะพื้นผิวของวัสดุแต่ละชนิดส่งผลต่อความสามารถในการควบคุมทิศทางและการกระจายแสงที่แตกต่างกัน ผลการทดสอบนี้ยืนยันถึงความสำคัญของการเลือกใช้วัสดุในการออกแบบฝาครอบเพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างในพื้นที่ทำงาน

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบรายคู่ (Post-hoc Comparison) ระหว่างกลุ่มไม้ใช้ฝาครอบและวัสดุแต่ละประเภท

กลุ่มวัสดุ	กลุ่มเปรียบเทียบ	Mean Difference	Std. Error	p-value
แผ่นซีดี	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	10.20*	0.745	< 0.001*
กระป๋องอะลูมิเนียม	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	39.70*	0.658	< 0.001*
ฟิวเจอร์บอร์ด	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	20.00*	0.747	< 0.001*
พลาสติกใส	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	13.20*	0.739	< 0.001*
โฟม	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	43.60*	0.589	< 0.001*
ไม้	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	14.60*	0.730	< 0.001*
กล่องกระดาษ	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	7.60*	0.969	0.002*
ฟอยล์	ไม้ใช้วัสดุฝาครอบ	47.20*	0.738	< 0.001*

*Mean Difference มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

จากการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธีของ Scheffe ในตารางที่ 4.4 พบว่าวัสดุฝาครอบหลอดไฟทุกประเภทสามารถเพิ่มค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ฝาครอบ ($p < 0.05$) โดยกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติสะท้อนแสงสูง (High Reflective Materials) ได้แก่ ฟอยล์, โฟม และกระเบื้องอะลูมิเนียม มีค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean Difference) สูงที่สุดตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการสะท้อนแสงแบบกระจกและการออกแบบรูปทรงพีระมิดตัดยอดที่ช่วยลดการกระเจิงของแสงออกนอกพื้นที่ใช้งาน ในขณะที่กลุ่มวัสดุดูดกลืนแสงอย่างไม้และกล่องกระดาษแม้จะให้ผลต่างของความสว่างน้อยกว่าแต่ยังคงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการรวมแสงที่ดีกว่าการปล่อยให้แสงกระจายอย่างไร้ทิศทาง

5. สรุปและอภิปรายผล

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาวัสดุฝาครอบหลอดไฟ ประเมินและเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างและประสิทธิภาพของวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการประดิษฐ์ฝาครอบหลอดไฟในแต่ละประเภท จากผลการวิจัย พบว่า วัสดุแต่ละชนิดมีผลต่อระดับความเข้มของแสงสว่างและการกระจายแสงอย่างชัดเจน วัสดุที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดในการเพิ่มความเข้มของแสงสว่าง คือ ฟอยล์ โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสง 77.6 ลักซ์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่างสูงที่สุดในการทดลอง วัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติในการสะท้อนและส่งผ่านแสงได้ดี ทำให้แสงที่ผ่านฝาครอบของวัสดุชนิดฟอยล์มีความเข้มของแสงสว่างที่สูงและแพร่กระจายแสงอย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดลองพบว่าฟอยล์ ช่วยสะท้อนแสงกลับสู่พื้นที่ที่ต้องการอย่างแม่นยำและมีการกระจายแสงอย่างสม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้าม การไม่ใส่วัสดุฝาครอบหลอดไฟให้ผลลัพธ์ต่ำที่สุด โดยมีค่าความเข้มของแสงสว่างเฉลี่ย 30.4 ลักซ์ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าไม่มีการควบคุมทิศทางของแสงหรือการกระจายแสง วัสดุอื่นๆ เช่น พลาสติกใสและแผ่นซีดี ซึ่งมีค่าความเข้มของแสงสว่างระดับปานกลาง โดยพลาสติกใส มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง 44 ลักซ์ และ แผ่นซีดี มีค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง 40.6 ลักซ์ แสดงให้เห็นถึงการกระจายแสงในระดับที่ยอมรับในระดับหนึ่ง โดยมีการกระจายแสงในทุกทิศทาง แต่ความเข้มของแสงสว่างที่ผ่านฝาครอบลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการหักเหแสงในการทดลอง

ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับหลักการทางฟิสิกส์ในคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดการการสะท้อนของแสงสูง ทำให้เพิ่มความเข้มของแสงสว่างและกระจายแสงได้ดี โดยเฉพาะฟอยล์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงที่ดีที่สุด สามารถเพิ่มความเข้มของแสงสว่างและกระจายแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ฤกษ์เกษม ไกรฤทธิ, 2553 ที่ศึกษาประสิทธิภาพแผงสะท้อนเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร โดยพบว่า ฟอยล์มีพื้นผิวที่มีการสะท้อนแสงลักษณะกระเจิงของแสง จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในสถานการณ์ที่ต้องการความเข้มของแสงสว่างสูงและการกระจายแสงที่มีประสิทธิภาพสูง [11] ในขณะที่วัสดุที่ไม่สะท้อนแสงมากนัก เช่น พลาสติกใสและแผ่นซีดี มีการกระจายแสงในระดับที่ยอมรับได้ แต่ก็มีการหักเหแสง ทำให้ความเข้มของแสงสว่างที่ผ่านลดลงเมื่อเทียบกับฟอยล์ วัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติในการกระจายแสงไปในหลายทิศทาง แต่ไม่สามารถควบคุมทิศทางแสงให้ชัดเจนเหมือนฟอยล์ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการความเข้มของแสงสว่างมาก และเน้นการกระจายแสงที่กว้างขวาง อีกทั้ง การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุฝาครอบหลอดไฟในประเภทที่ไม่มีคุณสมบัติในการสะท้อนของแสงหรือควบคุมแสง จะทำให้ประสิทธิภาพการกระจายแสงลดลงอย่างมาก มีผลต่อค่าความเข้มของแสงสว่างในการลดต่ำลง รวมถึงการไม่ใช้วัสดุฝาครอบหลอดไฟ จะให้ค่าความเข้มของแสงสว่างต่ำที่สุด อาจจะมีผลต่อผู้ปฏิบัติงานในสำนักงานทั่วไป หรือในพื้นที่การใช้ประโยชน์ทั่วไป และยังส่งผลกระทบต่อสายตา ทำให้กล้ามเนื้อตาทำงานมากเกินไป เพราะบังคับให้รูม่านตาเปิดกว้างขึ้น เนื่องจากการมองเห็นนั้นไม่ชัดเจน ต้องใช้เวลาในการมองรายละเอียดนานขึ้น ทำให้เกิดความเมื่อยล้าของนัยน์ตาที่ต้องเพ่งขึ้นงาน เกิดอาการปวดตา มีนัยสำคัญ การหยิบจับโดยใช้เครื่องมืออุปกรณ์อาจผิดพลาดทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ หรือไปสัมผัสส่วนที่เป็นอันตราย [12] ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการใช้วัสดุฝาครอบหลอดไฟ โดยวัสดุฝาครอบหลอดไฟจึงมีความสำคัญมากในการออกแบบแสงสว่างในอาคาร เป็นอุปกรณ์ประกอบเสริมที่นำมาช่วยควบคุมการกระจายแสงและเพิ่มความเข้มของแสงสว่างไม่ให้ต่ำกว่ามาตรฐานตามที่กำหนดของกฎหมาย [9] ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุเหลือใช้ เป็นทางเลือกสำหรับ

การเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายแสงในสถานประกอบการ และสามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการเลือกวัสดุฝาครอบหลอดไฟเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานด้านการจัดแสงสว่างเพื่อความปลอดภัยในการทำงานของพนักงาน

นอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ประสิทธิภาพการเพิ่มความเข้มของแสงสว่างยังเป็นผลจากการออกแบบฝาครอบรูปทรงพีระมิดตัดยอดที่มีมุมเอียง 40 องศา ซึ่งทำหน้าที่บีบมุมลำแสง (Beam Angle) ให้แคบลงและรวมฟลักซ์การส่องสว่าง (Luminous Flux) ให้พุ่งตรงสู่ระนาบงานตามหลักทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ส่งผลให้ความเข้มของแสงสว่างในพื้นที่เป้าหมายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการไม่ใช้ฝาครอบ

จากผลการวิจัยยังสรุปอีกได้ว่าประเภทของวัสดุส่งผลต่อระดับความเข้มของแสงสว่างและการกระจายแสงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยนวัตกรรมฝาครอบรูปทรงพีระมิดตัดยอดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่องสว่างได้มากกว่าการไม่ติดตั้งฝาครอบอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มของแสงสว่าง (t-test) ที่พบว่าวัสดุทุกชนิดส่งผลให้ความเข้มของแสงสว่างเพิ่มขึ้นจากกลุ่มควบคุม (Mean = 30.4, S.D. = 0.55) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ โดยเฉพาะพอลิโพรไพลีนที่ให้ค่าเฉลี่ยสูงสุดถึง 77.6 ลักซ์ ($t = 135.58, p < 0.001$)

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบความสัมพันธ์ระหว่างประเภทวัสดุกับระดับความเข้มของแสงสว่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $F(8, 36) = 1,142.18, p < 0.001$ ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมบัติทางทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตและการเลือกมุมเอียง 40 องศาของฝาครอบ ที่ทำหน้าที่บีบมุมลำแสง (Beam Angle) และรวมฟลักซ์การส่องสว่าง (Luminous Flux) ให้พุ่งตรงสู่ระนาบงาน ผลการทดสอบรายคู่ด้วยวิธีของ Scheffe ยังยืนยันได้ว่าวัสดุกลุ่มที่มีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงสูง (High Reflective Materials) ได้แก่ พอลิโพรไพลีน และกระเบื้องอะลูมิเนียม มีค่าผลต่างความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean Difference) สูงที่สุดตามลำดับ เนื่องจากพอลิโพรไพลีนมีคุณลักษณะการสะท้อนแบบกระจก (Specular Reflection) ที่แม่นยำ ในขณะที่โพลีเอทิลีนมีการสะท้อนแบบฟุ้งกระจาย (Diffuse Reflection) ที่ช่วยลดความจ้าบาดตาได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ไกรฤทธิ ฤกษ์เกษม [11] ที่ระบุว่าพอลิโพรไพลีนเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเข้มของแสงสว่างในพื้นที่ที่ต้องการประสิทธิภาพสูงเนื่องจากลักษณะการกระเจิงแสงที่เป็นระบบ

ในทางตรงกันข้าม วัสดุประเภทพลาสติกใส แผ่นซีดี และกล่องกระดาษ แม้จะให้ความเข้มของแสงสว่างในระดับปานกลาง (40.6–44 ลักซ์) แต่ยังคงมีนัยสำคัญทางสถิติที่สูงกว่าการไม่ติดตั้งฝาครอบ ซึ่งการไม่ใส่ฝาครอบนั้นนอกจากจะให้ความสว่างต่ำสุดแล้ว ยังส่งผลเสียต่อสายตาเนื่องจากมุมตาต้องขยายตัวมากกว่าปกติเพื่อเพ่งรายละเอียดงานก่อให้เกิดความเมื่อยล้าและปวดศีรษะ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของกองความปลอดภัยแรงงาน [12] และมาตรฐาน IES [14] ที่เน้นย้ำถึงความสำคัญของอุปกรณ์ควบคุมทิศทางแสง (Optical Control Device) เพื่อป้องกันแสงจ้าและเพิ่มความปลอดภัยในสภาวะการทำงาน ผลการวิจัยนี้จึงชี้ให้เห็นว่าการใช้วัสดุเหลือใช้ที่มีค่าการสะท้อนแสงสูงร่วมกับการออกแบบรูปทรงที่เหมาะสม สอดคล้องกับหลักการเลือกวัสดุทางวิศวกรรมของ Budinski [15] ที่ว่าลักษณะพื้นผิวมีผลโดยตรงต่อการตอบสนองต่อพลังงานคลื่นแสง

โดยสรุป ข้อมูลจากการศึกษานี้เป็นเครื่องมือเชิงวิชาการที่สำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุเหลือใช้มาพัฒนาเป็นนวัตกรรมส่องสว่างที่มีต้นทุนต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงสภาพแวดล้อมการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐานกฎหมาย [9] และส่งเสริมการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืนในระดับองค์กรต่อไป

เมื่อพิจารณาภาพรวมของผลลัพธ์ทั้งหมด พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยมีศักยภาพสูงต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในบริบทปฏิบัติจริง ทั้งในการออกแบบนวัตกรรมฝาครอบหลอดไฟให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การพัฒนาแนวทางเพิ่มความเข้มของแสงสว่าง ตลอดจนการกำหนดมาตรการควบคุมและการปรับปรุงกระบวนการทำงานที่เกี่ยวข้องกับระบบแสงสว่างในพื้นที่ปฏิบัติงานให้มีความเหมาะสมและเกิดความปลอดภัยในการทำงานมากยิ่งขึ้น ผลการศึกษานี้จึงทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเชิงวิชาการที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจอย่างเป็นระบบ ทั้งในด้านการเลือกซื้อหรือเลือกใช้วัสดุสำหรับฝาครอบหลอดไฟอย่างมีเหตุผล ตลอดจนการส่งเสริมการพัฒนาวิศวกรรมด้านแสงสว่างในระดับองค์กร และการกำหนดนโยบายด้านพลังงานที่มุ่งสู่ความยั่งยืนในระยะยาวต่อไป นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงความเชื่อมโยงที่สำคัญในด้านการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาสร้างมูลค่าใหม่ (Upcycling) ช่วยลดปริมาณขยะ

และลดการใช้ทรัพยากรใหม่ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) อีกทั้งการที่หลอดไฟสามารถเพิ่มค่าความเข้มของแสงสว่างได้สูงกว่ากลุ่มควบคุมถึงร้อยละ 155.26 (กรณีวัสดุพอลิเมอร์) แสดงถึงศักยภาพในการลดภาระทางพลังงานไฟฟ้าในอาคาร เนื่องจากความสามารถในการรวมแสงที่เพิ่มขึ้นช่วยให้สามารถลดจำนวนจุดติดตั้งหลอดไฟหรือลดพิกัดกำลังไฟฟ้า (Watt) ของหลอดไฟลงได้ โดยที่ยังคงระดับความเข้มของแสงสว่างตามเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน และในเชิงเศรษฐศาสตร์พลังงานและสิ่งแวดล้อม อัตราการเพิ่มขึ้นของความเข้มส่องสว่างที่ได้จากการออกแบบโครงสร้างพีระมิดตัดยอดนี้ ส่งผลกระทบเชิงบวกต่อค่าการส่องสว่างในพื้นที่ (Luminous Efficacy of the Room) ซึ่งหมายถึงการได้มาซึ่งความสว่างที่เพียงพอโดยใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำลง ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และส่งผลต่อการลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในสถานประกอบการได้อย่างเป็นรูปธรรม

6. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการเปรียบเทียบความเข้มของแสงสว่างจากนวัตกรรมวัสดุหลอดไฟและประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ในการประดิษฐ์หลอดไฟแต่ละประเภทที่ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไปและการนำไปใช้ในการศึกษาครั้งต่อไป ดังนี้

6.1 ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

6.1.1 ควรพิจารณาการวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำกว่า แต่ยังสามารถให้ประสิทธิภาพการสะท้อนแสงและการกระจายแสงในระดับที่ดี เช่น วัสดุรีไซเคิล หรือวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อลดต้นทุนในการผลิตวัสดุหลอดไฟ และเพิ่มความยั่งยืนในการใช้งาน

6.1.2 ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการออกแบบหลอดไฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแสงที่สม่ำเสมอมากขึ้น โดยอาจพิจารณารูปทรงหรือโครงสร้างที่ช่วยให้แสงกระจายตัวได้ในทิศทางที่เหมาะสม และยังคงความเข้มของแสงสว่างไว้ได้สูงสุด

6.1.3 ควรทำทดลองเพิ่มเติมเกี่ยวกับประเภทของวัสดุหลอดไฟในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น สภาพแวดล้อมแสงน้อยหรือแสงมาก เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานในแต่ละประเภทของวัสดุนั้นๆ

6.2 การนำไปใช้ในการศึกษาครั้งต่อไป

6.2.1 การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มการทดลองในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น ในพื้นที่กลางแจ้ง

6.2.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของขนาดหรือความหนาของวัสดุที่นำมาจัดทำเป็นนวัตกรรมหรือประดิษฐ์เป็นวัสดุที่นำมาทดลอง

6.2.3 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของชนิดและประเภทของวัสดุอื่นๆ ที่หลากหลายร่วมด้วย

ทั้งนี้ การพัฒนาวัสดุหลอดไฟที่สามารถสะท้อนและกระจายแสงได้ดีและมีประสิทธิภาพ เป็นก้าวสำคัญในการเพิ่มคุณภาพการทำงานของระบบแสงสว่าง อีกทั้ง ประสิทธิภาพการใช้งานของหลอดไฟในอนาคต ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงาน ลดต้นทุน และเพิ่มอายุการใช้งานของหลอดไฟได้มากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Arpornthip T. Different schemes for replacing conventional light bulbs with LED bulbs for greatest return on investment. *J Sustain Energy Manag.* 2018;15(3):102–111.

[2] Ayala AMC. Does light-intensity physical activity moderate the relationship between sitting time and adiposity markers in adolescents. *Int J Pediatr Obes.* 2022;17(3):215–225.

- [3] Detchanthachack K, Limmongkon Y, Pruktharathikul V. Comparison of light intensity with area measurement vs. illuminance standard of foreign countries: Case study at workplaces in Lao People's Democratic Republic. *J Occup Health Saf.* 2023;39(2):78–89.
- [4] Mohammed NI, Alhmied F. Awareness of people about the effects of light intensity on blood pressure and heartbeats: A case study of YoonAl-Jawa Town. *J Health Med Res.* 2024;28(4):124–133.
- [5] สำนักงานประกันสังคม. สถานการณ์การประสูติหรือเจ็บป่วยเนื่องจากการทำงาน ปี 2563–2567 [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 22 พ.ย. 2568]. แหล่งที่มา:
https://www.sso.go.th/wpr/assets/upload/files_storage/sso_th/65e64958a0565ddc98ebc2ee6cc1fbf4.pdf
- [6] Silesian University of Technology. Impact of workplace lighting on employee safety. *J Occup Saf Ergon.* 2023;12(1):50–61.
- [7] Smith JA. *Guidelines for lighting design in multimedia classrooms.* New York: Academic Press; 2022.
- [8] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหาร จัดการ และดำเนินการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัยและสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2559. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 133 ตอนที่ 91 ก; 17 ต.ค. 2559.
- [9] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง มาตรฐานความเข้มของแสงสว่าง. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 135 ตอนพิเศษ 39 ง; 21 ก.พ. 2561.
- [10] กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. ประกาศกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาพการทำงานเกี่ยวกับระดับความร้อน แสงสว่าง หรือเสียง รวมทั้งระยะเวลาและประเภทกิจการที่ต้องดำเนินการ. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 135 ตอนพิเศษ 57 ง; 12 มี.ค. 2561.
- [11] ไกรฤทธิ์ ฤกษ์เกษม. *ประสิทธิภาพแผงสะท้อนแสงเหนือระนาบทำงานภายในอาคาร* [วิทยานิพนธ์สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2553. Available from:
<https://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2010.2028>
- [12] กองความปลอดภัยแรงงาน. *แนวทางการตรวจวัดและประเมินสภาพแวดล้อมในการทำงาน และการดำเนินการตามพระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554* [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 23 พ.ย. 2568]. แหล่งที่มา:
https://osh.labour.go.th/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=27&Itemid=20
- [13] สมาคมไฟฟ้าแสงสว่างแห่งประเทศไทย. *คู่มือแนวทางการออกแบบการส่องสว่างภายในอาคาร: Guidelines for Indoor Lighting Design* [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 27 ธ.ค. 2568]. แหล่งที่มา:
https://www.tieathai.org/files/ugd/470409_1c1dd80275e0445d91af87dccc0bd253.pdf
- [14] DiLaura DL, Houser KW, Mistrick RG, Steffy GR. *The lighting handbook: Reference and application.* 10th ed. New York: Illuminating Engineering Society; 2011.
- [15] Budinski KG, Budinski MK. *Engineering materials: Properties and selection.* 9th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson; 2010.
- [16] Exttech Instruments. *User's guide: Heavy duty light meter with PC interface model 407026.* Nashua, NH: FLIR Commercial Systems Inc.; 2014.
- [17] Montgomery DC. *Design and analysis of experiments.* 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2017.

การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบติดตามแสงอัตโนมัติ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Development and Performance Comparison of an Automatic Solar Tracking System for Photovoltaic Panels

สารสิน โคตรธาดา^{1*} ชลิดา โปะะมา¹ อนุรักษ์ บัวจรรณู¹ เทพวารินทร์ จาปาตักดิ์¹ ริคคาร์โด อลิคานดริ¹ และ สมรักษ์ กาญจโน¹

Sarasin Khotthada^{1*} Chalida Pohma¹ Anurak Buajaroon¹ Tepwarin Champasak¹ Riccardo Alicandri¹ and Somrak Kanchano¹

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

^{1*} Department of Energy and Logistics Engineering Faculty of Engineering and Technology Siam Technology College

*Corresponding author E-mail: sarasin.k@siamtech.ac.th

Received: December 9, 2025

Revise: December 26, 2025

Accepted: December 27, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ทำการพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตามแสงอัตโนมัติ โดยเปรียบเทียบกับระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคงที่ ซึ่งปัญหาที่พบในระบบคงที่คือการผลิตพลังงานที่ไม่สูงสุด เนื่องจากทิศทางของแผงเซลล์ไม่ได้ตั้งฉากกับแสงอาทิตย์ตลอดเวลา ส่งผลกระทบต่อปริมาณพลังงานที่ได้รับและความคุ้มค่าในการลงทุน การวิจัยนี้จึงมีความสำคัญในการนำเสนอแนวทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อการพัฒนาต้นแบบระบบติดตามแสงอาทิตย์อัตโนมัติ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงานระหว่างระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดคงที่กับระบบติดตามแสงอาทิตย์อัตโนมัติ ระบบติดตามที่ได้พัฒนาขึ้นใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง (LDR) จำนวน 5 ตัว เพื่อระบุทิศทางของแสงอาทิตย์และควบคุมเซอร์โวมอเตอร์เพื่อปรับองศาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตั้งฉากกับแสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองภายใต้สภาวะท้องฟ้าโปร่ง แสดงว่าระบบติดตามแสงอาทิตย์ผลิตพลังงานรวมได้ 91.18 Wh ซึ่งสูงกว่าระบบคงที่ซึ่งผลิตได้ 71.04 Wh คิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ 29% การปรับทิศทางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยเพิ่มปริมาณพลังงานที่ผลิตได้

คำสำคัญ: ระบบติดตามแสงอาทิตย์ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน LDR เซอร์โวมอเตอร์

Abstract

This research focuses on the development and performance evaluation of an automatic solar tracking photovoltaic system, compared with a fixed solar panel system. One of the main limitations of fixed solar panel systems is their inability to continuously face the sun perpendicularly, resulting in suboptimal energy generation and reduced investment efficiency. Therefore, this study aims to propose an effective approach to enhance energy production efficiency. The objectives of this research are to develop a prototype of an automatic solar tracking system and to compare the energy generation performance between a fixed solar panel system and an automatic solar tracking system. The developed tracking system utilizes five Light Dependent Resistors (LDRs) to detect the

direction of sunlight and control servo motors to continuously adjust the orientation of the solar panel so that it remains perpendicular to the sun's rays. Experimental results under clear-sky conditions indicate that the solar tracking system generated a total energy output of 91.18 Wh, which is higher than the 71.04 Wh produced by the fixed system. This represents an efficiency improvement of approximately 29%. The results demonstrate that adjusting the orientation of the solar panel significantly enhances energy production.

Keywords: Solar tracking system, Photovoltaic panel, Energy production efficiency, LDR, Servomotor

1. บทนำ

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำหรับในการสร้างไฟฟ้า ด้วยเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ร่วมกับระบบติดตามความเข้มแสง ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเสนอการออกแบบฮาร์ดแวร์และการนำระบบไปใช้เพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งของแผงโซลาร์เซลล์จะตั้งฉากต่อการแผ่รังสีแสงอาทิตย์เสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบติดตามแกนคู่ตามความเข้มแสงช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมให้ดีขึ้น [1] อีกทั้งยังมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับระบบติดตามแสงในเขตเมืองร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น [2] การนำประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาใช้เป็นเรื่องสำคัญที่ควรให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง เพราะนอกจากจะเป็นการลดปริมาณและประหยัดพลังงานเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันแล้ว ยังเป็นการนำพลังงานทดแทนที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้ให้เกิดคุณค่าและมีประสิทธิภาพด้วย เป็นพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษและเป็นพลังงานที่มีศักยภาพ โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้จำแนกการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน [3] สำหรับปัญหาที่พบในการผลิตไฟฟ้า คือความจำเป็นในการให้แผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสงอย่างเต็มที่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยเฉพาะในสถานที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของทิศทางแสงอาทิตย์และมุมของแสงอย่างต่อเนื่อง เช่น การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ หรือสิ่งกีดขวางต่างๆ การปรับทิศทางหรือมุมของแผงโซลาร์เซลล์ให้ตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้พัฒนาจรรยาบรรณการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ตามความเข้มแสงแบบ 1 แกน เพื่อแก้ปัญหาการรับแสงที่ไม่เต็มประสิทธิภาพนี้ [4] โดย วิศิษฎ์ มหานิลและคณะได้ทำการวิจัยระบบเฝ้าตรวจวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลและส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต ผลการวิจัยพบว่าสามารถใช้ทดแทนเครื่องมือวัดมาตรฐานไพเนอรอมิเตอร์ได้เป็นอย่างดี [5] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พัฒนาเครื่องมือบันทึกข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย Arduino สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำยิ่งขึ้น [6] รวมถึงมีการศึกษาการใช้เซ็นเซอร์รับภาพในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่สะอาด [7] ในด้านพื้นฐานทางวิศวกรรม พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของระบบที่เชื่อมต่อกับกริดขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น การส่งเสริมพลังงานทดแทน ซึ่งหนังสือ Photovoltaic Systems Engineering ได้ให้พื้นฐานวิศวกรรมที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบระบบโซลาร์เซลล์ (PV) เพื่อให้เข้าใจหลักการทางไฟฟ้า [8] ซึ่งรวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์และการเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator) ที่จำเป็นสำหรับการสร้างระบบควบคุม [9] และความเข้าใจเกี่ยวกับตัวต้านทานแสง (LDR) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เซ็นเซอร์สำคัญที่ใช้ในระบบติดตามแสง [10]

จากงานวิจัยและหลักการดังกล่าว ทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดที่ว่าแผงโซลาร์เซลล์ที่เคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าแผงที่ติดตั้งอยู่กับที่ จึงนำมาสู่การพัฒนาแผงโซลาร์เซลล์เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์โดยอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์และการควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานไฟฟ้าให้ได้ผลลัพธ์ที่มีค่าสูงสุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย (Methodology)

การดำเนินงานวิจัยอย่างตั้งแต่การออกแบบและสร้างระบบต้นแบบ การติดตั้ง ไปจนถึงกระบวนการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถทำซ้ำได้

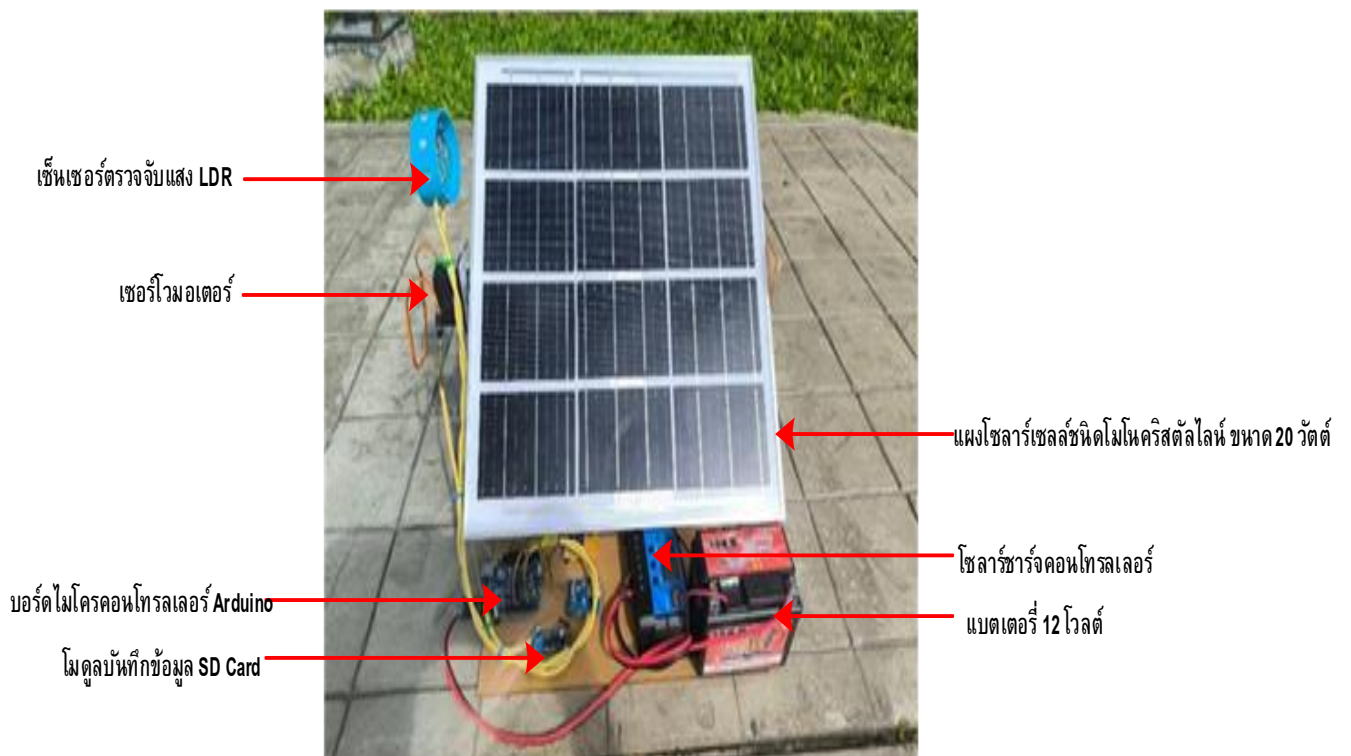
2.1 วัสดุและอุปกรณ์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการสร้างและทดสอบระบบต้นแบบประกอบด้วย:

- 1) แผงโซลาร์เซลล์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 20 วัตต์ จำนวน 1 แผง
- 2) โซลาร์ชาร์จคอนโทรลเลอร์ (Solar Charge Controller)
- 3) เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง LDR จำนวน 5 ตัว
- 4) เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)
- 5) แบตเตอรี่ 12 โวลต์
- 6) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino
- 7) โมดูลบันทึกข้อมูล SD Card

2.2 การออกแบบและสร้างระบบต้นแบบ

ระบบต้นแบบถูกออกแบบโดยคำนึงถึงกลไกการทำงานและวงจรควบคุมดังนี้



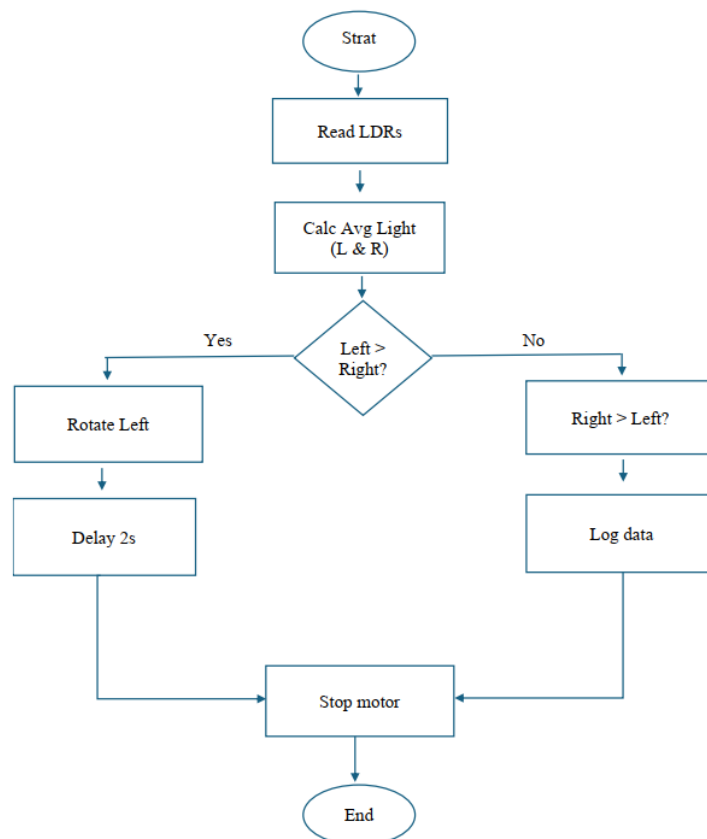
รูปที่ 1 ระบบติดตามแสงอัตโนมัติ สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

- 1) การออกแบบเชิงกลไก แผงโซลาร์เซลล์ถูกติดตั้งบนโครงสร้างที่สามารถปรับมุมได้โดยมีเซอร์โวมอเตอร์เป็นชุดขับเคลื่อน



รูปที่ 2 ระบบติดตามแสงอัตโนมัติ เซ็นเซอร์ตรวจจับแสง LDR

- 2) การออกแบบวงจรเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์ LDR ทั้ง 5 ตัวถูกจัดวางในลักษณะที่สามารถเปรียบเทียบความเข้มแสงจากทิศทางต่างๆ (ซ้าย-ขวา, บน-ล่าง) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 3 กระบวนการทำงานของระบบติดตามแสงอัตโนมัติ

- 3) กระบวนการทำงาน ระบบทำงานตามอัลกอริทึมที่สรุปได้จากผังภาพการทำงาน (Flowchart) ในรูปที่ 3 ของ โดยมีลำดับการทำงานคือ ระบบจะอ่านค่าความเข้มแสงจาก LDR ทุกตัว เปรียบเทียบค่าที่อ่านได้เพื่อหาทิศทางที่แสงมีความเข้มสูงสุด, จากนั้นจึงส่งคำสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนแฉกไปยังทิศทางนั้น หลังจากปรับมุมแล้ว ระบบจะทำการบันทึกข้อมูลแรงดันและกระแสไฟฟ้าลงใน SD Card และหน่วงเวลาสักครู่ก่อนจะเริ่มกระบวนการเปรียบเทียบแสงใหม่อีกครั้ง

2.3 ขั้นตอนการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

- 1) ระบบติดตามแสง (Tracking System) เปิดใช้งานระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อให้แผงปรับมุมตามดวงอาทิตย์ ตลอดเวลา
- 2) ระบบคงที่ (Fixed System) ปิดการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ และยึดแผงให้ทำมุมเอียงประมาณ 15 องศา กับแนวระนาบ โดยหันหน้าไปทางทิศใต้ ซึ่งเป็นมุมติดตั้งมาตรฐาน

ในแต่ละรูปแบบการทดลอง จะทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้า (V) และกระแสไฟฟ้า (A) ทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 09:00 น. ถึง 16:30 น. การทดลองสำหรับแต่ละระบบจะดำเนินการเป็นเวลา 3 วัน ภายใต้สภาวะอากาศที่มีท้องฟ้าโปร่ง และแสงแดดสม่ำเสมอ

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่บันทึกไว้ในไฟล์รูปแบบ .txt จาก SD Card จะถูกนำเข้าโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อคำนวณหา กำลังไฟฟ้า (W) จากสมการที่ 1 และพลังงานไฟฟ้า (Wh) จากสมการที่ 2

$$P=V \times I \quad (1)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)

I คือ กระแสไฟฟ้า (Amp)

และ
$$\text{พลังงานไฟฟ้า (Wh)} = \text{กำลังไฟฟ้า (W)} \times \text{เวลา (hr)} \quad (2)$$

ในแต่ละช่วงเวลา จากนั้นจะนำข้อมูลของทั้ง 3 วันในแต่ละระบบมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพและสร้างกราฟวิเคราะห์ผล

ชุดข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองนี้ เป็นพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบปริมาณ พลังงานที่ผลิตได้เชิงปริมาณโดยตรง ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไปเพื่อประเมินประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างแม่นยำ

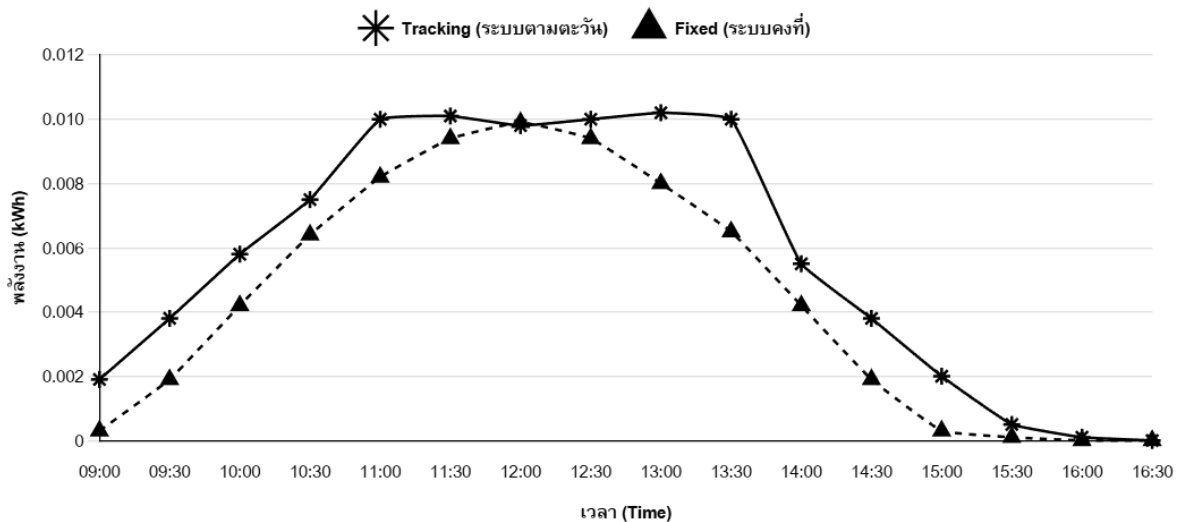
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล (Results and Discussion)

3.1 ผลการทดลอง

จากการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลอง 3 วันสำหรับแต่ละระบบ ได้ผลสรุปที่สำคัญดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปผลการผลิตพลังงานและมูลค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อวัน

ระบบ	พลังงานไฟฟ้ารวมเฉลี่ย (Wh)
ระบบติดตามแสงอัตโนมัติ	91.18
ระบบติดตั้งแบบคงที่	71.04



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพลังงานเฉลี่ยของระบบติดตามแสงและแบบคงที่

เมื่อพิจารณาแนวโน้มการผลิตพลังงานตลอดทั้งวันจากกราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย พบว่าระบบติดตามแสงสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าระบบคงที่อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในช่วงเวลา 10:30 น. ถึง 14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มของแสงอาทิตย์สูงสุด ความแตกต่างนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบติดตามแสงในการรักษาประสิทธิภาพการรับพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง

3.2 อภิปรายผลการวิจัย

- 1) ประสิทธิภาพการผลิตพลังงานผลการทดลองยืนยันอย่างชัดเจนว่าระบบติดตามแสงอัตโนมัติมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบติดตั้งแบบคงที่ โดยสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าถึง 29% สาเหตุหลักมาจากการที่ระบบสามารถปรับมุมของแผงให้ตั้งฉากกับรังสีดวงอาทิตย์ได้ตลอดเวลา ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับปริมาณโฟตอนสูงสุดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างจากระบบคงที่ซึ่งจะได้รับแสงในมุมที่เหมาะสมที่สุดเพียงช่วงเวลาสั้นๆ ของวันเท่านั้น
- 2) จากการวิจัยการพัฒนาระบบติดตามแสงอาทิตย์ของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในขนาดที่ใหญ่ขึ้นต่อไปในอนาคตได้

4.สรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Recommendations)

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการทดลองประสิทธิภาพของระบบติดตามแสงอัตโนมัติสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดลองยืนยันสมมติฐานหลักได้อย่างชัดเจนว่า ระบบติดตามแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูง

ถึง 29% เมื่อเทียบกับระบบติดตั้งแบบคงที่ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีการติดตามแสงในการเพิ่มผลผลิตและผลตอบแทนจากการลงทุนในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้

4.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เพื่อต่อยอดองค์ความรู้และพัฒนาาระบบให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้อย่างเต็มศักยภาพ คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคตดังนี้:

- 1) การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง: ควรมีการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในสภาพอากาศที่หลากหลายและในฤดูกาลที่แตกต่างกัน เพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานในสภาวะที่ไม่เอื้ออำนวย เช่น วันที่มีเมฆมากหรือฝนตก
- 2) การศึกษาความทนทานและอายุการใช้งานควรมีการทดสอบความทนทานของกลไกและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระยะยาว เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและอายุการใช้งานของระบบ
- 3) การพัฒนาระบบให้ง่ายและต้นทุนต่ำควรมีการวิจัยเพื่อพัฒนากลไกและระบบควบคุมให้มีความซับซ้อนน้อยลง ใช้วัสดุที่ทนทานแต่มีราคาถูก เพื่อลดต้นทุนการผลิตและทำให้เทคโนโลยีนี้เข้าถึงได้ง่ายขึ้น
- 4) การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวมควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเลือกใช้แบตเตอรี่และชาร์จคอนโทรลเลอร์ที่เหมาะสมยิ่งขึ้น รวมถึงการติดตั้งระบบระบายความร้อน เช่น พัดลมใต้แผง พร้อมทั้งเก็บข้อมูลอุณหภูมิของแผงเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตพลังงานให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Maharaja K, Joseph Xavier R, Jennifer Amla L, Pradeep Balaji P. Solar power generation optimization by intensity based dual axis solar tracking system. *Int J Appl Eng Res.* 2015;10(8):19457-65.
- [2] Barrios-Sánchez JM, Tlapanco-Ríos EI. Dual-Axis Solar Tracking System for Enhanced Photovoltaic Efficiency in Tropical Climates. *Sustainability.* 2025;17(7):3241.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. *Executive Summary / REPTIO Model.* กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน; 2557.
- [4] จิตริน แพทอง, รณวรรณ เฟิงเอี่ยม, ดำรงศักดิ์ เมืองกลาง. *วงจรรควบคุมการเคลื่อนที่ของแผงโซลาร์เซลล์ตามความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์แบบ 1 แกน* [ปริญญานิพนธ์]. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2558.
- [5] วิศิษฐ์ มหานิล, อภิชญา ศรีชัยกุล, อุมาพร พิพิธทอง. เครื่องบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และส่งข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์.* 2561;2561(2):31-44.
- [6] เอกรัตน์ นภกานต์, บุญยัง ปลั่งกลาง. *พัฒนาเครื่องมือบันทึกข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย Arduino สำหรับวิเคราะห์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์.* [สถานที่พิมพ์ไม่ปรากฏ]: [สำนักพิมพ์ไม่ปรากฏ]; 2562.
- [7] จอง บอ, โจ จ, ลี ค. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องติดตามตำแหน่งแสงอาทิตย์โดยใช้เซ็นเซอร์รับภาพ. *วารสารสมาคมอุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่างและไฟฟ้า.* 2013;27(5):67-73.
- [8] Messenger RA, Abtahi A. *Solar PV power systems engineering.* 3rd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2017.
- [9] นภัทร วัจนเทพินทร์. *อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม.* พระนครศรีอยุธยา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ; 2563. บทที่ 6, วงจรออปแอมป์เปรียบเทียบแรงดัน.
- [10] กิระวิทยา. *ตัวต้านทานแสง (LDR).* กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2562.

การปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าว

IMPROVING THE PROPERTIES OF CO-FUEL PELLETS FROM SEWAGE SLUDGE AND RICE STRAW

กฤติเดช ดวงใจบุญ

Krittidej Duangjaiboon

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่
จังหวัดกรุงเทพมหานคร

¹ Faculty of Engineering and Technology, Siam Technology College 46 Charunsanitwong Rd., Wat Thapra
Bangkokyai, Bangkok

*Corresponding author, E-mail : krittidej@smartenergysaving.co.th

Received: December 11, 2025

Revise: December 27, 2025

Accepted: December 27, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงจากกากตะกอนน้ำเสียที่มีค่าความร้อนต่ำและแตกหักง่ายเนื่องจากไม่มีตัวประสานในการยึดเกาะภายในโครงสร้าง ด้วยการใช้ฟางข้าวเป็นส่วนผสมในเม็ดเชื้อเพลิงผสมร่วมกับกากตะกอนน้ำเสีย โดยการศึกษาจะทำการอัดเม็ดเชื้อเพลิงผสมออกเป็น 5 สัดส่วน และทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ รวมทั้งประเมินผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ 2 รูปแบบ ได้แก่ระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม และจะใช้ค่า NPV, IRR, B/C และระยะเวลาคืนทุนเป็นดัชนีชี้วัด โดยผลจากการศึกษาพบว่าการใช้ฟางข้าวเป็นส่วนผสมร่วมกับกากตะกอนน้ำเสียสามารถเพิ่มค่าความร้อนได้ ซึ่งจะเพิ่มตามสัดส่วนของฟางข้าวที่เพิ่มขึ้น HHV 12.56 – 17.19 MJ/kg รวมถึงสัดส่วนฟางข้าวที่มากขึ้นช่วยเพิ่มความทนทานให้กับเม็ดเชื้อเพลิงผสมเนื่องจากมี lignin ที่เป็นตัวประสานในการยึดเกาะโครงสร้าง ช่วยลดโอกาสที่เม็ดเชื้อเพลิงจะแตกหักเสียหายได้เป็นอย่างดี ในส่วนการประเมินผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า การใช้เม็ดเชื้อเพลิงผสมในระดับปฏิบัติการตั้งแต่สัดส่วน SS50 : RS50 ขึ้นไปจะมีผลตอบแทนที่ดี โดยมีค่า NPV 6,060.29 – 48,328.03 บาท, IRR 4.97 – 31.19%, B/C 105.17 – 144.64%, และระยะเวลาคืนทุน 3.00 – 7.94 ปี ส่วนการใช้เม็ดเชื้อเพลิงผสมในระดับอุตสาหกรรมตั้งแต่สัดส่วน SS65 : RS35 ขึ้นไปจะมีผลตอบแทนที่ดี โดยมีค่า NPV 14,393,556.80 – 43,271,672.47 บาท, IRR 8.75 – 23.64%, B/C 111.11 – 135.17%, และระยะเวลาคืนทุน 2.85 – 3.96 ปี

คำสำคัญ: กากตะกอนน้ำเสีย, ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์, ฟางข้าว, เม็ดเชื้อเพลิงผสม

Abstract

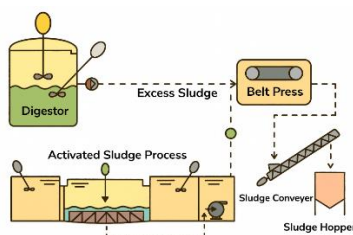
This study investigates an approach to improving the properties of fuel pellets derived from wastewater sludge, which typically exhibit low heating values and poor mechanical strength due to the absence of natural binding components within their structure. Rice straw was incorporated as a co-feedstock in the production of mixed sludge-based fuel pellets. Five mixing ratios were formulated and pelletized, after which their physical and energy-related properties were analyzed. In addition, an economic feasibility assessment was conducted at both laboratory and industrial scales using NPV, IRR, B/C ratio, and payback period as key performance indicators.

The results indicate that the incorporation of rice straw enhances the heating value of the mixed pellets, with the value increasing proportionally to the rice straw content HHV 12.56–17.19 MJ/kg. Higher proportions of rice straw also significantly improved pellet durability due to the presence of lignin, which acts as a natural binder that strengthens the structural cohesion of the pellets, thereby reducing the likelihood of breakage. From the economic evaluation, it was found that mixed fuel pellets at laboratory scale begin to show favorable economic returns from the SS50:RS50 ratio onward, yielding an NPV of 6,060.29–48,328.03 THB, an IRR of 4.97–31.19%, a B/C ratio of 105.17–144.64%, and a payback period of 3.00–7.94 years. At the industrial scale, positive economic feasibility was observed starting from the SS65:RS35 ratio, with an NPV of 14,393,556.80–43,271,672.47 THB, an IRR of 8.75–23.64%, a B/C ratio of 111.11–135.17%, and a payback period of 2.85–3.96 years.

Keywords: sewage sludge, financial return, rice straw, CO-fuel pellets

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติกน้ำกระป๋อง จะมีกากของแข็งที่เกิดจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานที่สะสมและก่อกวนเรียกว่ากากตะกอนน้ำเสีย ซึ่งกากตะกอนนี้เป็นสิ่งที่จะต้องทำการกำจัดทิ้ง โดยวิธีที่ผ่านมาก็คือโรงงานได้ทำการรวบรวมกากตะกอนให้ได้ปริมาณที่เพียงพอและส่งต่อไปยังหน่วยงานที่รับกำจัดกากตะกอนน้ำเสียภายนอก ซึ่งการส่งออกไปกำจัดจะมีค่าใช้จ่ายที่เป็นภาระให้กับทางโรงงานเป็นอย่างมาก



รูปที่ 1 ระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติกน้ำกระป๋อง

ที่ผ่านมาทางโรงงานมีความพยายามนำเอากากตะกอนน้ำเสียดังกล่าวไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ โดยวิธีที่เหมาะสมก็นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อไอน้ำชีวมวลที่เป็นต้นกำลังของโรงงานเอง ซึ่งสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเดิมที่เป็นถ่านหินลงได้บางส่วน แต่เนื่องจากองค์ประกอบหลักของกากตะกอนน้ำเสียมาจากสารอินทรีย์เป็นหลัก รวมทั้งการใช้กากตะกอนน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงไม่ได้ขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงจึงมีความหนาแน่นน้อย ส่งผลให้ค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียจึงมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลที่โรงงานใช้เป็นเชื้อเพลิงหลัก



รูปที่ 2 กากตะกอนน้ำเสียของอุตสาหกรรมแปรรูปพลาสติกน้ำกระป๋อง



รูปที่ 3 ฟางข้าวที่เป็นของเหลือใช้จากการเกษตร

จากปัญหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงกากตะกอนน้ำเสียจากที่กล่าวข้างต้น จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงค่าความร้อนให้เพิ่มขึ้นด้วยการผสมชีวมวลจากฟางข้าวที่เป็นของเหลือใช้จากการเกษตรและอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงโดยแบ่งออกเป็นสัดส่วนต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนและผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลจากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นแนวทางในการนำของเสียมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ทั้งในด้านการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียและเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานได้อีกทางหนึ่ง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญและที่มาของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสีย

กากตะกอนน้ำเสียเป็นของเสียประเภทของแข็งที่เกิดจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั้งในชุมชนและอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานอาหารทะเล โรงงานทอผ้า และอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์สูง ส่งผลให้เกิดกากตะกอนในปริมาณมาก การนำกากตะกอนไปกำจัด เช่น ฝังกลบหรือเผาโดยไม่ใช้ประโยชน์ มักก่อให้เกิดต้นทุนสูงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การแปรรูปกากตะกอนให้เป็น เชื้อเพลิงอัดเม็ด เป็นการเพิ่มมูลค่าสินทรัพย์เหลือทิ้ง (Value-added Waste) โดยสอดคล้องกับ

- แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)
- Waste-to-Energy
- นโยบายลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์

เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสียสามารถใช้ทดแทนพลังงานในหม้อไอน้ำ เตาอบ เตาเผาอุตสาหกรรม หรือระบบผลิตไอน้ำที่ต้องใช้เชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ชีวมวล

2.2 คุณสมบัติและองค์ประกอบทางเคมี (Chemical & Physical Properties)

แม้ว่ากากตะกอนจะมีความชื้นสูงในรูปแบบดิบ แต่หลังผ่านกระบวนการทำแห้งและอัดเม็ดแล้วจะเกิดคุณสมบัติสำคัญดังนี้

2.2.1 ค่าความร้อน (Calorific Value)

- ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 8–15 MJ/kg (กากตะกอนน้ำเสียทั่วไปไม่มีสารอินทรีย์ผสมอยู่)
- ในกรณีผสมวัสดุชีวมวลร่วม เช่น แกลบ ค่าความร้อนอาจสูงขึ้นถึง 15–18 MJ/kg

2.2.2 องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis)

โดยทั่วไปกากตะกอนจากโรงงานอาหารมีลักษณะทั่วไป

- Carbon (C): 30–50%
- Hydrogen (H): 4–7%
- Nitrogen (N): 3–6%
- Sulfur (S): 0.3–1.0%

2.2.3 องค์ประกอบขี้เถ้า (Ash Content)

- อาจสูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลทั่วไป (10–40%)
- มีผลต่อการเกิดตะกรันและการจัดการขี้เถ้าภายหลังการเผาไหม้

2.2.4 ความหนาแน่น (Bulk Density)

- ประมาณ 600–900 kg/m³ ช่วยลดต้นทุนขนส่งและสะดวกต่อการจัดเก็บ

2.3 เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับชีวมวล

เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับชีวมวล” หมายถึง เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดแบบผสม (Co-pelletized Solid Biofuel) ที่ได้จากการนำ กากตะกอนน้ำเสีย (Sewage Sludge) มาผสมกับ วัสดุชีวมวล ที่มีค่าความร้อนสูง เช่น แกลบ ขี้เลื่อย กะลาปาล์ม หรือเศษไม้บด เพื่อปรับปรุงสมบัติทางพลังงานและสมบัติทางกายภาพ ก่อนผ่านกระบวนการทำแห้ง บด และอัดขึ้นรูปตามมาตรฐานกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Pelletization Process)

ตามหลักการออกแบบเชื้อเพลิงในมาตรฐาน ISO 17225 (Solid Biofuels — Fuel Specifications and Classes) และ มอก. 2772 (เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด) วัสดุเชื้อเพลิงแบบผสมถูกจัดอยู่ในหมวด Non-Woody Pellet Fuels หรือ Alternative Biofuel Blends โดยกำหนดให้มีการควบคุมค่าความชื้น (Moisture), ปริมาณเถ้า (Ash), ค่าความร้อน (Calorific Value) และองค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบผลิตความร้อนและระบบหม้อไอน้ำอุตสาหกรรม

จากงานวิจัยส่วนใหญ่มีความเห็นตรงกันว่ากากตะกอนน้ำเสียเพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดคุณสมบัติ เช่น ความชื้นสูง ค่าความร้อนต่ำ และปริมาณเถ้า/โลหะหนักสูง (Werther & Ogada, 1999; Fytilli & Zabaniotou, 2008) อีกทั้งการใช้กากตะกอนน้ำเสียเพียงอย่างเดียวขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงยากจึงไม่เหมาะต่อการอัดเม็ดโดยมีตัวประสาน การผสมชีวมวลซึ่งมีโครงสร้างลิกนินสูงจะช่วยเพิ่มการยึดเกาะและความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิง (Mechanic Durability) และเพิ่มการติดไฟเมื่อใช้งาน (Pedersen et al., 2017)

2.4 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

- งานวิจัยของ Werther & Ogada (1999) พบว่ากากตะกอนน้ำเสียมีค่าความร้อนเพียงพอสำหรับเป็นวัสดุเชื้อเพลิง และเมื่อผสมกับชีวมวลอื่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้
- Fytilli & Zabaniotou (2008) รายงานว่าการอัดเม็ดช่วยเพิ่มความหนาแน่น ลดความชื้น และทำให้การเผาไหม้มีเสถียรภาพมากขึ้น
- Pedersen et al. (27) แสดงว่าการเผาไหม้กากตะกอนอัดเม็ดร่วมกับไม้สามารถลดการเกิดโลหะหนักในปล่องได้
- งานวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) พบว่ากากตะกอนจากอุตสาหกรรมอาหารมีค่าความร้อนสูงกว่าอุตสาหกรรมทั่วไป
- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่รายงานว่าการอัดเม็ดเมื่อใช้ร่วมกับแกลบสามารถเสริมประสิทธิภาพการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำได้ดี
- สวทช. (NSTDA) ศึกษาถ่านลิกไนต์ในกากตะกอนก่อนนำไปเป็นเชื้อเพลิง

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

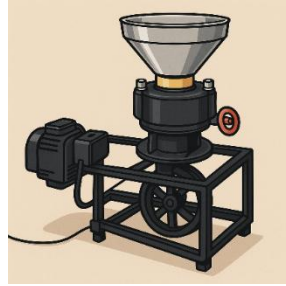
สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ จะมีขั้นตอนในการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับฟางข้าวในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนต่างๆ ที่กำหนดไว้ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติที่สำคัญในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง

3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงผสม

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาคุณสมบัติด้านต่างๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับฟางข้าวในการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงตามอัตราส่วนต่างๆ ที่กำหนดไว้ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติที่สำคัญในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน

- การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสม

ขั้นตอนนี้จะเป็นการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสมด้วยวิธีการอัดเย็นด้วยแรงอัดสูง (ใช้แรงอัดในการขึ้นรูปแบบคงที่) โดยเตรียมวัตถุดิบของกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวให้มีความพร้อมต่อการอัดขึ้นรูปก่อน โดยการศึกษาครั้งนี้จะใช้ฟางข้าวผสมกับกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการไล่ความชื้นเพื่ออัดขึ้นรูปตามสัดส่วนที่ระบุไว้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะต้องนำวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดมาลดความชื้นให้มีค่าไม่เกิน 35% (ความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสมและง่ายต่อการอัดขึ้นรูปจะอยู่ที่ 20-30% ซึ่งจะใช้เครื่องวัดความชื้นในการตรวจวัด) ก่อนอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab scale) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องอัดขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab scale)

ตารางที่ 1 สัดส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียต่อฟางข้าว (%)

อัตราส่วน	กากตะกอนน้ำเสีย (%)	ฟางข้าว (%)
1	0	100
2	50	50
3	65	35
4	75	25
5	100	0

สำหรับการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนฟางข้าวเป็นหลักเพียงชนิดเดียว มีความจำเป็นจะต้องใช้ตัวประสานในการอัดขึ้นรูปเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของวัสดุให้มากขึ้น (ในเม็ดเชื้อเพลิงผสมสัดส่วนต่างๆ จะมีกากตะกอนน้ำเสียซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานช่วยเสริมการยึดเกาะ) ดังนั้นในสัดส่วนดังกล่าว จะใช้น้ำแป้งมันเป็นตัวประสานในปริมาณ 25 %wt. (250-300 ml.) โดยประมาณ

- การวิเคราะห์องค์ประกอบของเม็ดเชื้อเพลิงผสม

1. การวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ประกอบไปด้วย ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ความชื้น (Moisture) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณสารระเหยง่าย (Volatile Matter) ตามมาตรฐาน ASTM E871, ASTM E872 และ ASTM D1102

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบนี้จะเป็นการเป็นการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงผสมตามมาตรฐาน ASTM D 5373 และ ASTM D 4239

3. วิเคราะห์หาค่าความร้อนของตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงผสมด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงผสม จะใช้เครื่องมือและวิธีการเดียวกับการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียจากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ IKA รุ่น C6000

- การวิเคราะห์หาปริมาณส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Non-Combustion)

เม็ดเชื้อเพลิงผสมร่วมสามารถวิเคราะห์หาปริมาณส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Non-Combustion) โดยนำตัวอย่างที่เหลือจากการเผาไหม้ที่เหลือจากกระบวนการวิเคราะห์หาค่าความร้อนด้วยการชั่งน้ำหนักและคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้} = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

A คือ น้ำหนักสุดท้ายของตัวอย่างหลังเผา (g)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

- การวิเคราะห์หาค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสม

สำหรับการหาค่าความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการประเมินอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์การแตกหัก โดยการทดสอบนี้จะปฏิบัติตามมาตรฐานทดสอบ DIN EN 15210-1 (รูปที่ 5) มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

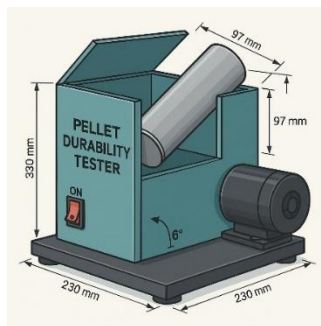
- นำเม็ดเชื้อเพลิงผสมจำนวน 500 g ลงในกล่องสี่เหลี่ยมที่มีขนาด (300 X 300 X 125) mm. ด้านในมีใบกวนทดสอบการหมุนที่ความเร็วรอบ 50 rpm. เป็นเวลา 10 min.
- นำมาร่อนด้วยตะแกรงขนาด 3.15 mm. และชั่งน้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงผสม
- คำนวณอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์การแตกหักจากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การแตกหัก} = \left(\frac{WF}{WI} \right) \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

WF คือ น้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงผสมหลังการทดสอบ (g)

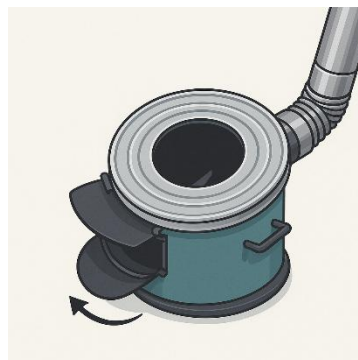
WI คือ น้ำหนักเม็ดเชื้อเพลิงผสมก่อนการทดสอบเริ่มต้น (g)



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบความทนทานเม็ดเชื้อเพลิง

- การศึกษาองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงผสม

ศึกษาองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ของเม็ดเชื้อเพลิงผสม ด้วยเตาเผาระดับปฏิบัติการ (รูปที่ 6) ที่ช่วงอุณหภูมิ 250-350 °C โดยทำการตรวจวัดแก๊สไอเสียได้แก่ CO₂, SO₂, NO_x, NO₂ ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สรุ่น testo 350 โดยจะควบคุมสภาวะในการเผาไหม้ให้มีค่าคงที่และใกล้เคียงกับเตาเผาหรือหม้อไอน้ำที่ใช้ในโรงงานตัวอย่าง โดยจะทำการทดสอบการเผาไหม้จากตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงผสมครั้งละ 30 นาที และใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สจากการเผาไหม้ยี่ห้อ TESTO รุ่น 350 ตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียประมาณ 1 นาที



รูปที่ 6 เตาเผาระดับปฏิบัติการสำหรับทดสอบการเผาไหม้

3.2 การศึกษาความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสม

สำหรับการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุของโครงการ เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{Benefit - Cost}{(1+i)^t} \quad (3)$$

สำหรับการคำนวณอัตราผลตอบแทนทางการเงิน เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{Benefit}{(1+IRR)^t} - \frac{Cost}{(1+IRR)^t} \quad (4)$$

สำหรับการคำนวณอัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุน เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$B/C = \sum_{t=0}^n \frac{\frac{Benefit}{(1+i)^t}}{\frac{Cost}{(1+i)^t}} \quad (5)$$

โดยที่

NPV	คือ	มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิตลอดอายุของโครงการ (Baht)
B/C	คือ	อัตราส่วนผลตอบแทนต่อการลงทุน (%)
IRR	คือ	อัตราผลตอบแทนทางการเงิน (%)
Benefit	คือ	มูลค่าผลตอบแทนในปีที่ t (Baht)
Cost	คือ	มูลค่าของต้นทุนในปีที่ t (Baht)
i	คือ	อัตราคิดลด (Discount Rate) (ไม่คิดอัตราดอกเบี้ย)
t	คือ	ปีของโครงการ
n	คือ	อายุของโครงการ (yrs)

สำหรับการคำนวณระยะเวลาคืนทุน เพื่อหาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{ปีสุดท้ายที่ยังไม่ได้รับเงินลงทุนคืนปลายงวด} + \frac{\text{เงินลงทุนที่ยังไม่ได้รับคืนต้นงวด}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \quad (6)$$

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล






4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงผสม

- การขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสม

ในขั้นตอนนี้จะทำการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลได้แก่ฟางข้าวและขี้เลื่อย ด้วยการอัดขึ้นรูปแบบเย็นตามสัดส่วนต่างๆ จำนวน 5 ตัวอย่าง และจะมีการใช้น้ำแข็งเป็นตัวประสาน

ประมาณ 25 %wt. (250-300 ml.) เฉพาะเม็ดเชื้อเพลิง SS0 : RS100 เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงผสมดังกล่าวไม่สามารถอัดขึ้นรูปได้ (เม็ดเชื้อเพลิงผสมสัดส่วนอื่นๆ ไม่มีการใช้ตัวประสาน เนื่องจากมีตะกอนน้ำเสียเป็นตัวช่วยประสาน) โดยการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงผสมดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนระหว่างกากตะกอนน้ำเสียต่อฟางข้าว

ลำดับ	อัตราส่วน (ร้อยละของน้ำหนัก)		ตัวอย่าง	เม็ดเชื้อเพลิง
	กากตะกอน(%)	ฟางข้าว (%)		
1	0	100	SS0 : RS100	
2	50	50	SS50 : RS50	
3	65	35	SS65 : RS35	
4	75	25	SS75 : RS25	
5	100	0	SS100	

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเม็ดเชื้อเพลิงผสม

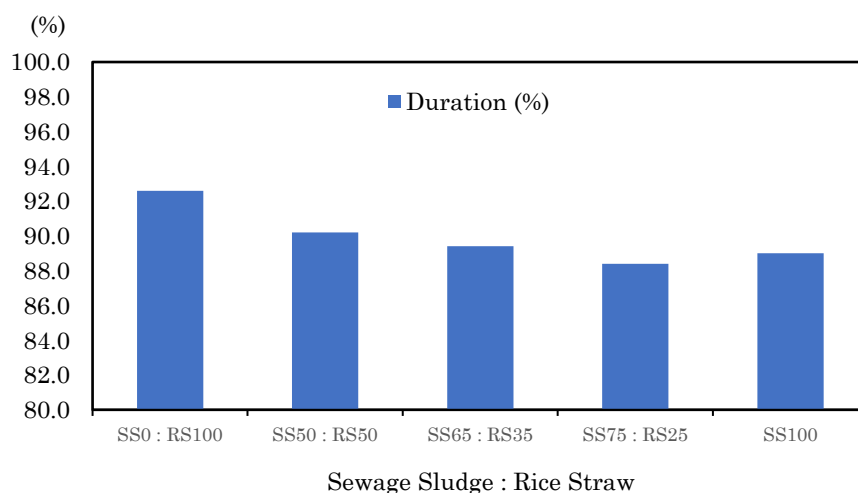
จากข้อมูลผลการวิจัยในตารางที่ 3 เป็นผลการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ องค์ประกอบธาตุและคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับฟางข้าว จากผลการวิเคราะห์พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนจะมีองค์ประกอบเป็นสารระเหยง่าย (Volatile Matter) และความชื้นเป็นองค์ประกอบหลัก โดยปริมาณสารระเหยง่ายจะแปรผันตามปริมาณสัดส่วนฟางข้าวที่เพิ่มขึ้น โดยเม็ดเชื้อเพลิงผสมจะมีสัดส่วนของสารระเหยง่ายเป็นลำดับแรก ลำดับรองลงมาจะเป็นสัดส่วนของความชื้น ที่เหลือจะเป็นสัดส่วนของเถ้าและคาร์บอนคงตัว ซึ่งจะไม่แตกต่างกันในเม็ดเชื้อเพลิงผสมแต่ละสัดส่วน สำหรับองค์ประกอบธาตุของเม็ดเชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนนั้นจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนที่มีปริมาณมากเป็นลำดับแรก รองลงมาจะเป็นธาตุไฮโดรเจนและลำดับสุดท้ายจะเป็นธาตุไนโตรเจนและธาตุซัลเฟอร์ที่มีปริมาณไม่มากนัก

และจากผลวิเคราะห์ยังพบอีกว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง จะแปรผันตามธาตุคาร์บอนที่อยู่ในเม็ดเชื้อเพลิงผสม โดยเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่มีสัดส่วนของฟางข้าวมากจะมีค่าคาร์บอนสูงตามไปด้วย และค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงผสมจะเรียงลำดับจากสัดส่วนมากไปหาน้อยตามลำดับ โดยเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือ SS0 : RS100 และเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่มีค่าความร้อนต่ำสุดคือ SS100 ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ข้างต้นทำให้ทราบได้ว่า หากใช้เชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสียเพียงอย่างเดียวจะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงผสมมีค่าต่ำ แต่หากต้องการเพิ่มค่าความร้อนให้มากขึ้น สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มสัดส่วนของฟางข้าว ก็จะสามารถแก้ปัญหาค่าความร้อนในเม็ดเชื้อเพลิงผสมต่ำลงได้ และเม็ดเชื้อเพลิงผสมในทุกสัดส่วนนั้นยังมีข้อดีอีกอย่างคือมีปริมาณธาตุซัลเฟอร์ที่ต่ำมาก ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Ersel Yilmaz และคณะ (Ersel et al., /จค) และ Longbo Jiang และคณะ (Longbo et al., 2014) เมื่อนำไปเผาแล้วจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศอีกด้วย

ตารางที่ 3 วิเคราะห์คุณสมบัติแบบประมาณ องค์ประกอบธาตุและคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียกับฟางข้าว

Parameter	กากตะกอนน้ำเสีย : ฟางข้าว					ค่ามาตรฐาน	ที่มา
	SS0 : RS100	SS50 : RS50	SS65 : RS35	SS75 : RS25	SS100		
Proximate analysis (%Weight)							
Moisture	5.50(±1.75)	21.68(±1.72)	33.56(±1.94)	40.12(±1.80)	47.91(±1.64)	-	-
Volatile Matter	86.02(±1.65)	65.48(±1.45)	52.06(±1.36)	43.26(±1.67)	37.38(±1.59)	-	-
Ash	8.34(±1.24)	9.52(±1.65)	9.17(±1.44)	7.75(±1.71)	8.34(±1.62)	<20.00	กรมโรงงาน
Fixed Carbon	0.14(±1.17)	3.33(±1.02)	5.21(±1.53)	8.88(±1.7)	7.22(±1.77)	>15.00	อุตสาหกรรม
Ultimate analysis (%Weight)							
C	40.55(±0.93)	36.68(±1.32)	29.02(±0.59)	18.08(±0.87)	39.71(±0.05)	-	-
H	7.01(±0.31)	5.34(±0.18)	4.56(±0.32)	7.73(±0.81)	6.94(±0.02)	-	-
N	0.00(±0.00)	1.27(±0.01)	1.29(±0.02)	0.54(±0.06)	5.58(±1.82)	-	กรมโรงงาน
S	0.00(±0.00)	1.00(±0.01)	1.12(±0.05)	1.00(±0.09)	1.01(±0.04)	<2.00	อุตสาหกรรม
Calorific value (MJ/kg)							
HHV	17.19(±0.21)	14.59(±0.23)	14.14(±0.26)	13.61(±0.33)	12.56(±0.39)	12.56	กรมโรงงาน อุตสาหกรรม
Non-Combustion (%Weight)							
Non-Combustion	9.10	7.90	8.30	7.70	12.70	-	-
Duration (%Weight)							
Duration	92.60	90.20	89.40	88.40	89.00	96.00	มอก.

- ผลการวิเคราะห์หาค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสม การทดสอบนี้จะนำเชื้อเพลิงผสมแต่ละสัดส่วนมาวิเคราะห์หาค่าความทนทานตามมาตรฐานทดสอบ DIN EN 15210-1 โดยผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าว

จากรูปที่ 7 คือผลการวิเคราะห์ความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าว จากการวิเคราะห์พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของฟางข้าวสูง จะมีความแข็งแรงและทนทานต่อการเสียหายได้ดี โดยสัดส่วน SS0 : RS100 จะมีความทนทานสูงสุดอยู่ที่ 92.6% และค่าความทนทานนี้จะเริ่มลดลงเมื่อสัดส่วนของฟางข้าวมีค่าน้อยลงตามไปด้วย โดยเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วน SS75 : RS25 จะมีค่าความทนทานต่ำสุดอยู่ที่ค่า 88.4% ทั้งนี้สาเหตุของความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมมาจาก lignin ที่อยู่ในฟางข้าวจะทำหน้าที่เป็นตัวยึดติดเส้นใยของ cellulose ให้อยู่

ด้วยกัน ดังนั้นหากมีปริมาณ lignin ในเม็ดเชื้อเพลิงผสมมากจะส่งผลต่อความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงให้สูงมากขึ้นตามไปด้วย

- ผลการศึกษาองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงผสม

การทดสอบนี้จะนำเชื้อเพลิงผสมแต่ละสัดส่วนมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบแก๊สไอเสียหลังจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงผสม โดยผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงผสมสัดส่วนต่างๆ

Parameter	กากตะกอนน้ำเสีย : ฟางข้าว				
	SS0 : RS100	SS50 : RS50	SS65 : RS35	SS75 : RS25	SS100
NO _x (ppm)	0	0	0	0	1.3
NO ₂ (ppm)	0	0	0	0	1.3
CO ₂ (%)	6.47	4.02	3.91	4.28	5.05
SO ₂ (ppm)	0	0	0	0	67
T Flue (°C)	193.7	198.3	200.1	204.3	219.0
T Amb (°C)	35.1	35.1	35.3	35.4	35.1

จากตารางที่ 4 เป็นการศึกษาองค์ประกอบแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้เม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากตรวจวัดกับค่ามาตรฐานของมลสารสำคัญที่ยินยอมให้ระบายออกจากปล่องตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2549 ได้แก่ NO_x, NO₂ และ SO₂ ซึ่งจะอ้างอิงกับเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลัก โดยผลจากการตรวจวัดแก๊ส NO_x และ NO₂ ซึ่งผลจากการตรวจวัดพบว่าเชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนมีค่าต่ำและอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน (NO_x, NO₂ < 200 ppm) ซึ่งมีสาเหตุมาจากเม็ดเชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนมีปริมาณ N ต่ำ ประกอบกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้จะอยู่ระหว่าง 250-350 °C ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมแก๊ส NO_x และ NO₂ นอกจากนี้ยังได้ทำการตรวจวัดแก๊ส SO₂ ซึ่งผลจากการตรวจวัดพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมทุกสัดส่วนจะมีค่า SO₂ ต่ำและอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน (SO₂ < 60 ppm) ยกเว้นสัดส่วน SS100 ที่ขึ้นรูปมาจากกากตะกอนน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของ S ดังนั้นเมื่อนำมาเผาไหม้จึงมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดแก๊ส SO₂ ขึ้นได้

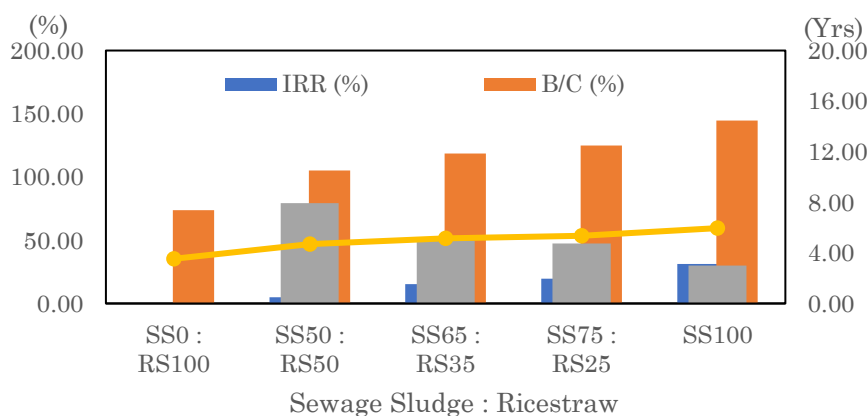
4.2 ผลการศึกษาความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสม

การศึกษาความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมทดแทนการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงเป็นการสรุปผลการศึกษาของผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์จากการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียร่วมกับฟางข้าวสัดส่วนต่างๆ ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยการวัดดัชนีชี้วัดคือ 4 ค่า ได้แก่ ผลตอบแทนรวมสุทธิ (Net Present Value : NPV) อัตราผลตอบแทนการเงินภายใน (Internal Rate of Return : IRR) อัตราผลตอบแทนต่อเงินลงทุน (Benefit/Cost : B/C) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period : PB) โดยการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนต่างๆ ประกอบด้วยตัวแปร 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 2 ตัวแปรด้านการลงทุนประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงผสมระดับห้องปฏิบัติการ (Investment Cost) ที่มีกำลังการผลิต (Capacity) 1.00 kg/hr ใช้งบลงทุน 20,650.00 Baht ในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงมีต้นทุนการผลิตได้แก่ค่าวัตถุดิบ (Material Cost) กรณีซื้อเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 0.20 Baht/kg ค่าใช้จ่ายในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงได้แก่ค่าไฟฟ้าและค่าแรง (Operating Cost) คิดที่ 1.00 Baht/kg และส่วนที่ 2 คือตัวแปรด้านผลตอบแทนได้แก่รายได้จากการลดการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย (Disposal Cost) ซึ่งมีมูลค่า 1.00 Baht/kg ซึ่งผลการศึกษาจะแสดงดังตารางที่ 5 และรูปที่ 8 โดยผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวที่สัดส่วนต่างๆ โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วน SS100 เมื่อใช้งานเพื่อทดแทนการใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแล้ว จะมีผลประหยัดค่าใช้จ่ายรวม 59.58% และได้รับ

ผลตอบแทนในรูปแบบของผลประโยชน์จากการลดค่าใช้จ่ายรวมได้สูงสุด (1.79 บาท/kg) มีค่า NPV 48,328.03 บาท IRR 31.19% B/C 144.64% และมี PB 3.00 yrs สำหรับเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่มีผลตอบแทนรองลงมาคือ SS75 : RS25 , SS65 : RS35 และ SS50 : RS50 ตามลำดับ ซึ่งผลตอบแทนนี้เป็นผลรวมระหว่างผลประโยชน์จากการลดการใช้ถ่านหินและผลประโยชน์จากการลดค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ดังนั้นเมื่อสามารถใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียมาก ก็จะสามารถลดค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสียซึ่งถือว่าเป็นผลตอบแทนอีกทางได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมมีความคุ้มค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่เม็ดเชื้อเพลิงผสมสัดส่วน SS0 : RS100 มีผลประโยชน์ค่าใช้จ่ายรวมและผลตอบแทนทางด้านการเงินต่ำมาก เมื่อใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนดังกล่าวจึงไม่มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 5 ตารางการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่สัดส่วนต่างๆ

Parameter	กากตะกอนน้ำเสีย : ฟางข้าว				
	SS0 : RS100	SS50 : RS50	SS65 : RS35	SS75 : RS25	SS100
Capacity (kg/yrs)	8,760.00	8,760.00	8,760.00	8,760.00	8,760.00
Investment Cost (Baht)	20,650.00	20,650.00	20,650.00	20,650.00	20,650.00
Material Cost (Baht/kg)	0.20	0.10	0.07	0.05	0.00
Operating Cost (Baht/kg)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Net Heating Value (MJ/kg)	17.19	14.59	14.14	13.61	12.56
Specific Energy Cost (Baht/MJ)	0.070	0.075	0.076	0.077	0.080
Energy Saving (MJ/kg)	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Energy Saving Cost (Baht/kg)	1.06	0.90	0.90	0.86	0.79
Disposal Cost (Baht/kg)	0.00	0.50	0.65	0.75	1.00
Total Saving Cost (Baht/kg)	1.06	1.40	1.55	1.61	1.79
Total Saving Cost (Baht)	9,285.91	12,306.03	13,552.41	14,068.78	15,657.80
%Energy Saving (%)	35.33	30.16	29.90	28.53	26.25
%Total Saving (%)	35.33	46.83	51.57	53.53	59.58
NPV (Baht)	-32,910.94	6,050.29	21,142.14	28,057.79	48,328.03
IRR (%)	N/A	4.97	15.41	19.67	31.19
B/C (%)	73.83	105.17	118.48	124.91	144.64
Payback Period (yrs)	N/A	7.94	4.98	4.74	3.00



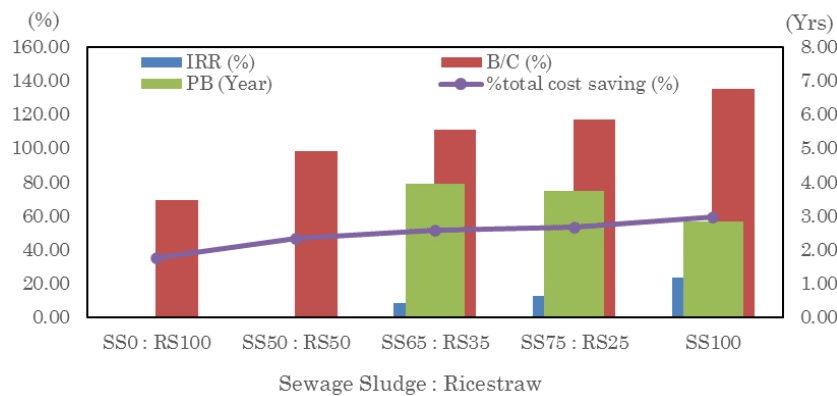
รูปที่ 8 ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าว

จากข้อมูลข้างต้น เป็นการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมด้วยการประเมินจากกำลังการผลิตของเครื่องอัดขนาดห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการศึกษาในระดับอุตสาหกรรมเพิ่มเติมในกรณีโรงงานแปรรูปปลาทูนากะป๋องตัวอย่างที่มีการใช้หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงแข็งสำหรับกระบวนการผลิตขนาด 15.00 ton/hr โดยมีอัตราการใช้เชื้อเพลิงถ่านหินเฉลี่ย 35,000.00 kg/day โดยการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมในระดับอุตสาหกรรมนี้ประกอบด้วยตัวแปร 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ตัวแปรด้านการลงทุนประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่มีกำลังการผลิต 1,500.00 kg/hr เป็นจำนวนเงิน 30,000,000.00 Baht และค่าใช้จ่ายในการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ได้แก่ ต้นทุนวัตถุดิบ (Material Cost) ในกรณีฟางข้าวมีค่าเท่ากับ 0.20 Baht/kg สำหรับค่าใช้จ่ายในการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าไฟฟ้าและค่าแรง (Operating Cost) คิดที่ 1.00 Baht/kg และส่วนที่ 2 คือตัวแปรด้านผลตอบแทนได้แก่รายได้จากการลดการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย (Disposal Cost) ซึ่งมีมูลค่า 1.00 Baht/kg และอ้างอิงอัตราดอกเบี้ยของธนาคารกรุงไทยเดือนเมษายน 2564 ที่อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ = 6.22% ซึ่งผลการศึกษาคงจะแสดงดังรูปและตารางดังต่อไปนี้ โดยผลการศึกษาผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมในระดับอุตสาหกรรมจะเป็นตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางการวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระดับอุตสาหกรรมที่สัดส่วนต่างๆ

Parameter	กากตะกอนน้ำเสีย : ฟางข้าว				
	SS0 : RS100	SS50 : RS50	SS65 : RS35	SS75 : RS25	SS100
Capacity (kg/yrs)	12,775,000.00	12,775,000.0	12,775,000.0	12,775,000.0	12,775,000.0
	0	0	0	0	0
Investment Cost (Baht)	30,000,000.00	30,000,000.0	30,000,000.0	30,000,000.0	30,000,000.0
Material Cost (Baht/kg)	0.20	0.10	0.07	0.05	0.00
Operating Cost (Baht/kg)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Net Heating Value (MJ/kg)	17.19	14.59	14.14	13.61	12.56
Specific Energy Cost (Baht/MJ)	0.070	0.075	0.076	0.077	0.080
Energy Saving (MJ/kg)	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Energy Saving Cost (Baht/kg)	1.06	0.90	0.90	0.86	0.79
Disposal Cost (Baht/kg)	0.00	0.50	0.65	0.75	1.00
Total Saving Cost (Baht/kg)	1.06	1.40	1.55	1.61	1.79
Total Saving Cost (Baht)	13,541,945.90	17,946,291.9	19,763,936.8	20,516,969.1	22,834,295.3
%Energy Saving (%)	35.33	30.16	29.90	28.53	26.25
%Total Saving (%)	35.33	46.83	51.57	53.53	59.58
NPV (บาท)	-	-	14,393,556.8	21,739,682.2	43,271,672.4
IRR (%)	43,024,144.28	1,637,710.21	0	1	7
B/C (%)	N/A	N/A	8.75	12.77	23.64
Payback Period (yrs)	69.63	98.76	111.11	117.02	135.17
	N/A	N/A	3.96	3.76	2.85

จากตารางที่ 6 และรูปที่ 9 คือผลการวิเคราะห์ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวในระดับอุตสาหกรรมที่สัดส่วนต่างๆ โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่าผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวในระดับอุตสาหกรรม เป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการกล่าวคือ เม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วน SS100 เมื่อใช้งานเพื่อทดแทนการใช้เชื้อเพลิงถ่านหิน จะมีผลประหยัดค่าใช้จ่ายรวม 59.58% และได้รับผลตอบแทนในรูปของผลประหยัดจากการลดค่าใช้จ่ายรวมได้สูงสุด (1.79 Baht/kg) มีค่า NPV 43,271,672.47 บาท IRR 23.64% B/C 135.17% และมี PB 2.85 yrs สำหรับเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่มีผลตอบแทนรองลงมาคือ SS75 : RS25 และ SS65 : RS35 ตามลำดับ ซึ่งผลตอบแทนนี้เป็นผลรวมระหว่างผลประหยัดจากการลดการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดและผลประหยัดจากการลดค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ดังนั้นเมื่อสามารถใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงที่มีสัดส่วนของกากตะกอนน้ำเสียมาก ก็จะสามารถลดค่ากำจัดกากตะกอนน้ำเสียซึ่งถือว่าเป็นผลตอบแทนอีกทางได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมมีความคุ้มค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่เม็ดเชื้อเพลิงผสมสัดส่วน SS50 : RS50 และ SS0 : RS100 มีผลประหยัดค่าใช้จ่ายรวมและผลตอบแทนทางด้านการเงินต่ำมาก (ค่า NPV มีค่าติดลบ, ค่า B/C ต่ำกว่า 100%) เมื่อใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนดังกล่าวจึงไม่มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 9 ผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียและฟางข้าวระดับอุตสาหกรรม

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะงานวิจัย

วัตถุประสงค์สำหรับเม็ดเชื้อเพลิงผสมจากกากตะกอนน้ำเสีย จะมีสารระเหยง่ายเป็นองค์ประกอบหลักและมีปริมาณต่ำสูง เมื่อนำไปเผาจึงมีปริมาณแก๊สเหลืออยู่ในปริมาณมาก ในส่วนขององค์ประกอบของธาตุพบว่ากากตะกอนน้ำเสียเมื่อเปรียบเทียบกับฟางข้าว กากตะกอนน้ำเสียจะมีปริมาณธาตุคาร์บอนต่ำ จึงทำให้มีค่าความร้อนน้อยกว่าฟางข้าว ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการในการพิจารณานำฟางข้าวมาผสมเพื่อเพิ่มค่าความร้อน

เมื่อนำกากตะกอนน้ำเสียและชีวมวลฟางข้าวมาขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงผสม จะทำให้เม็ดเชื้อเพลิงผสมมีปริมาณสารระเหยง่ายรวมทั้งองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามสัดส่วนของฟางข้าวที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนข้อดีอีกประการของการนำฟางข้าวมาใช้เป็นส่วนผสมร่วมกับกากตะกอนน้ำเสียคือ จะเพิ่มความทนทานให้กับเม็ดเชื้อเพลิงผสมซึ่งเกิดจาก lignin ที่อยู่ในฟางข้าว โดยผลจากการทดสอบความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสม SS0 : RS100 ที่ใช้ฟางข้าวเป็นส่วนผสมหลักแต่เพียงอย่างเดียวจึงทำให้มีปริมาณ lignin ในเม็ดเชื้อเพลิงผสมสูงส่งผลต่อค่าความทนทานที่ดีกว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนอื่นๆ ที่มีค่าต่ำกว่า

สำหรับความคุ้มค่าจากการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิงผสม จะมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการใช้งานเม็ดเชื้อเพลิง SS100 เนื่องจากเม็ดเชื้อเพลิงนี้จะกากตะกอนน้ำเสียมากที่สุด ซึ่งจะได้รับประโยชน์จากการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสียได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วนอื่นๆ รวมทั้งยังได้รับผลประโยชน์จากค่าความร้อนที่สามารถนำมาทดแทนการใช้ถ่านหิน อย่างไรก็ตามการใช้เม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วน SS100 ถึงแม้จะได้รับประโยชน์จากผลตอบแทนทางด้าน

เศรษฐศาสตร์ที่มีความคุ้มค่าที่สุด แต่จากผลการทดลองค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงผสมในสัดส่วน SS100 นี้กลับมีค่าความทนทานต่ำ เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายกับเม็ดเชื้อเพลิงผสมที่ต้องใช้ระยะเวลาการจัดเก็บนานเกินไปก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งต้องอาศัยการบริหารจัดการเรื่องการผลิตและการใช้งานให้สัมพันธ์กัน ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องเก็บรักษาเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตออกมาให้ยาวนานขึ้น อาจพิจารณาเรื่องการเพิ่มสัดส่วนของชีวมวลเพื่อเพิ่มค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงผสมให้สามารถจัดเก็บได้ยาวนานมากขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 2772-2562 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด: ข้อกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2562.
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม; ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์.
- [3] ASTM International. *Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels (ASTM E872)*. USA: ASTM International; 1982.
- [4] ASTM International. *Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels (ASTM E871)*. USA: ASTM International; 1982.
- [5] ASTM International. *Standard test method for ash in woods (ASTM D1102)*. USA: ASTM International; 2013.
- [6] Jiang L. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet. *Bioresource Technology*. 2014;166:435–443.
- [7] Kim B. Physical-chemical characterization of sludge and granular materials from a vertical flow constructed wetland for municipal wastewater treatment. *Water Science and Technology*. 2013;68(10):2257–2263.
- [8] Grube M. Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy. *Geoderma*. 2006;130:324–333.
- [9] Senesi N. Humic acids in the first generation of EUROSOLS. *Geoderma*. 2003;116:325–344.
- [10] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1999;25:55–116.
- [11] Fyttili D, Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU: Current practices and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12(1):116–140.
- [12] Pedersen AJ, et al. Co-combustion of sludge and biomass: Ash behavior and emissions. *Waste Management*. 2017;70:172–184.
- [13] International Organization for Standardization. *ISO 17225-6:2014 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets*. Geneva: ISO; 2014.
- [14] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 2772-2562 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด: ข้อกำหนดคุณลักษณะทางกายภาพและเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2562.

การอนุรักษ์พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง กรณีศึกษา : บริษัทผลิตและจำหน่ายอาหารแปรรูปแช่แข็งในอำเภอหาดิ จังหวัดสมุทรสาคร

ENERGY CONSERVATION IN LIGHTING AND COOLING SYSTEMS IN THE FROZEN SEAFOOD PRODUCTION PROCESS. CASE STUDY : FROZEN FOOD PRODUCTION AND SELLS COMPANY IN NADEE DISTRICT, SAMUTH SAKORN PROVINCE.

ประหยัด มีบุญเกิด

Prayat Meeboongirt

สาขาวิชาเทคโนโลยีจัดการอุตสาหกรรมและพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
Corresponding author, E-mail: prayat.mee@bkkthon.ac.th

Received: December 4, 2025

Revise: December 28, 2025

Accepted: December 29, 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งด้วยวิธีการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการด้วยมาตรการที่เหมาะสม เนื่องจากที่ผ่านมาบริษัทกรณีศึกษามีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งเป็นจำนวนมาก จากการศึกษาพบว่า คลังสินค้าแช่แข็ง มีการใช้พลังงานในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็น 338,109.74 KWh/ปี คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 1,254,387.13 บาท/ปี โดยมีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้า 61.87% จึงได้วิเคราะห์หามาตรการลดการใช้พลังงานเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการซึ่งมีหลายมาตรการที่ใช้ได้ แต่ได้เลือกใช้ 2 มาตรการหลักๆ ได้แก่ มาตรการลดปริมาณแสงสว่างที่เกินความจำเป็น โดยเปลี่ยนไปใช้หลอดแอลอีดี ที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูง และใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และอีกมาตรการหนึ่งเป็นการปรับเพิ่มอุณหภูมิทำความเย็นที่ตั้งไว้ต่ำเกินไปจากเดิม -30°C เป็น -22°C ด้วยใช้วิธีการวิเคราะห์เปรียบเทียบและประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งลงได้ 96,797.92 KWh/ปี คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 379,045.34 บาท/ปี หรือลดลง 30.22% โดยมีระยะเวลาคืนทุน 5 เดือน

คำสำคัญ: ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบทำความเย็น คลังสินค้าแช่แข็ง การอนุรักษ์พลังงาน

ABSTRACT

The purpose of this research is to study the appropriate methods for reducing energy consumption in the Frozen Seafood production process by analyzing the energy used in the process with the appropriate measures. Due to in the past, the case study company used a lot of electric energy in lighting and cooling systems in its Frozen Warehouse. From studying found that the total energy consumption in lighting and cooling systems is as high as 338,109.74 KWh/year, with an electric energy cost of 1,254,387.13 baht/year. It accounts for 61.87% of electric energy consumption. Therefore, we have analyzed the measures to reduce energy consumption in order to reduce costs in the process which there are many measures can be used but two main measures have been chosen namely the measure to reduce the amount of unnecessary light by changing to LED with high lighting

efficiency and low electricity consumption and also environmentally friendly and another one measure is to increase the cooling temperature from the original too low setting. By using comparative analysis and economic evaluation methods, the amount of electricity used in lighting and cooling systems in Frozen Warehouses can be reduced by 96,797.92 KWh/year and electric energy cost of 379,045.34 baht/year or a reduction of 30.22% with a payback period of 5 months.

Keywords: Lighting system, Cooling system, Frozen Warehouse, Energy conservation

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็ง มีความสำคัญในการสร้างรายได้ให้กับประเทศเป็นอย่างมาก โดยในปี 2568 มูลค่าการส่งออกอาหารทะเลแช่แข็งจำพวกกุ้งและผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีแนวโน้มปรับตัวดีขึ้น มีอัตราการเติบโตอยู่ที่ 3.3% จากความต้องการนำเข้ากุ้งในตลาดส่งออกสำคัญที่ทยอยฟื้นตัว ทั้งนี้การส่งออกอาหารทะเลแช่แข็งสามารถฟื้นตัวจากสถานการณ์ COVID-19 ได้เร็วกว่าผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่นๆ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการส่งออกอาหารแช่แข็งไปยังตลาดต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาและจีน ที่เติบโตได้ดีในช่วง 3 ปีที่ผ่านมา แม้สถานการณ์การส่งออกจะทยอยเริ่มกลับมา มีความเสี่ยงจากแนวโน้มเศรษฐกิจและการบริโภคในจีนที่มีแนวโน้มอ่อนแอลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความต้องการนำเข้าอาหารทะเลจากไทยในปีต่อไปได้ จากการขยายตัวด้านอุตสาหกรรมอาหารทะเลที่มีแนวโน้มดีขึ้น ก็จะทำให้มีการเพิ่มปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นด้วย ปริมาณความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี 2564-2567 ได้เพิ่มสูงขึ้นมาตลอดทุกปี แต่ในปี 2568 มีแนวโน้มการประมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับปี 2567 ซึ่งเป็นผลจากสภาพอากาศที่ไม่ร้อนมาก ฤดูฝนที่มาเร็วและปริมาณฝนที่มากจากปรากฏการณ์ลานีญารวมถึงการชะลอตัวของเศรษฐกิจทั้งของไทยและของโลก ตลอดจนมาตรการทางภาษีของสหรัฐอเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 1 [1]

การใช้ไฟฟ้า			
ปี	การใช้ไฟฟ้า (GWh)	การเปลี่ยนแปลง	
		GWh	ร้อยละ (%)
2564	190,468	3,422	1.8
2565	197,256	6,788	3.6
2566	203,923	6,666	3.4
2567	214,469	10,546	5.2
2568 ^f	204,679	-9,790	-4.6

หมายเหตุ: f เป็นข้อมูลประมาณการ

รูปที่ 1 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม [ที่มา : สำนักงานแผนนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2025, Nov. 10). สถานการณ์พลังงาน 6 เดือนแรกของปี 2568 และแนวโน้มพลังงานปี 2568, <https://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Forecast/ShorttermForecast/stimulation-half-2568-forecast2568.pdf> (Accessed Nov. 22, 2025).

เพื่อให้ธุรกิจดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง มีผลกำไรมากขึ้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาทบทวนต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต ตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 ได้กำหนดให้โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารควบคุม มีหน้าที่ต้องดูแลการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและดำเนินการอนุรักษ์พลังงานอย่างเป็นระบบ โดยมีขั้นตอนการปฏิบัติต่างๆ และบริหารการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม อันได้แก่ การปรับปรุงประสิทธิภาพของการเผาไหม้เชื้อเพลิง การป้องกันการสูญเสียพลังงาน การนำพลังงานที่เหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ การเปลี่ยนไปใช้พลังงานอื่น การปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าด้วยวิธีปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดในช่วงความต้องการใช้ไฟฟ้า

สูงสุดของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับภาระและวิธีการอื่นๆ ตามกำหนดในพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 [2]

โรงงานกรณีศึกษาในอำเภอนาดี จังหวัดสมุทรสาคร ดำเนินธุรกิจด้านผลิตและจำหน่ายอาหารแปรรูปแช่แข็งส่งจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ ด้วยปริมาณการผลิตเฉลี่ย 72 ตัน/ปี ด้วยยอดการผลิตที่เพิ่มขึ้นทุกปี จึงทำให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตเพิ่มสูงมากขึ้นและมีต้นทุนด้านพลังงานในการผลิตสินค้าสูงมากขึ้นด้วย

จากการศึกษาเบื้องต้น ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต จึงได้มีแนวทางในการวิเคราะห์สภาพปัจจุบันของการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีแนวคิดในการพิจารณาใช้มาตรการลดการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในห้องแช่แข็งอาหารทะเลด้วยวิธีการวิเคราะห์เปรียบเทียบประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ การพิจารณาเปลี่ยนชนิดโคมไฟส่องสว่าง, การปรับระยะห่างโคมไฟส่องสว่างให้เหมาะสม, การปรับลดอุณหภูมิทำความเย็นในห้องแช่แข็งและลดการรั่วไหลของอากาศเย็นในห้องแช่แข็ง เป็นต้น



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเล บริษัทกรณีศึกษา

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็ง บริษัทกรณีศึกษาในอำเภอนาดี จังหวัดสมุทรสาคร

2.2 เพื่อเสนอมาตรการในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในบริษัทกรณีศึกษา เพื่อให้สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้าลงได้อย่างน้อย 25%

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางในการลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในโรงงาน โดยได้ทำการตรวจสอบปริมาณการใช้พลังงานในบริษัท พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในห้องแช่แข็งในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งมากที่สุด คิดเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ใช้รวมกันเป็นจำนวน 348,109.74 KWh/ปี คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 1,254,389.13 บาท/ปี ดังนั้น จึงดำเนินการทดลองวิจัยเพื่อศึกษาหาแนวทางในการลดการใช้พลังงานใน 2 ระบบดังกล่าว โดยมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

3.1 ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในโรงงานอุตสาหกรรม และรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันในการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในห้องแช่แข็งอาหารทะเล โดยใช้ข้อมูลจากรายงานการใช้พลังงานไฟฟ้าประจำปี 2568 ในบริษัทกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม-มิถุนายน 2568 เพื่อนำมาพิจารณาปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในอดีตที่ผ่านมา

1) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง จะทำการสำรวจข้อมูลชนิดและจำนวนหลอดไฟ โคมไฟ ความเข้มในการส่องสว่างในห้องแช่แข็งอาหารทะเล เพื่อวิเคราะห์คำนวณหาค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง

2) ระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเล จะทำการสำรวจอุณหภูมิที่ใช้ทำความเย็นปัจจุบัน สภาพการกักเก็บความเย็นของห้องแช่แข็ง รอยรั่วต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์คำนวณหาค่าปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำความเย็น

3.2 วิเคราะห์หามาตรการในการลดการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในห้องแช่แข็งอาหารทะเล

1) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง หลังจากพิจารณาข้อมูลที่ได้จากทางบริษัทกรณีศึกษาทั้งที่ได้จากเอกสารและจากการตรวจวัดแล้ว จะมีการพิจารณามาตรการต่างๆ เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง ได้แก่ การปรับค่าความส่องสว่างให้เหมาะสมกับสภาพการทำงาน การเปลี่ยนชนิดหลอดไฟที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูง ใช้วิธีที่ให้แสงสว่างที่ตรงกับความต้องการเฉพาะตำแหน่ง การปิดไฟเมื่อไม่ใช้ เป็นต้น

2) ระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเล โดยพิจารณาหาวิธีการต่างๆ มาลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลง ได้แก่ การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิทำความเย็นให้เหมาะสม การพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องทำความเย็น การรั่วไหลของอากาศเย็นในระบบ การสูญเสียความเย็นขณะเปิด-ปิดประตูเข้าออกของพนักงาน เป็นต้น

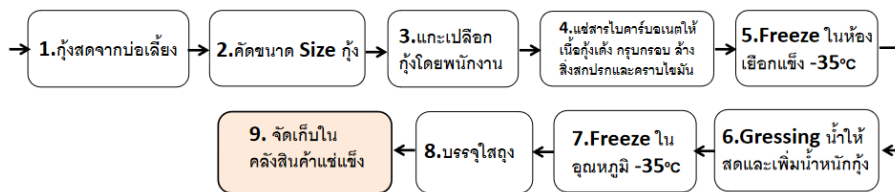
3.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของมาตรการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยวิธีเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุน

3.4 สรุปผลและเสนอแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

4. ผลการวิจัย

4.1 ข้อมูลสภาพปัจจุบันในการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในบริษัทกรณีศึกษา

กระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในบริษัทกรณีศึกษา โดยยกตัวอย่างกระบวนการผลิตกุ้งแช่แข็ง เป็นไปตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในบริษัทกรณีศึกษา

จากข้อมูลบริษัทกรณีศึกษามีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่าง ในอดีตที่ผ่านมา ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนมิถุนายน 2568 เป็นระยะเวลา 6 เดือน จำนวนวันทำงานสัปดาห์ละ 6 วัน แต่ละวันมีรอบการทำงาน 24 ชั่วโมง เฉลี่ย 720 ชั่วโมง/เดือน พบว่ามีการใช้หลอดไฟ โคมไฟ ในกระบวนการผลิตเป็น 3 ชนิด จำนวนทั้งสิ้น 289 หลอด มีเครื่องทำความเย็นในคลังสินค้าจำนวน 18 เครื่อง มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 547,081.10 KWh/ปี

พิจารณาจากสัดส่วนการใช้ปริมาณไฟฟ้าพบว่า พื้นที่คลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเลที่มีการใช้ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง โดยมีการใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8 มากเป็นอันดับ 1 คือ 197,730.72 KWh/ปี หรือคิดเป็น 35.97% และระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากเป็นอันดับ 2 คือ 140,379.02 KWh/ปี หรือคิดเป็น 25.90% ดังแสดงในตารางที่ 1

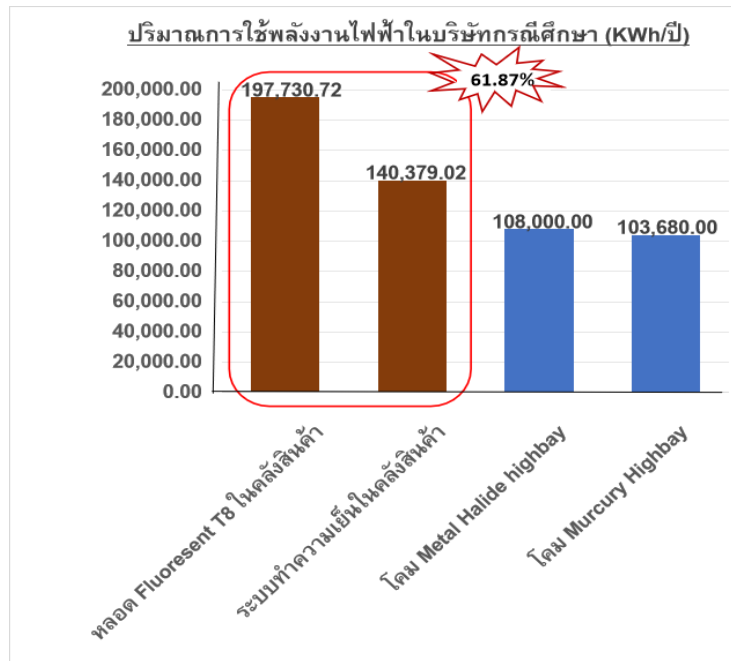
ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแช่แข็งในบริษัทกรณีศึกษา (ก่อนการปรับปรุง)

ชนิดหลอดไฟ โคมไฟ	กำลังไฟ จำนวน	กำลังไฟ พลังงานไฟฟ้า	ค่าไฟฟ้า	สัดส่วน	พื้นที่ใช้งาน
	(W) (หน่วย)	(KW) (KWh/ปี)	(บาท/ปี)	(%)	

http://jeet.siamtechu.net

หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8	36	627	22.57	197,730.72	733,580.97	35.97	คลังสินค้าแช่แข็ง
ระบบทำความเย็น	3,800	18	68.40	140,379.02	520,806.16	25.90	คลังสินค้าแช่แข็ง
หลอด Mercury High bay	400	30	12.00	103,680.00	384,652.80	18.86	ห้องเก็บวัสดุบรรจุ
หลอดเมทัลฮาไลด์ High bay	250	50	12.50	108,000.00	400,680.00	19.64	โซนผลิตหลัก
รวม	4,486	715	115.47	547,081.10	2,039,719.93	100.00	

หมายเหตุ : ค่าพลังงานไฟฟ้าคิดที่ 3.71 บาท/หน่วย



รูปที่ 4 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในบริษัทกรณีศึกษา (KWh/ปี) ก่อนการปรับปรุง

จากรูปที่ 4 พื้นที่คลังสินค้าแช่เย็น มีสัดส่วนการใช้พลังงานระบบแสงสว่างและพลังงานระบบทำความเย็นรวมกันมากถึง 61.87% ของปริมาณการใช้พลังงานทั้งหมด จึงได้เลือกระบบการใช้พลังงานทั้งสองระบบดังกล่าว ซึ่งเป็นพื้นที่คลังสินค้าแช่แข็งในกระบวนการที่ 9. ตามรูปที่ 3 มาทำการวิเคราะห์หามาตรการลดการใช้พลังงาน

หลังจากที่ได้พิจารณาที่จะทำการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในพื้นที่คลังสินค้าแช่เย็นแล้ว จึงได้เก็บข้อมูลต่างๆ ในสภาพการผลิตปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งในระบบแสงสว่าง และระบบทำความเย็น ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ข้อมูลปัจจุบันในระบบไฟฟ้าแสงสว่างคลังสินค้าแช่แข็ง บริษัทกรณีศึกษา (ก่อนการปรับปรุง)

จุดตรวจสอบ	มาตรฐาน	สภาพจริงปัจจุบัน
ชนิดโคมไฟ หลอดไฟ	-	หลอด Fluorescent Lamp T8
จำนวนโคมไฟ หลอดไฟ	-	627 หลอด
ปริมาณความเข้มแสงสว่าง	เฉลี่ย 200 ลักซ์	เฉลี่ย 240.87 ลักซ์
ชั่วโมงการใช้งานหลอดไฟฟ้า	เปิดเมื่อใช้งาน	เปิดตลอด 24 ชั่วโมง
การบำรุงรักษาทำความสะอาดหลอดไฟ	ตามแผนการบำรุงรักษา	มีฝุ่น คราบสิ่งสกปรกที่หลอดและโคมไฟ

ตารางที่ 3 ข้อมูลปัจจุบันในระบบทำความเย็นคลังสินค้าแช่แข็ง บริษัทกรณีศึกษา (ก่อนการปรับปรุง)

จุดตรวจสอบ	มาตรฐาน	สภาพจริงปัจจุบัน
การตั้งอุณหภูมิห้องแช่เย็น (Chiller)	0 - +5°C	0°C
การตั้งอุณหภูมิห้องแช่แข็ง (Freeze)	-18 - -30°C	-30°C
การตั้งอุณหภูมิห้องเยือกแข็ง (Deep freeze)	-35 - -45°C	-35°C
ช่องหรือรอยรั่วที่ผนังห้องแช่แข็ง	ต้องไม่มีรอยรั่ว	ไม่พบรอยรั่วใดๆ
ม่านพลาสติกที่ประตูทางเข้า	ต้องติดม่านพลาสติก	ติดตั้งม่านพลาสติกแล้ว
ความถี่ในการเปิด-ปิดประตูคลังสินค้าแช่แข็ง	เฉลี่ยไม่เกิน 5 ครั้ง/วัน	มีการเปิด-ปิดเฉลี่ย 20 ครั้ง/วัน
การบำรุงรักษาทำความสะอาดอุปกรณ์ทำความเย็น	ตามแผนการบำรุงรักษา	มีฝุ่น สิ่งสกปรกเกาะที่หน้าจับเกาะ

4.2 วิเคราะห์หามาตรการในการลดการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเล

หลังจากเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพปัจจุบันในการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งอาหารทะเลแล้ว ได้นำมาพิจารณาวิเคราะห์ศึกษาหามาตรการในการที่จะนำมาสู่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 การลดการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่าง

- มาตรการลดปริมาณการส่องสว่างที่เกินความจำเป็นด้วยการเปลี่ยนไปใช้หลอด LED ที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงและช่วยลดการใช้พลังงาน จากเดิม ในคลังสินค้าแช่แข็งใช้หลอดฟลูออโรเรสเซนต์ T8, 36 วัตต์ จำนวน 627 หลอด ไปใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8, 25 วัตต์ จำนวน 627 หลอด

จากการตรวจวัดปริมาณแสงในคลังสินค้าแช่แข็งด้วยวิธีการวัดแสงเฉลี่ยแบบพื้นที่ทั่วไป (Area Measurement) โดยที่คลังสินค้าแช่แข็งบริษัทกรณีศึกษา มีการติดตั้งหลอดโคมไฟฟลูออเรสเซนต์ที่มีระยะห่างระหว่างหลอดเท่ากันและมีจำนวนแถวมากกว่า 2 แถว (Symmetrically Spaced Luminaires in Two or More Rows) จึงหาค่าปริมาณแสงเฉลี่ยจากสูตรข้างล่าง [3] [4]

$$\text{แสงเฉลี่ย} = [R (N - 1)(M - 1) + Q(N - 1) + T(M - 1) + P]/NM \tag{1}$$

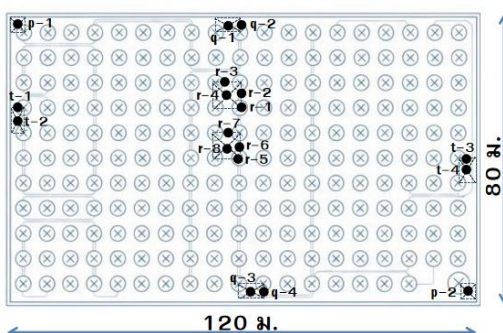
N = จำนวนหลอดไฟต่อแถว, M = จำนวนแถว

โดย r1 – r8 = ส่วนในและกลางห้อง (typical inner bay and centrally located bay) และ R = ค่าเฉลี่ยของ r1-8

q1 – q4 = กึ่งกลางขอบข้างห้อง (in two typical half bays on each side of room) และ Q = ค่าเฉลี่ยของ q1-4

t1 – t4 = กึ่งกลางขอบหัว-ท้ายห้อง (in two typical half bays on each end of room) และ T = ค่าเฉลี่ยของ t1-4

p1, p2 = มุมห้อง (in two typical corner quarter bays) และ P = ค่าเฉลี่ยของ p1 และ p2



รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณแสงเพื่อหาค่าแสงเฉลี่ยในคลังสินค้าแช่แข็งบริษัทกรณีศึกษา

ผลการตรวจวัดปริมาณแสงสว่าง ได้ค่าแสงเฉลี่ย 240.87 ลักซ์ ซึ่งสูงเกินความจำเป็น สูงเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ในกฎกระทรวง กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. ๒๕๕๙ [5]

แสดงว่าโรงงานสามารถที่จะลดปริมาณการใช้แสงสว่างที่เกินความจำเป็นนี้ได้ จึงได้ทดลองเปลี่ยนหลอดไฟไปใช้หลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงและช่วยลดการใช้พลังงาน จากเดิมในคลังสินค้าแช่แข็งใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ T8, 36 วัตต์ จำนวน 627 หลอด เปลี่ยนไปใช้หลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8, 25 วัตต์ จำนวน 627 หลอดเท่าเดิม จากนั้นทำการวัดปริมาณแสงสว่างตามสมการ (1) อีกครั้ง ผลปรากฏว่าได้ค่าแสงเฉลี่ย 205.20 ลักซ์ ยังอยู่ในค่าไม่ต่ำกว่า 200 ลักซ์ จึงสรุปได้ว่า การเปลี่ยนไปใช้หลอด Fluorescent LED T8, 25 วัตต์ แทนหลอด Fluorescent T8, 36 วัตต์ สามารถทำได้ เนื่องจากยังให้ปริมาณแสงสว่างได้ตามค่ามาตรฐาน

จึงทำการวิเคราะห์ประเมินผลการอนุรักษ์พลังงานจากการเปลี่ยนหลอดไฟครั้งนี้

ก่อนเปลี่ยนหลอดไฟ เดิมใช้ T8, 36 W จำนวน 627 หลอด (209 โคม ๆ ละ 3 หลอด) คำนวณการใช้กำลังไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 36 \text{ W} \times 627 &= 22,572 \text{ W} &= 22.57 \text{ KW} \\
 \text{ใช้พลังงานไฟฟ้า} &22.57 \text{ Kw} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ วัน} &= 197,730.72 \text{ KWh/ปี} \\
 \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (คิดหน่วยละ 3.71 บาท)} &&= 197,730.72 \times 3.71 = 733,580.97 \text{ บาท/ปี}
 \end{aligned}$$

หลังเปลี่ยนหลอดไฟ ไปใช้ LED T8, 25 W จำนวน 627 หลอด (209 โคม ๆ ละ 3 หลอด) คำนวณการใช้กำลังไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 25 \text{ W} \times 627 &= 15,675 \text{ W} &= 15.68 \text{ KW} \\
 \text{ใช้พลังงานไฟฟ้า} &15.68 \text{ Kw} \times 24 \text{ h} \times 365 \text{ วัน} &= 137,313 \text{ KWh/ปี} \\
 \text{ใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง} &&= 197,730.72 - 137,313 = 60,417.72 \text{ KWh/ปี} \\
 \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า (คิดหน่วยละ 3.71 บาท)} &&= 137,313 \times 3.71 = 509,431.23 \text{ บาท/ปี} \\
 \text{คิดเป็นต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง} &&= 733,580.97 - 509,431.23 \\
 &&= 224,149.74 \text{ บาท/ปี หรือลดลง 30.56\%}
 \end{aligned}$$

นอกจากนี้ ยังมีมาตรการเสริม ดังต่อไปนี้

- **มาตรการทำความสะอาดโคมไฟและหลอดไฟ** ทำทุก ๆ 3-6 เดือน การทำความสะอาดโคมไฟหลอดไฟนี้ไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยตรง แต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างมากขึ้น ช่วยรักษาความสว่างของหลอดไฟไว้ได้ดีกว่าเดิม

- **มาตรการจัดอบรมด้านพลังงานให้กับพนักงานในบริษัท** เพื่อให้ความรู้แก่พนักงาน เห็นประโยชน์ของการจัดการด้านพลังงานไฟฟ้าแสงสว่างในโรงงาน และช่วยสร้างจิตสำนึกด้านการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในบริษัทลงได้โดยทางอ้อม

4.2.2 การลดการใช้พลังงานในระบบทำความเย็น

- **มาตรการปรับอุณหภูมิในระบบทำความเย็นที่เหมาะสม** คลังสินค้าแช่แข็งมีขนาดกว้าง 80 เมตร ยาว 120 เมตร สูง 10 เมตร ปัจจุบันมีการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ -30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดจากมาตรฐานที่กำหนดไว้ -18 - -30 องศาเซลเซียส การตั้งไว้ต่ำมากเกินไป ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 140,379.02 KWh/ปี แม้จะมีการใช้ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยก็ตามก็ยังถือว่าค่อนข้างสูง

ตามมาตรฐานข้อมูลของกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา (FDA) อาหารในช่องแช่แข็งควรเก็บที่อุณหภูมิ 0° F (-18° C) หรือต่ำกว่า เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย FDA กำหนดให้เก็บเนื้อสัตว์ อาหารทะเลที่อุณหภูมิ 0° F (-18° C) หรือต่ำกว่า [6] [7] [8]

ดังนั้น จึงได้ทำการทดลองปรับเพิ่มอุณหภูมิในการทำความเย็นจาก -30 องศาเซลเซียส เป็น -22 องศาเซลเซียส ผลที่ได้จากการปรับเพิ่มอุณหภูมิในครั้งนี้ ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเฉลี่ย 20 Kwh/วัน จากเดิมเฉลี่ย 120 KWh/วัน ลดลงเหลือเฉลี่ยประมาณ 101 KWh/วัน หรือจากเดิม 140,379.02 KWh/ปี คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 520,806.16 บาท/ปี ลดลงเหลือ 104,019.02 KWh/ปี คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 385,910.56 บาท/ปี พลังงานไฟฟ้าลดลง $140,379.02 - 104,019.02 = 36,360$ KWh/ปี ทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง 134,895.60 บาท/ปี หรือคิดเป็น 25.90% โดยที่คุณภาพอาหารแช่แข็งยังคงเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง ทดสอบด้วยการแทงเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิความเย็นใน Packaging บรรจุอาหารแช่แข็งแล้ว ได้ค่าความเย็น -19 ถึง -20 องศาเซลเซียส ยังอยู่ในค่ามาตรฐานการแช่แข็งที่ต้องไม่สูงเกินกว่า -18 องศาเซลเซียส และยังมีการตรวจสอบ Packaging แล้วพบว่าไม่เปียกน้ำจากการละลายของน้ำแข็ง จึงสรุปได้ว่า การปรับเพิ่มอุณหภูมิทำความเย็นครั้งนี้ สามารถใช้ได้ คลังสินค้าแช่แข็งของโรงงานกรณีศึกษา

นอกจากนี้ ยังมีมาตรการมาตรฐานการทำความสะอาดอุปกรณ์ในระบบทำความเย็นเสริม ดังต่อไปนี้

- **การทำความสะอาดอีวาพอเรเตอร์ (Evaporater) หรือคอยล์เย็น** ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบทำความเย็น ทำหน้าที่รับสารทำความเย็นเหลวมาทำให้เกิดการระเหยกลายเป็นไอ กระบวนการนี้จะช่วยดูดซับความร้อนจากอากาศโดยรอบ ทำให้อากาศบริเวณนั้นเย็นลง เมื่อพื้นที่ส่งผ่านความร้อนสกปรกเนื่องจากมีสิ่งสกปรก หรือตะกอนน้ำจับเกาะ ก็จะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนถูกขัดขวาง ทำให้ความดันด้านความดันต่ำลดลง จนในที่สุดสวิตช์ป้องกันความดันต่ำจะทำงาน ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าได้

- **การทำความสะอาดคอนเดนเซอร์ (Condensor)** หากคอนเดนเซอร์มีสิ่งสกปรก หรือมีตะกอนน้ำจับเกาะผิวส่งผ่านความร้อน ก็จะขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อน ความดันใช้งานด้านความดันสูง ก็จะสูงขึ้นจนในที่สุด สวิตช์ป้องกันความดันสูงจะทำงาน ทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องได้ นอกจากนี้เครื่องอัดอากาศก็จะได้รับอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นเหตุให้ชำรุดเสียหายได้ง่าย เมื่อความดันด้านความดันสูงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงปริมาตรจะต่ำลง เวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องจึงนานขึ้นตามสัดส่วนของการลดต่ำลงของขีดความสามารถในการทำความเย็น จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น ให้ทำความสะอาดให้ใช้น้ำยาฉีดเข้าไปแล้วล้างด้วยน้ำ หรือทำความสะอาดโดยใช้แปรงขัด การทำความสะอาดคอยล์และคอนเดนเซอร์ทุกๆ 6 เดือน จะช่วยให้เครื่องความเย็นมีประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงานไฟฟ้าและลดค่าไฟฟ้าลงได้ [9]

- **มาตรการลดความถี่ในการเปิด-ปิดประตูคลังสินค้าแช่แข็ง** จากเดิมเฉลี่ยวันละ 20 ครั้ง เหลือวันละไม่เกิน 10 ครั้ง โดยจัดทำเป็นตารางเวลามาตรฐานในการเปิด-ปิดประตูคลังสินค้าแช่แข็ง เพราะทุกครั้งที่เปิดประตู ความเย็นในห้องจะไหลออกไปและอากาศร้อนจากภายนอกจะไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้ระบบทำความเย็นต้องทำงานหนักขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิให้กลับมาเย็นเท่าเดิม ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากขึ้น

- **มาตรการจัดอบรมพนักงานฝ่ายผลิตให้เข้าใจพื้นฐานระบบทำความเย็น** ควรจัดกิจกรรมการอนุรักษ์พลังงานในระบบทำความเย็น เพื่อให้ความรู้แก่พนักงาน เพื่อให้เห็นคุณประโยชน์ของการจัดการด้านพลังงานที่ดีในโรงงาน และช่วยสร้างจิตสำนึกด้านการอนุรักษ์พลังงานให้กับพนักงาน ซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำความเย็นลงได้

4.3 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์และประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของมาตรการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยวิธีเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุน

4.3.1 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการลดการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในคลังสินค้าแช่แข็ง ตามมาตรการในข้อ 4.2 พบว่าสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็น ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็ง

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	ลดลง	ค่าพลังงานไฟฟ้า	ลดลง	ลดลงร้อยละ
--------------------	------	-----------------	------	------------

	(KWh/ปี)		(KWh/ปี)		(บาท/ปี)		
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
ระบบแสงสว่าง	197,730.72	137,313.00	60,417.72	733,580.97	509,431.23	244,149.74	33.28
ระบบทำความเย็น	140,379.02	104,019.02	36,380.20	520,806.16	385,910.56	134,895.60	25.90
รวม	338,109.74	241,332.02	96,797.92	1,254,387.13	895,341.79	379,045.34	30.22

สำหรับมาตรการอื่นๆ ได้แก่ การทำความสะอาดคอมไฟและหลอดไฟ, มาตรการจัดอบรมด้านพลังงานไฟฟ้าและด้านพื้นฐานระบบทำความเย็นให้กับพนักงานในบริษัท, มาตรการทำความสะอาดอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น และมาตรการลดความถี่ในการเปิด-ปิดประตูคลังสินค้าแช่แข็งนั้น เป็นมาตรการเสริมเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานและช่วยสร้างจิตสำนึกด้านการอนุรักษ์พลังงานให้กับพนักงาน ไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยตรงที่ชัดเจน แต่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน ช่วยรักษาความสะอาดและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าไว้ให้นานมากขึ้น

4.3.2 การวิเคราะห์ตามหลักเศรษฐศาสตร์ด้านพลังงาน

จาก ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) = ค่าใช้จ่าย / จำนวนเงินที่ประหยัดได้รายปี [10] (2)

จากการปรับปรุงตามมาตรการลดปริมาณการส่องสว่างที่เกินความจำเป็นด้วยการเปลี่ยนไปใช้หลอด LED ที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงและช่วยลดการใช้พลังงาน มีเงินลงทุนดังต่อไปนี้

-ซื้อหลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8, 25W มาเปลี่ยนหลอดเดิม 627 หลอด x 150 = 94,050 บาท

-ค่าถอดเปลี่ยนหลอดไฟ, ถอดบัลลาสต์และสตาร์ทเตอร์ออก, ต่อสายไฟและทดสอบการทำงาน สามารถให้หน่วยงานแผนกไฟฟ้า หน่วยงานซ่อมบำรุงรักษามาทำได้โดยไม่ต้องจ้างผู้รับเหมาภายนอก

-มาตรการฝึกอบรมพนักงานด้านพลังงานไฟฟ้าและพื้นฐานระบบทำความเย็น มีค่าวิทยากรผู้เชี่ยวชาญเฉพาะจำนวน 2 ท่าน = 2 x 5,000 = 10,000 บาท, ค่าน้ำดื่ม อาหารว่าง อาหารกลางวัน 2 วัน = 20,000 บาท

รวมเป็นเงินลงทุนทั้งสิ้น 94,050+10,000+20,000 = 124,050 บาท

กระแสเงินสดรับสุทธิต่อปีคิดจากเงินค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ต่อปี = 359,045.34 บาท

แทนค่าในสูตร (2), ระยะเวลาคืนทุน = 124,050/359,045.34 = 0.35 ปี หรือ = 4.2 = 5 เดือน

-มาตรการอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ที่มีค่าใช้จ่าย สามารถใช้พนักงานในบริษัททำได้

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในคลังสินค้าแช่แข็งบริษัทกรณีศึกษา แล้ววิเคราะห์หามาตรการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแสงสว่างและระบบทำความเย็น พบว่าบริษัทมีการใช้พลังงานในระบบดังกล่าวค่อนข้างสูง จึงได้พิจารณาหามาตรการในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าหลักๆ 2 มาตรการ ดังต่อไปนี้

5.1 มาตรการลดปริมาณการส่องสว่างที่เกินความจำเป็นด้วยการเปลี่ยนไปใช้หลอดที่มีประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงและช่วยลดการใช้พลังงาน

5.3 มาตรการปรับอุณหภูมิในระบบทำความเย็นที่เหมาะสม

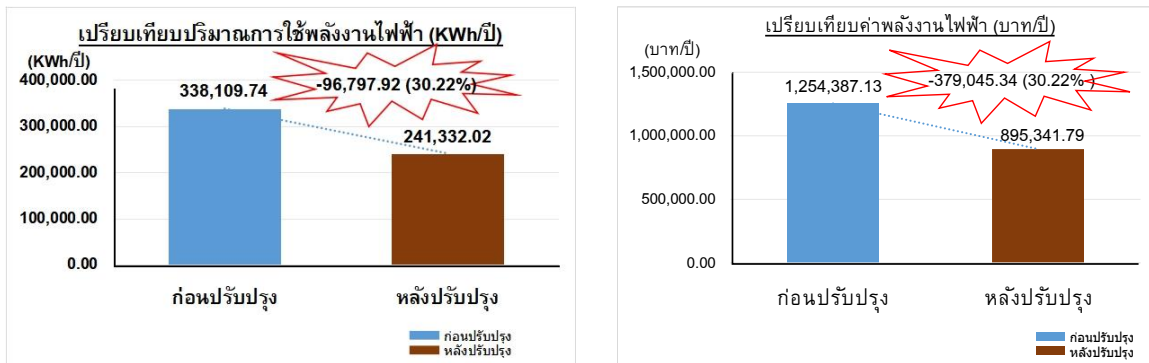
นอกจาก 2 มาตรการนี้แล้ว ยังมีมาตรการเสริมอื่นๆ ซึ่งจะช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานทางอ้อมและช่วยสร้างจิตสำนึกด้านการอนุรักษ์พลังงานให้กับพนักงานในบริษัท ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าไว้ให้นานมากขึ้น ได้แก่

- มาตรการทำความสะอาดคอมไฟและหลอดไฟ
- มาตรการทำความสะอาดอุปกรณ์ในระบบทำความเย็น
- มาตรการจัดอบรมด้านพลังงานและพื้นฐานระบบทำความเย็นให้กับพนักงานในบริษัท

จากมาตรการที่ 5.1 สามารถลดการใช้พลังงานระบบไฟฟ้าแสงสว่างในคลังสินค้าแช่แข็งลงได้ 60,417.72 KWh/ปี ลดต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าได้ 224,149.74 บาท/ปี คิดเป็น 33.28%

จากมาตรการที่ 5.2 สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำความเย็นลงได้ 36,380.20 KWh/ปี ลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 134,895.60 บาท/ปี คิดเป็น 25.90%

รวมทั้ง 2 มาตรการ สามารถลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในคลังสินค้าลง 96,797.92 KWh/ปี ลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าได้ 379,045.34 บาท/ปี คิดเป็น 30.22% และมีระยะเวลาในการคืนทุน 5 เดือน จากต้นทุนมาตรการลดปริมาณการส่องสว่างที่เกินความจำเป็นด้วยการเปลี่ยนไปใช้หลอด LED



รูปที่ 6 เปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 ในการทำวิจัยครั้งนี้ เน้นไปที่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบแสงสว่างและระบบทำความเย็นในคลังสินค้าแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทะเลเท่านั้น ซึ่งได้ผลของการประหยัดพลังงานเป็นที่น่าพึงพอใจ สามารถเป็นแนวทางให้เห็นว่าการลดปริมาณแสงสว่างที่เกินความจำเป็น การเลือกใช้โคมไฟ หลอดไฟที่มีประสิทธิภาพส่องสว่างสูงและประหยัด สามารถลดการใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าแสงสว่างได้ ส่วนการพิจารณาปรับเพิ่มอุณหภูมิแช่แข็งอาหารในห้องแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทะเลให้พอเหมาะนั้น สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบการทำความเย็นลงได้

6.2 จากการศึกษามาตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในคลังสินค้าแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทะเล โดยใช้มาตรการต่างๆ นั้น นอกจากจะช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิตแล้ว ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

6.3 องค์กร สามารถนำแนวคิดการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นโครงการนำร่องที่ได้จากการวิจัยนี้ ไปประยุกต์ปรับใช้กับการอนุรักษ์พลังงานในระบบอื่นๆ ได้ เช่น การอนุรักษ์พลังงานในระบบการทำความร้อน การอนุรักษ์พลังงานในระบบปรับอากาศ และระบบระบายอากาศ เป็นต้น

6.4 สามารถนำแนวคิดในการลดพลังงานไฟฟ้าในคลังสินค้าแช่แข็งผลิตภัณฑ์อาหารทะเลที่ได้นี้ ไปศึกษาลดพลังงานไฟฟ้าในสถานที่อื่นๆ ได้ เช่น ในสำนักงาน ห้องประชุม ฯลฯ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากงบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัยปี 2568 จากสำนักวิจัยมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ในการจัดทำงานวิจัยนี้ สำเร็จจุลวงลงได้จากความร่วมมือของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์อาหารทะเลแช่แข็ง ในอำเภอนาดิ จังหวัดสมุทรสาคร ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดเก็บข้อมูลในการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จจุลวงลงเป็นอย่างดี ได้ผลออกมาใช้อย่างยิ่งสำหรับการพิจารณายึดถือเป็นแนวปฏิบัติในการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าได้ต่อไป

<http://jeet.siamtechu.net>

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.บังอร เบ็ญจาธิกุล อธิการบดีมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ที่ได้มีนโยบายในการพัฒนาบุคลากรอาจารย์ในมหาวิทยาลัย โดยสนับสนุนอนุมัติงบประมาณในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งคณาบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณาจารย์และนักวิจัยประจำสำนักมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรีทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผลงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจ และเกิดประโยชน์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าในอุตสาหกรรมต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2025, Nov. 10). *สถานการณ์พลังงาน 6 เดือนแรกของปี 2568 และแนวโน้มพลังงานปี 2568*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Forecast/ShorttermForecast/stiulation-half-2568-forecast2568.pdf>
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2025, Nov. 10). *พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2550)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://oldwww.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=134
- [3] D-Sense Engineering Co., Ltd. (21 พฤศจิกายน 2567), *การออกแบบแสงสว่างเบื้องต้น*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.dsense.co.th/ดูบทความ-173954-การออกแบบแสงสว่างเบื้องต้น.html>
- [4] แนวปฏิบัติตามกฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. 2549. (2025, Nov. 19). *การตรวจวัดความเข้มแสงสว่าง (Illumination Measurement)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา : https://arch.ku.ac.th/gf/wp-content/uploads/2021/03/5.2.1-practice_illumination.pdf
- [5] กฎกระทรวง. (2025, Nov. 19). *กำหนดมาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับความร้อน แสงสว่าง และเสียง พ.ศ. ๒๕๕๙*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://greenoffice.rsu.ac.th/law/law4.pdf>
- [6] TCL. (2025, Nov. 19). *อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับช่องแช่แข็ง*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.tcl.com/th/th/blog/guides/the-perfect-temperature-to-keep-food-fresh-in-the-freezer>
- [7] FDA U.S. Food and Drug Administration. (2025, Nov. 19). *Are you Storing Food Safely?*. [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.fda.gov/consumers/consumer-updates/are-you-storing-food-safely>
- [8] USDA Food Safety and Inspection Service. (2025, Nov. 19). *Freezing and Food Safety*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.fsis.usda.gov/food-safety/safe-food-handling-and-preparation/food-safety-basics/freezing-and-food-safety#>
- [9] คู่มือรับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) พ.ศ.2561. (2025, Nov. 19). *การอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบทำความเย็น (Energy Conservation for Refrigeration System)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: http://image.makewebeasy.net/makeweb/0/mqk9PemK3/Document/Part_3_Chapter_6_%E0%B8%9B%E0%B8%B5_2561.pdf?v=202012190947
- [10] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2025, Nov. 19). *การวิเคราะห์การลงทุนการอนุรักษ์พลังงาน (Financial analysis techniques for energy conservation)*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://image.makewebeasy.net/makeweb/0/mqk9PemK3/Document/Part_1_Chapter_5_ปี_2567_ความร้อน.pdf?v=202405291424

การแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะและปริมาณไมโครพลาสติกในดิน ณ ศูนย์จัดการขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร

SEASONAL VARIATION OF MICROPLASTICS ABUNDANCE AND CHARACTERISTICS IN LANDFILL SOIL AT AN INTEGRATED WASTE MANAGEMENT FACILITY

ศุภวัฒน์ ชัยเกษม¹ วีร์ราภัสสร ฌ ร้อยเอ็ด^{2*} กนกวรรณ เอี่ยมเพ็ชร² ริ้วตะวัน พูลทรัพย์²
พรพิมล ทำทอง² สุนิภา วงษ์ทอง²

Supawat Chaikasem¹ Veerapas Na Roi-et^{2*} Kanokwan Aiemphet² Riwtawan Poolsup²
Pornpimol Tamtong² Sunipa Wongtong²

¹คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230

¹Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Sriracha Campus, Chonburi 20230

²คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์ลำปาง ลำปาง 52190

²Faculty of Public Health, Thammasat University, Lampang Center, Lampang 52190

*Corresponding author E-mail: veerapas.n@fph.tu.ac.th

Received: November 5, 2025

Revise: December 30, 2025

Accepted: December 30, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะและปริมาณไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ ณ ศูนย์จัดการขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร จังหวัดลำปาง โดยวิเคราะห์องค์ประกอบขยะพลาสติกประเภท สันฐานวิทยา และปริมาณไมโครพลาสติก เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง กระบวนการศึกษาได้ทำการเก็บตัวอย่างดิน และสุ่มตัวอย่างขยะ (quartering) เพื่อคัดแยกองค์ประกอบขยะและประเภทพลาสติก 7 ชนิด จากนั้นสกัดและแยกไมโครพลาสติกด้วยวิธี Wet Peroxide Oxidation และ Density Separation จำแนกลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ และระบุชนิดด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบขยะพลาสติกมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 20.19 ± 2.20 พบว่า Low-density Polyethylene (LDPE) เป็นประเภทที่พบมากที่สุดทั้งในฤดูฝน (ร้อยละ 71.57) และฤดูแล้ง (ร้อยละ 68.20) ปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในฤดูแล้ง (1,013.33 ± 220.30 ชิ้น/กิโลกรัม) สูงกว่าในฤดูฝน (413.33 ± 151.44 ชิ้น/กิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สันฐานวิทยาที่พบเด่นคือแบบ Fragment (ฤดูฝน ร้อยละ 63.46, ฤดูแล้ง ร้อยละ 85.71) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองฤดูกาล ชนิดของโพลีเมอร์ที่พบส่วนใหญ่คือ Polypropylene (PP), Polyethylene Terephthalate (PET) และ Polystyrene (PS) มีการกระจายที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองฤดูกาล ข้อค้นพบที่สำคัญคือ แม้ LDPE จะเป็นขยะพลาสติกที่พบมากที่สุด (> ร้อยละ 68) แต่ไม่พบไมโครพลาสติกประเภท LDPE หรือ High-density Polyethylene (HDPE) ในตัวอย่างดิน แสดงให้เห็นถึงอัตราการย่อยสลายที่แตกต่างกันของโพลีเมอร์แต่ละชนิด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมและลักษณะของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ โดยสภาวะในฤดูแล้งเอื้อต่อการย่อยสลายของพลาสติกและลดการชะล้างของไมโครพลาสติกออกจากดินผิวดิน

คำสำคัญ: ไมโครพลาสติก ดินจากบ่อฝังกลบขยะ องค์ประกอบขยะ ขยะพลาสติก ฤดูกาล

Abstract

This study examines the seasonal variation in the abundance and characteristics of microplastics in soil from a landfill site at an integrated waste management facility in Lampang Province, Thailand. Soil samples were collected during wet and dry seasons, and waste composition analysis was conducted to classify plastic waste into seven types. Microplastics were isolated using wet peroxide oxidation and density separation, characterized by fluorescence microscopy, and identified using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Results showed that plastic waste comprised an average of $20.19 \pm 2.20\%$ of total waste, with low-density polyethylene (LDPE) being predominant in both wet (71.57%) and dry (68.20%) seasons. Microplastic abundance was significantly higher in the dry season ($1,013.33 \pm 220.30$ particles/kg) compared to the wet season (413.33 ± 151.44 particles/kg). Fragments were the dominant morphology, accounting for 63.46% and 85.71% in wet and dry seasons, respectively, with a statistically significant difference between seasons. The major polymer types identified were polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and polystyrene (PS), with significantly different distributions between seasons. Notably, despite LDPE being the most abundant plastic waste type (> 68%), no LDPE or high-density polyethylene (HDPE) microplastics were detected in soil samples, suggesting differential degradation rates among polymer types. These findings highlight that seasonal variation plays a crucial role in influencing microplastic accumulation and distribution in landfill soil, with dry season conditions favoring both enhanced photodegradation of plastics and reduced leaching of microplastics from surface soil. The study provides baseline data for developing season-specific waste management strategies to mitigate microplastic pollution from landfill sites.

Keywords: Microplastic, Landfill soil, Waste composition, Plastic waste, Seasonality

1. บทนำ

จากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคม และการเติบโตของชุมชนเมือง รวมถึงพฤติกรรมบริโภคที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะการสั่งซื้อสินค้าและอาหารผ่านช่องทางออนไลน์ ส่งผลให้ปริมาณขยะทั่วทั้งโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะขยะพลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single use plastics) การสั่งอาหารผ่านแอปพลิเคชัน ก่อให้เกิดขยะพลาสติกเฉลี่ยประมาณ 7 ชิ้นต่อครั้ง [1] ขณะที่การซื้อของออนไลน์ก่อให้เกิดขยะบรรจุภัณฑ์มากกว่าการซื้อของแบบออฟไลน์ถึง 4.8 เท่า [2] ทั้งนี้ มีการคาดการณ์ว่าปริมาณขยะทั่วโลกจะเพิ่มขึ้นจาก 2.1 พันล้านตันในปี พ.ศ. 2566 เป็น 3.8 พันล้านตันในปี พ.ศ. 2593 [3] สำหรับประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2567 มีปริมาณขยะเกิดขึ้นเฉลี่ยประมาณ 74,529 ตันต่อวัน โดยเป็นขยะพลาสติกร้อยละ 12 ของปริมาณขยะทั้งหมด หรือคิดเป็นขยะพลาสติกหลังการบริโภคประมาณ 2 ล้านตันต่อปี [4, 5] พลาสติกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ทนทาน น้ำหนักเบา และมีต้นทุนการผลิตต่ำ ส่งผลให้มีอัตราการผลิตพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 30 ล้านตันต่อปี ในปี พ.ศ. 2531 เป็น 430.9 ล้านตันในปี พ.ศ. 2567 โดยแบ่งเป็นพลาสติกประเภท โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) 19%, โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene: LDPE) 13.9%, โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride: PVC) 12.8%, โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density Polyethylene: HDPE) 12.1%, โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PETE/PET) 6.2%, โพลียูรีเทน (Polyurethane: PUR) 5.3% โพลีสไตรีน (Polystyrene: PS) 5.1% และพลาสติกประเภทอื่นๆ (Other) ประมาณ 25.6% [6, 7] พลาสติกเหล่านี้มีอายุการใช้งานสั้นและมักถูกใช้เพียงครั้งเดียวก่อนที่จะถูกนำไปทิ้งเป็นขยะพลาสติกจึงก่อให้เกิดการสะสมและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวาง

การฝังกลบขยะเป็นวิธีการกำจัดขยะที่ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก สำหรับประเทศไทยพบว่า มีขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณ 2 ล้านตันต่อปี โดยมากกว่าร้อยละ 62 ของขยะพลาสติกทั้งหมดถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการ

ฝังกลบ (Landfill) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าบ่อฝังกลบขยะเป็นแหล่งสะสมไมโครพลาสติกในปริมาณมาก โดยขยะพลาสติกที่นำไปกำจัดส่วนใหญ่เป็นประเภท PP, HDPE และ LDPE เนื่องจากไม่คุ้มค่าต่อการเก็บรวบรวมและทำความสะอาด [4] จึงถูกนำไปทิ้งที่บ่อฝังกลบขยะ ซึ่งภายในบ่อฝังกลบ ขยะพลาสติกเหล่านี้จะเกิดการเสื่อมสภาพจากกระบวนการทางกายภาพเคมี ชีวภาพ ส่งผลให้พลาสติกเกิดการแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆ ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร ถึง 5 มิลลิเมตร หรือที่เรียกว่าไมโครพลาสติก [8, 9] งานวิจัยของ Mahesh et al. [10] ได้ทำการศึกษาดินจากบ่อฝังกลบและพบไมโครพลาสติก จำนวน 180-1,120 ชิ้นต่อกิโลกรัมของดิน โดยพบไมโครพลาสติกประเภท PE และ PP มากที่สุด ในขณะที่งานวิจัยของ Puthcharoen and Leungprasert [11] ได้ศึกษาไมโครพลาสติกจากดินและน้ำชะขยะในบ่อฝังกลบ 12 แห่งทั่วประเทศไทย พบว่ามีไมโครพลาสติกในดินเฉลี่ย $1,457.99 \pm 489.71$ ชิ้นต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง และในน้ำชะขยะ 20.90 ± 4.96 ชิ้นต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง โดยประเภทพอลิเมอร์หลักที่พบคือ PE, PP และ PET ซึ่งสอดคล้องกับประเภทของขยะพลาสติกที่พบในบ่อฝังกลบ นอกจากนี้งานวิจัยของ Koonmee et al. [12] ได้ศึกษาไมโครพลาสติกในน้ำชะขยะและน้ำผิวดินบริเวณศูนย์จัดการขยะจังหวัดนนทบุรี พบว่าระบบบำบัดน้ำเสียสามารถกำจัดไมโครพลาสติกได้ประมาณ 71.88% แต่ยังคงมีไมโครพลาสติกหลงเหลือในน้ำทิ้งที่อาจปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำโดยรอบ

แม้ไมโครพลาสติกจะมีขนาดเล็กแต่มีความคงทนและย่อยสลายได้ยาก ทำให้ตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน อีกทั้งสามารถสะสมในห่วงโซ่อาหารและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากไมโครพลาสติกมีคุณสมบัติพื้นผิวแบบ Hydrophobic จึงสามารถดูดซับและรวมตัวกับมลพิษอื่นๆ ที่ปนเปื้อนในบริเวณเดียวกัน ดังนั้น บ่อฝังกลบขยะจึงไม่ได้เป็นเพียงแหล่งเก็บกักไมโครพลาสติกเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งกำเนิดสำคัญของการปลดปล่อยไมโครพลาสติกออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ผ่านกระบวนการชะละลาย (Leaching) จากฝนหรือลม ซึ่งนำพาไมโครพลาสติกออกสู่ดิน น้ำ และอากาศ ก่อให้เกิดการปนเปื้อนในระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ [13] งานวิจัยของ Wisitthammassri et al. [14] ได้ศึกษาการปนเปื้อนไมโครพลาสติกในดิน น้ำชะขยะ และน้ำบาดาลบริเวณบ่อฝังกลบในจังหวัดระยอง พบว่าไมโครพลาสติกสามารถเคลื่อนย้ายจากพื้นผิวดินลงสู่ชั้นน้ำบาดาลได้ โดยพบความเข้มข้นสูงกว่าในพื้นที่นอกบ่อฝังกลบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทสำคัญของบ่อฝังกลบขยะในฐานะแหล่งปนเปื้อนไมโครพลาสติกในระบบนิเวศดินและน้ำบาดาล

ปัญหาการปนเปื้อนของไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมถือเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากไมโครพลาสติกสามารถสะสมและก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสุขภาพของมนุษย์ แหล่งสำคัญของการเกิดไมโครพลาสติกในระบบนิเวศมาจากการเสื่อมสลายของขยะพลาสติกที่ถูกกำจัดในบ่อฝังกลบขยะ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการจัดการขยะพลาสติก และมักถูกมองว่าเป็นแหล่งเก็บสะสมไมโครพลาสติกที่สำคัญ ปัญหานี้เชื่อมโยงโดยตรงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) หลายประการ โดยเฉพาะ SDG 11 (เมืองและชุมชนที่ยั่งยืน) ซึ่งเน้นการจัดการขยะในเมืองอย่างมีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม SDG 12 (การบริโภคและการผลิตที่ยั่งยืน) ที่ส่งเสริมการลดของเสียและการจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และ SDG 15 (ชีวิตบนบก) ที่มุ่งเน้นการป้องกันการเสื่อมโทรมของดินและระบบนิเวศบนบก การศึกษาไมโครพลาสติกในบ่อฝังกลบจึงไม่เพียงแต่เป็นประเด็นเชิงวิชาการเท่านั้น แต่ยังมีมีความหมายสำคัญต่อการพัฒนานโยบายการจัดการขยะที่ยั่งยืนและการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

อย่างไรก็ตาม การศึกษาไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะยังมีจำนวนจำกัด ทั้งที่พื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนและการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย ซึ่งมีการขยายตัวของพื้นที่เมืองและการผลิตขยะพลาสติกอย่างต่อเนื่อง การทำความเข้าใจองค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการเปลี่ยนแปลงของไมโครพลาสติกตามฤดูกาลจึงมีความจำเป็น เพื่ออธิบายกลไกการสะสมและแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ การศึกษาความแปรผันตามฤดูกาลมีความสำคัญเป็นพิเศษเนื่องจากปัจจัยด้านสภาพอากาศ เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และความชื้น มีผลต่อกระบวนการย่อยสลายและการเคลื่อนย้ายของไมโครพลาสติก ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยสนับสนุนการออกแบบมาตรการจัดการขยะและลดการปนเปื้อนไมโคร

รพลาสติคที่เหมาะสมกับบริบทพื้นที่และช่วงเวลา ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบ ประเภท สันฐานวิทยา และปริมาณของไมโครพลาสติกในดินบริเวณหลุมฝังกลบขยะตามฤดูกาล ผลการศึกษานี้ช่วยอธิบายถึง ลักษณะและพฤติกรรมของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผน จัดการขยะพลาสติกอย่างยั่งยืน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว

2. วัตถุประสงค์ในการศึกษา

- 1) เพื่อจำแนกองค์ประกอบขยะ และประเภทของขยะพลาสติก
- 2) เพื่อวิเคราะห์ประเภท สันฐานวิทยา และปริมาณของไมโครพลาสติกในดิน
- 3) เพื่อศึกษาความแตกต่างตามฤดูกาลขององค์ประกอบขยะพลาสติก และไมโครพลาสติกในดิน

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา จุดเก็บตัวอย่างและวิธีการเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างดินเก็บจากหลุมฝังกลบภายในศูนย์จัดการขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร ซึ่งตั้งอยู่ที่พิกัด 18°21'48.92"N, 99°29'3.44"E ศูนย์ดังกล่าวเป็นระบบกำจัดขยะมูลฝอยที่ประกอบด้วยกระบวนการคัดแยกขยะรีไซเคิล กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง และกระบวนการหมักปุ๋ยจากขยะอินทรีย์ ส่วนขยะที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบเชิงวิศวกรรม (Engineered Landfill) ศูนย์มีพื้นที่ 311 ไร่ เริ่มเปิดดำเนินการในปี พ.ศ. 2560 และมีปริมาณขยะเข้าสู่สถานที่กำจัดประมาณ 156 ตันต่อวัน [5] พื้นที่ศึกษาและการสุ่มเก็บตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทำการเก็บตัวอย่างดินจากบ่อฝังกลบขยะจำนวน 1 บ่อ ในช่วงฤดูร้อน (กุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม) และฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) [15] โดยใช้เครื่องมือเจาะดิน (Hand auger) ที่ระดับความลึกประมาณ 15 เซนติเมตรจากผิวดิน จุดเก็บตัวอย่างถูกกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากัน เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่อย่างเหมาะสม และมีการระบุตำแหน่งของจุดเก็บตัวอย่างแต่ละจุดด้วยค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์โดยใช้ GPS รวมทั้งสิ้น 10 จุด โดยตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุดเก็บตัวอย่างดินซึ่งครอบคลุมพื้นที่บ่อฝังกลบขยะแสดงไว้ในตารางที่ 1 ตัวอย่างดินจากแต่ละจุดจะถูกนำมาผสมรวมกันให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Composite sample) โดยมีปริมาณตัวอย่างดินไม่น้อยกว่า 1 กิโลกรัมต่อบ่อฝังกลบขยะ จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างในภาชนะแอสแตนเลสที่หุ้มด้วยฟอยล์อลูมิเนียมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากภายนอก ก่อนนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสในที่มืด จนกว่าจะนำไปทำการวิเคราะห์



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาและการสุ่มเก็บตัวอย่างดิน

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์จุดเก็บตัวอย่างดิน

จุดเก็บตัวอย่าง	ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์	
	ละติจูด	ลองจิจูด
1	18°21'44.48"N	99°28'49.68"E
2	18°21'44.65"N	99°28'47.91"E
3	18°21'45.04"N	99°28'46.00"E
4	18°21'45.24"N	99°28'44.77"E
5	18°21'45.34"N	99°28'43.89"E
6	18°21'43.49"N	99°28'43.71"E

7	18°21'43.32"N	99°28'44.67"E
8	18°21'43.06"N	99°28'45.99"E
9	18°21'42.79"N	99°28'47.73"E
10	18°21'42.47"N	99°28'49.26"E

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะพลาสติก

1) ดำเนินการสุ่มตัวอย่างขยะ เพื่อคัดแยกองค์ประกอบขยะจากรถบรรทุกเก็บขนขยะ ณ สถานที่กำจัดขยะ โดยหลังจากรถบรรทุกเก็บขนขยะกลับมาจากการเก็บขนขยะในแต่ละวัน ขยะจากรถบรรทุกเก็บขนขยะจะถูกสุ่มตัวอย่างให้เหลือประมาณ 450 กิโลกรัม จากนั้นทำการแบ่งขยะออกเป็น 4 กอง (Quartering) ทำการสุ่มโดยเลือก 2 กองที่อยู่ตรงข้ามกัน และทำการสุ่มจำนวน 2 ครั้ง จนเหลือขยะประมาณ 100 กิโลกรัม จากนั้นนำขยะทั้งหมดมาเทกองรวมกันเพื่อคลุกเคล้าขยะให้กระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

2) คัดแยกองค์ประกอบขยะตามคู่มือการคัดแยกองค์ประกอบมูลฝอย ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอย [16] ประกอบด้วย 15 ประเภท คือ 1. เศษอาหาร 2. มูลฝอยจากสวน 3. กระดาษ (ไม่รวมกระดาษชำระ) 4. ไม้ 5. ผ้า 6. ยาง และหนัง 7. ผ้าอ้อม 8. พลาสติก (พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว, พลาสติกหลายชั้น, พลาสติกทงทน) 9. โฟม 10. โลหะ 11. แก้ว 12. ของเสียอันตรายจากชุมชน 13. ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 14. มูลฝอยติดเชื้อ 15. อื่นๆ

3) หลังจากทำการคัดแยกขยะครบ 15 ประเภทแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการคัดแยกขยะเฉพาะขยะพลาสติก โดยประกอบด้วย 7 ชนิด คือ 1. PET, 2. HDPE, 3. PVC, 4. LDPE, 5. PP, 6. PS และ 7. Other

4) ทำการชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ความละเอียด 0.1 กิโลกรัม เพื่อคำนวณหาองค์ประกอบของขยะ และประเภทของขยะพลาสติก โดยใช้สมการที่ 1

$$C = \frac{W_i}{W_t} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C = ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบขยะแต่ละประเภท (% by weight)
 W_i = น้ำหนักขยะแต่ละประเภท
 W_t = น้ำหนักขยะรวมทุกประเภท

3.3 วิธีการวิเคราะห์ไมโครพลาสติกในตัวอย่างดิน

1) การสกัดไมโครพลาสติกออกจากตัวอย่างดิน

การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณไมโครพลาสติกในดินจากหลุมฝังกลบขยะดัดแปลงมาจากกระบวนการ Wet Peroxide Oxidation (WPO) ตามวิธีของ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) protocol [17] โดยนำตัวอย่างดิน 50 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างดินไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนสแตนเลส (Stainless sieve) แล้วเติมสารละลายซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ใช้แท่งแก้วกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 5 นาที และปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน (ไมโครพลาสติกที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นของสารละลาย $ZnCl_2$ จะลอย แต่ถ้ามีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของสารละลาย $ZnCl_2$ จะจมลงที่ก้นบีกเกอร์) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างที่ลอยอยู่บนผิวน้ำใสในบีกเกอร์ และนำไปอบอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4$) ที่ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร และเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร (v/v) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เพื่อขจัดสารอินทรีย์ [18] หลังจากนั้นนำไปตั้งบนเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อน (Hot plate stirrer) ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที พร้อมกวนสารด้วยแท่งแม่เหล็ก (Stirrer bar) (เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ ทำซ้ำจนกว่าจะได้สารละลายใส) จากนั้นเติมโซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$) 6 กรัมต่อตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร หรือความเข้มข้น 25%

โดยน้ำหนัก (w/w) โดยความหนาแน่นของ NaCl เท่ากับ 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [19] ผสมให้เข้ากันพร้อมทั้งให้ความร้อนด้วยเครื่องกวนสารชนิดให้ความร้อนต่อไปจนเกลือละลาย ทั้งไว้ให้เย็น นำสารละลายใส่กรวยกรองแก้ว (Funnel Glass) ทำการปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์บริเวณปากของกรวยกรองแก้ว ทั้งไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมารองด้วยกระดาษกรองอลูมิเนียมฟอยล์ออกไซด์ (Whatman, 25 mm diameter, 0.2 μm pore size, aluminium oxide filter; Anodisc) โดยใช้เครื่องดูดสุญญากาศ และนำกระดาษกรองวางลงบนจานเพาะเชื้อ (Petri dish) นำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บที่ตู้ Desiccator จนกว่าจะนำมาวิเคราะห์

2) การระบุรูปร่าง ขนาดและประเภทของไมโครพลาสติก

กระดาษกรอง จะถูกนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescent microscope) พร้อมอุปกรณ์ถ่ายภาพและประมวลผล (OLYMPUS BX53) เพื่อศึกษาปริมาณ (Amount) รูปร่าง (Shape) สี (Color) ขนาด (Size) ความยาว (Length) จากนั้นนำตัวอย่างไปตรวจสอบชนิดของไมโครพลาสติกด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrometer (Bruker, LUMOS II) โดยใช้โหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) เพื่อค้นหาสเปกตรัมของตัวอย่างเทียบกับสเปกตรัมอ้างอิงใน Library (IR Library) ในกรณีที่สเปกตรัมมีค่าความถูกต้องของการจับคู่ต่ำกว่า 70% (Hit quality) จะไม่ถูกนำมารวมในการวิเคราะห์

3.4 การประกันคุณภาพและการควบคุมคุณภาพ

ในการเก็บตัวอย่างและการปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ ได้มีการนำมาตรการด้านการประกันคุณภาพและการควบคุมคุณภาพมาใช้อย่างเคร่งครัด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนและเพื่อให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือและสามารถทำซ้ำได้ ทั้งก่อน ระหว่าง และหลังการเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ ผู้ปฏิบัติงานสวมเสื้อผ้าที่ทำจากฝ้ายและถุงมือไนไตรล์ โดยกระบวนการทั้งหมดดำเนินการด้วยอุปกรณ์ที่ทำจากแก้วหรือสแตนเลสเท่านั้นและหุ้มด้วยฟอยล์อลูมิเนียม อุปกรณ์ทุกชนิดได้รับการทำความสะอาดและล้างด้วยน้ำ Milli-Q จำนวนสามครั้งก่อนการใช้งานทุกครั้ง เพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนจากวัสดุที่มีแหล่งกำเนิดจากพลาสติก

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้วิเคราะห์

ข้อมูลองค์ประกอบขยะและประเภทขยะพลาสติกนำเสนอในรูปค่าร้อยละโดยน้ำหนัก และค่าเฉลี่ยพร้อมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean \pm SD) ปริมาณไมโครพลาสติกคำนวณเป็นจำนวนชิ้นต่อกิโลกรัมของดิน (ชิ้นต่อกิโลกรัม) และขนาดของไมโครพลาสติกวัดเป็นหน่วยไมโครเมตร (μm) การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้งดำเนินการโดยใช้สถิติที่เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูล โดยก่อนการวิเคราะห์ได้ทำการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วย Shapiro-Wilk test พบว่าข้อมูลไม่เป็นไปตามการแจกแจงตามปกติ ($p < 0.05$) จึงเลือกใช้สถิติแบบไม่อาศัยการแจกแจงปกติ ปริมาณและขนาดเฉลี่ยของไมโครพลาสติกเปรียบเทียบด้วย Mann-Whitney U test ในขณะที่การวิเคราะห์ความแตกต่างของการกระจายตัวของสัณฐานวิทยาและประเภทโพลีเมอร์ใช้ Chi-square test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p \leq 0.05$ การวิเคราะห์ข้อมูลดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SPSS

4. ผลการวิจัย

4.1 องค์ประกอบขยะ และประเภทขยะพลาสติก

1) องค์ประกอบขยะโดยรวม

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะมูลฝอยในสถานที่กำจัดขยะ (ตารางที่ 2) พบว่าขยะเศษอาหารและมูลฝอยจากสวนเป็นองค์ประกอบหลัก ($26.53 \pm 13.72\%$ และ $22.30 \pm 4.89\%$ ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะขยะชุมชนทั่วไปของประเทศไทย ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างฤดูฝน (36.23%) และฤดูแล้ง (16.82%) สะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมและพฤติกรรมกรรมการบริโภคตามฤดูกาล โดยในฤดูฝน ความชื้นสูงส่งเสริมการเน่าเสียของอาหาร ทำให้น้ำหนักขยะอินทรีย์เพิ่มขึ้น ในขณะที่ฤดูแล้งมีการระเหยของน้ำสูง ส่งผลให้น้ำหนักขยะอินทรีย์ลดลง ผลที่คล้ายคลึงกันพบในการศึกษาของ Saengchut et al. [18] ที่บ่อฝังกลบในจังหวัดนครนายก ซึ่งรายงานว่ขยะอินทรีย์มีความแปรผันตามฤดูกาลอันเนื่องมาจากความชื้นและอุณหภูมิ

สำหรับขยะที่สามารถนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือรีไซเคิลได้ พบว่า ขยะพลาสติกเป็นองค์ประกอบหลักของขยะรีไซเคิล ($20.19 \pm 2.20\%$) โดยมีความคงที่ในทั้งสองฤดูกาล สะท้อนถึงการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งปี ปริมาณขยะพลาสติกที่พบสูงกว่าการศึกษาของ Wisitthamasri et al. [14] ที่บ่อฝังกลบจังหวัดระยอง (ร้อยละ 15.2) อาจเกิดจากความแตกต่างของรูปแบบการบริโภคและระดับการพัฒนาเศรษฐกิจของพื้นที่ ขยะรีไซเคิลอื่นๆ ได้แก่ ผ้า ($8.51 \pm 4.70\%$) กระดาษ ($7.50 \pm 2.40\%$) และแก้ว ($5.50 \pm 4.45\%$) มีความแปรผันสูงระหว่างฤดูกาล ในขณะที่ยาง-หนังและโลหะมีสัดส่วนต่ำ (< 3%) ของเสียอันตรายและซากอิเล็กทรอนิกส์แม้มีสัดส่วนรวมน้อยกว่า 2% แต่มีความสำคัญเชิงสิ่งแวดล้อมสูง เนื่องจากเป็นแหล่งของสารเคมีและโลหะหนักที่อาจปนเปื้อนสู่ดินและน้ำใต้ดิน หากไม่มีการคัดแยกอย่างเหมาะสม

องค์ประกอบของขยะที่พบแสดงให้เห็นว่า ขยะอินทรีย์และขยะพลาสติก เป็นกลุ่มหลักที่ควรได้รับการจัดการอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการส่งเสริมการแยกขยะตั้งแต่ต้นทางและการนำกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น การผลิตปุ๋ยหมักหรือก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ และการรีไซเคิลขยะพลาสติก เพื่อลดปริมาณของเสียที่เข้าสู่บ่อฝังกลบขยะ ทั้งนี้ ความแตกต่างขององค์ประกอบขยะในแต่ละฤดูกาลชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการกำหนดมาตรการจัดการขยะเชิงฤดูกาลเพื่อให้การเก็บรวบรวมและกำจัดขยะมีประสิทธิภาพ

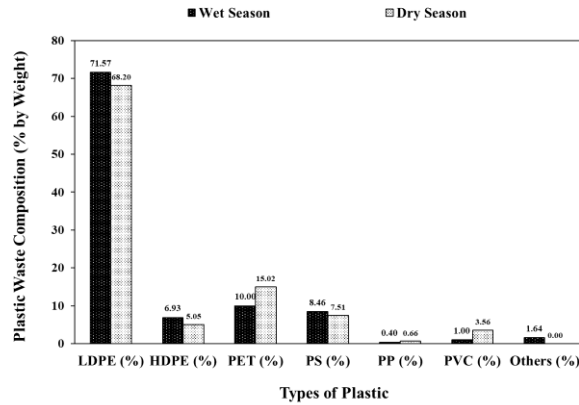
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของขยะในสถานที่กำจัดขยะจำแนกตามฤดูกาล

องค์ประกอบของขยะ	องค์ประกอบขยะในสถานที่กำจัดขยะ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	Mean \pm SD
ขยะอาหาร	36.23	16.82	26.53 \pm 13.72
มูลฝอยจากสวน	18.84	25.76	22.30 \pm 4.89
กระดาษ	5.80	9.20	7.50 \pm 2.40
ไม้	0.83	0.37	0.60 \pm 0.33
ผ้า	5.18	11.83	8.51 \pm 4.70
ยางและหนัง	0.62	4.73	2.68 \pm 2.91
ผ้าอ้อม	1.45	3.15	2.30 \pm 1.20
พลาสติก	18.63	21.74	20.19 \pm 2.20
โฟม	1.46	0.53	1.00 \pm 0.66
โลหะ	0.01	0.39	0.20 \pm 0.27
แก้ว	8.64	2.35	5.50 \pm 4.45
ของเสียอันตรายจากชุมชน	2.28	0.58	1.43 \pm 1.20
ซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	-	0.30	0.15 \pm 0.21
มูลฝอยติดเชื้อ	0.04	1.33	0.69 \pm 0.91
อื่นๆ	-	0.92	0.46 \pm 0.65

2) ประเภทขยะพลาสติก

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะพลาสติกจำแนกตามประเภทของโพลีเมอร์ในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง (รูปที่ 2) พบว่า LDPE เป็นพลาสติกที่พบมากที่สุดทั้งสองฤดูกาล โดยมีสัดส่วนร้อยละ 71.57 และ 68.20 ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า LDPE เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะในรูปของถุงพลาสติกและฟิล์มห่ออาหาร จึงทำให้พบที่สถานที่กำจัดขยะมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการใช้พลาสติกบรรจุภัณฑ์ในครัวเรือน พลาสติกชนิดที่พบรองลงมา ได้แก่ พลาสติกประเภท PET คิดเป็นร้อยละ 10.00 และ 15.02 ,PS ร้อยละ 8.46 และ 7.51, และ HDPE ร้อยละ 6.93 และ 5.05 ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพลาสติกประเภท PET มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้ง กลไกนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Puthcharoen and Leungprasert [11] ที่พบว่า องค์ประกอบขยะพลาสติกในบ่อฝังกลบ 12 แห่งทั่วประเทศไทยมี PE และ PET เป็นชนิดหลัก ซึ่งอาจสัมพันธ์กับพฤติกรรม การบริโภคของประชากรในแต่ละพื้นที่ พลาสติกประเภท PP, PVC และ Others พบในสัดส่วนต่ำ (< ร้อยละ 5.00) โดย

PVC เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในฤดูแล้ง (ร้อยละ 1.00 ถึง 3.56) ซึ่งอาจเชื่อมโยงกับการใช้วัสดุก่อสร้างหรือท่อพลาสติกที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูแล้ง ในขณะที่ Other พบเฉพาะในฤดูฝน (ร้อยละ 1.64) แสดงถึงความหลากหลายของแหล่งที่มาของขยะตามฤดูกาล ทั้งนี้ ความแตกต่างขององค์ประกอบขยะพลาสติกในแต่ละฤดูกาลเป็นข้อมูลสำคัญที่สามารถนำไปใช้ในการกำหนดมาตรการจัดการขยะพลาสติกเฉพาะฤดูกาล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและนำกลับมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2 ประเภทขยะพลาสติกในสถานที่กำจัดขยะจำแนกตามฤดูกาล

4.2 ปริมาณและขนาดของไมโครพลาสติกในดิน

1) ปริมาณไมโครพลาสติกในดิน

ผลการเปรียบเทียบไมโครพลาสติกที่พบจำแนกตามฤดูกาลดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งให้เห็นว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของไมโครพลาสติกในดิน โดยปริมาณไมโครพลาสติกช่วงฤดูแล้ง ($1,013.33 \pm 220.30$ ชิ้นต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าในช่วงฤดูฝน (413.33 ± 151.44 ชิ้นต่อกิโลกรัม) ประมาณ 2.45 เท่า แสดงให้เห็นว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของไมโครพลาสติกในดิน โดยในฤดูแล้ง ความชื้นในดินลดลงและการชะล้างด้วยน้ำฝนมีน้อย จึงส่งผลให้มีการสะสมของไมโครพลาสติกมากกว่าฤดูฝน ผลการทดสอบทางสถิติด้วย Mann-Whitney U test แสดงให้เห็นว่าปริมาณไมโครพลาสติกระหว่างสองฤดูกาลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($U = 0.000, Z = -2.449, p = 0.014$) แสดงให้เห็นว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของไมโครพลาสติกในดิน โดยในฤดูแล้ง ความชื้นในดินลดลงและการชะล้างด้วยน้ำฝนมีน้อย จึงส่งผลให้มีการสะสมของไมโครพลาสติกมากกว่าฤดูฝน เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาอื่นในประเทศไทย พบว่าปริมาณไมโครพลาสติกในการศึกษานี้น้อยในช่วงเดียวกับที่ Puthcharoen and Leungprasert [11] รายงานจากบ่อฝังกลบ 12 แห่ง ($1,458 \pm 490$ ชิ้นต่อกิโลกรัม) และ Mahesh et al. [10] ในอินเดีย ($180 - 1,120$ ชิ้นต่อกิโลกรัม) แต่ต่ำกว่า Wisitthammasri et al. [14] ที่จังหวัดระยอง อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของอายุบ่อฝังกลบ ประเภทของขยะ และสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของฤดูกาลต่อปริมาณไมโครพลาสติกอย่างชัดเจน

2) ขนาดของไมโครพลาสติก

การเปรียบเทียบไมโครพลาสติกจำแนกตามฤดูกาล (ตารางที่ 3) พบว่า ขนาดไมโครพลาสติกในฤดูฝน ($27.89 - 1,503.8 \mu\text{m}$, ค่าเฉลี่ย $270.44 \mu\text{m}$) และฤดูแล้ง ($42.13 - 932.06 \mu\text{m}$, ค่าเฉลี่ย $245.71 \mu\text{m}$) ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Mann-Whitney U test, $p > 0.05$) แม้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ช่วงการกระจายตัวในฤดูฝนกว้างกว่า (Coefficient of variation สูงกว่า) ซึ่งให้เห็นว่ามีไมโครพลาสติกขนาดใหญ่และเล็กปะปนกันมากกว่า การกระจายตัวที่กว้างขึ้นในฤดูฝนผลที่คล้ายคลึงกันพบในการศึกษาของ Naji et al. [19] ที่อ่าวเปอร์เซีย ซึ่งรายงานว่าคุณภาพแวดล้อมที่ต่างกันส่งผลต่อการกระจายขนาดของไมโครพลาสติก

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบไมโครพลาสติกที่พบจำแนกตามฤดูกาล

ฤดูกาล	ปริมาณไมโครพลาสติก (ชิ้นต่อกิโลกรัม)	การกระจายขนาด (µm)	ขนาดเฉลี่ย (µm)	รูปร่าง	สี	ประเภทของไมโครพลาสติก
ฤดูฝน	413.33 ± 151.44	27.89 – 1,503.8	270.44	Fragment, Fiber, Film	น้ำเงิน, น้ำตาล, ดำ, ใส, เทา, ม่วง	PS, PP, PET, PVC, Other
ฤดูแล้ง	1,013.33 ± 220.30	42.13 – 932.06	245.71	Fragment, Fiber	เทา, ดำ, ใส, ฟ้ำ	PS, PP, PET, Other

4.3 ลักษณะของไมโครพลาสติก

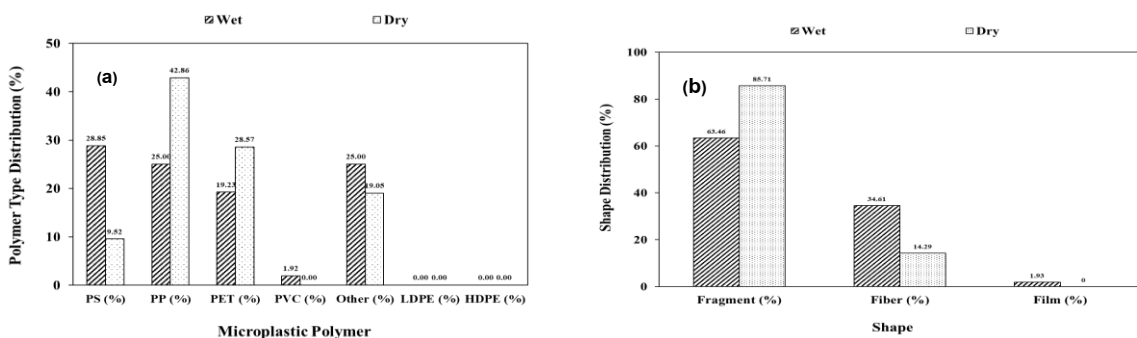
1) ประเภทโพลีเมอร์ (Polymer Types)

ผลการระบุชนิดของโพลีเมอร์ด้วยเครื่อง FTIR (รูปที่ 3(a) และรูปที่ 4) พบว่าโพลีเมอร์ที่พบส่วนใหญ่ในฤดูฝน ได้แก่ PS (ร้อยละ 28.85), PP (ร้อยละ 25.00), PET (ร้อยละ 19.23), PVC (ร้อยละ 1.92) และอื่นๆ (ร้อยละ 25.00) ขณะที่ในฤดูแล้งพบ PP (ร้อยละ 42.86), PET (ร้อยละ 28.57), PS (ร้อยละ 9.52) และอื่นๆ (ร้อยละ 19.05) ผลการทดสอบ Chi-square test แสดงให้เห็นว่าการกระจายของประเภทโพลีเมอร์แตกต่างกันระหว่างสองฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2 = 15.8$, $df = 4$, $p = 0.003$) โดยสัดส่วนของ PP และ PET เพิ่มขึ้นในฤดูแล้ง ขณะที่ PS ลดลง ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะ PP และ PET ที่มักพบในขวดน้ำและภาชนะบรรจุอาหาร ข้อสังเกตที่น่าสนใจคือ แม้ LDPE จะเป็นขยะพลาสติกที่พบมากที่สุด (> 68%) ในทั้งสองฤดูกาล แต่กลับไม่พบไมโครพลาสติกประเภท LDPE หรือ HDPE ในตัวอย่างดิน ขณะที่ไมโครพลาสติกที่พบส่วนใหญ่เป็นชนิด PP, PET และ PS ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่มีแนวโน้มแตกตัวเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ง่ายภายใต้สภาพแวดล้อมภายในบ่อฝังกลบขยะ

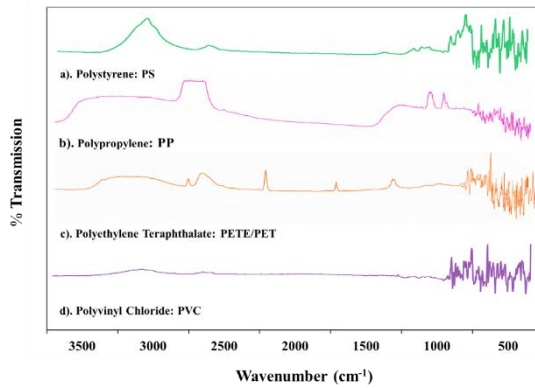
2) สัณฐานวิทยา (Morphology) และสี (Color)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไมโครพลาสติกที่พบเด่นในทั้งสองฤดูกาล (รูปที่ 3) คือ Fragment โดยมีสัดส่วนร้อยละ 63.46 ในฤดูฝน และร้อยละ 85.71 ในฤดูแล้ง ตามด้วย Fiber ที่มีสัดส่วนร้อยละ 34.61 ในฤดูฝน และร้อยละ 14.29 ในฤดูแล้ง ผลการทดสอบ Chi-square test แสดงให้เห็นว่าการกระจายของสัณฐานวิทยาแตกต่างกันระหว่างสองฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\chi^2 = 98.1$, $df = 2$, $p < 0.001$) โดย Fragment มีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้นในฤดูแล้ง ขณะที่ Fiber มีสัดส่วนลดลง อย่างไรก็ตาม พบไมโครพลาสติกรูปร่างแบบ Film เฉพาะในฤดูฝนเท่านั้น (ร้อยละ 1.93) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการใช้ฟิล์มพลาสติกห่ออาหารในช่วงฤดูฝน ทั้งนี้ การที่พบ Fragment เป็นสัณฐานวิทยาหลักสอดคล้องกับประเภทโพลีเมอร์ที่พบ (PP, PET, PS) ซึ่งมีแนวโน้มแตกตัวเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ง่าย

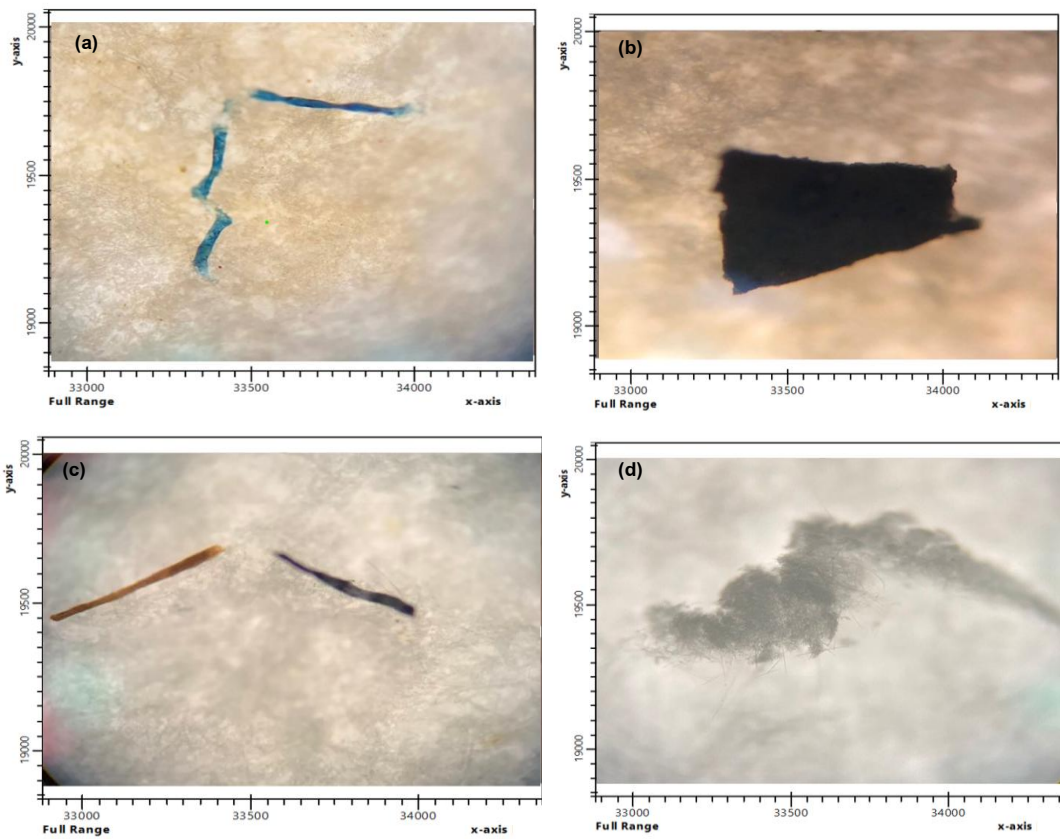
การสังเกตลักษณะไมโครพลาสติกภายใต้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ (รูปที่ 5) พบความหลากหลายของสีและรูปร่าง โดยในฤดูฝนพบสีน้ำเงิน น้ำตาล ดำ ใส เทา และม่วง เช่น Blue fiber (รูปที่ 5(a)), Black film (รูปที่ 5(b)) และ Brown and dark blue fiber (รูปที่ 5(c)) ส่วนในฤดูแล้งพบสีเทา ดำ ใส และฟ้ำ เช่น Grey fragment (รูปที่ 5(d)) การเปลี่ยนแปลงของสีที่พบอาจสะท้อนถึงแหล่งที่มาและประเภทของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ถูกทิ้งในแต่ละช่วงฤดูกาล



รูปที่ 3 ไมโครพลาสติกที่พบจำแนกตามฤดูกาล (a) ประเภทและ (b) สัณฐานวิทยา



รูปที่ 4 กราฟความยาวคลื่นของการระบุชนิดของไมโครพลาสติกด้วยเครื่อง FTIR



รูปที่ 5 สันฐานวิทยาไมโครพลาสติกที่พบในการศึกษา (a) Blue fiber, (b) Black film, (c) Brown and dark blue fiber, และ (d) Grey fragment

5. อธิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการแปรผันตามฤดูกาลของลักษณะและปริมาณไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ ณ ศูนย์จัดการขยะมูลฝอยรวมแบบครบวงจร องค์การบริหารส่วนจังหวัดลำปาง โดยเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง ผลการศึกษาพบว่า องค์ประกอบขยะพลาสติกมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 20.19 ± 2.20 โดย LDPE เป็นประเภทที่พบมากที่สุดทั้งในฤดูฝน (ร้อยละ 71.57) และฤดูแล้ง (ร้อยละ 68.20) ปริมาณไมโครพลาสติกที่พบในฤดูแล้ง ($1,013.33 \pm 220.30$ ชิ้นต่อกิโลกรัม) สูงกว่าในฤดูฝน (413.33 ± 151.44 ชิ้นต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Mann-Whitney U test, $p = 0.014$) แสดงให้เห็นว่าฤดูกาลมีอิทธิพลต่อการสะสมของไมโครพลาสติกในดิน สันฐานวิทยาที่พบเด่นคือ Fragment (ฤดูฝน ร้อยละ 63.46, ฤดูแล้ง ร้อยละ 85.71) และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ระหว่างสองฤดูกาล (Chi-square test, $p < 0.001$) ชนิดของโพลีเมอร์ที่พบส่วนใหญ่คือ PP, PET และ PS โดยการกระจายของประเภทโพลีเมอร์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองฤดูกาล (Chi-square test, $p = 0.003$)

ผลของฤดูกาลต่อปริมาณไมโครพลาสติก พบว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการสะสมของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ โดยปริมาณไมโครพลาสติกในฤดูแล้งสูงกว่าฤดูฝนประมาณ 2.45 เท่า ($p = 0.014$) ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลายประการ ในฤดูแล้ง ความชื้นในดินลดลง การระเหยของน้ำสูง และปริมาณฝนน้อย ส่งผลให้การชะล้างของไมโครพลาสติกออกจากดินมีน้อย จึงทำให้ไมโครพลาสติกสะสมอยู่ในดินมากกว่า นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงและการได้รับแสงแดดที่เพิ่มขึ้นในฤดูแล้งอาจเร่งกระบวนการเสื่อมสลายทางกายภาพและทางเคมีของพลาสติก ทำให้พลาสติกขนาดใหญ่แตกตัวเป็นไมโครพลาสติกได้เร็วขึ้น ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Mahesh et al. [10] ที่พบว่าสภาพแวดล้อมที่แห้งและมีอุณหภูมิสูงส่งเสริมการสะสมของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ ในฤดูฝน ปริมาณฝนที่สูงส่งผลให้เกิดการชะล้างและการเคลื่อนย้ายของไมโครพลาสติกออกจากดินผิวดินไปยังชั้นดินที่ลึกขึ้นหรือระบบน้ำใต้ดิน ส่งผลให้ปริมาณไมโครพลาสติกที่วัดได้ในชั้นดินผิวดิน (15 เซนติเมตร) มีค่าต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม การชะล้างนี้อาจก่อให้เกิดการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกสู่พื้นที่โดยรอบและแหล่งน้ำใกล้เคียง ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบขยะพลาสติกและไมโครพลาสติกที่พบ เป็นข้อค้นพบที่น่าสนใจ แม้ LDPE จะเป็นขยะพลาสติกที่พบมากที่สุด (> 68%) ในทั้งสองฤดูกาล แต่กลับไม่พบไมโครพลาสติกประเภท LDPE หรือ HDPE ในตัวอย่างดิน ขณะที่ไมโครพลาสติกที่พบส่วนใหญ่เป็นชนิด PP (ร้อยละ 25.00 - 42.86), PET (ร้อยละ 19.23 - 28.57) และ PS (ร้อยละ 9.52 - 28.85) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีสัดส่วนในขยะน้อยกว่า LDPE มาก ความขัดแย้งนี้สามารถอธิบายได้จากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ต่างกันของโพลีเมอร์แต่ละชนิด โดย LDPE มีความยืดหยุ่นสูงและทนทานต่อการแตกตัว จึงมีอัตราการย่อยสลายช้ากว่าและต้องใช้เวลาช้านกว่าในการแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกขนาดเล็ก (< 5 มม.) ในทางตรงกันข้าม PP, PET และ PS มีความเปราะบางมากกว่า โดยเฉพาะ PS ที่แตกหักได้ง่ายและ PET ที่เสื่อมสลายได้เร็วภายใต้สภาวะที่มีแสงแดดและความร้อน ทำให้แตกตัวเป็น Fragment ได้เร็วกว่า ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Alva and Thomas [8] ที่รายงานว่าอัตราการย่อยสลายของพลาสติกแตกต่างกันไปตามชนิดของโพลีเมอร์ โดย PS และ PET มีแนวโน้มแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกได้เร็วกว่า PE นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของ PET ในช่วงฤดูแล้ง (จากร้อยละ 10.00 เป็น 15.02 ในขยะ และจากร้อยละ 19.23 เป็น 28.57 ในไมโครพลาสติก) สะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างการบริโภคเครื่องดื่มบรรจุขวด PET ที่เพิ่มขึ้นในช่วงอากาศร้อนและการแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกที่รวดเร็วของ PET ภายใต้สภาวะแสงแดดและความร้อนสูง ในขณะที่ PP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในฤดูแล้ง (จากร้อยละ 25.00 เป็น 42.86) อาจเป็นผลมาจากการใช้ภาชนะบรรจุอาหารและผลิตภัณฑ์ประเภท PP ที่เพิ่มขึ้น

สถณฐานวิทยาและกระบวนการเสื่อมสลายของไมโครพลาสติก การที่พบ Fragment เป็นสถณฐานวิทยาหลัก (ร้อยละ 63.46-85.71) ในทั้งสองฤดูกาล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเสื่อมสลายทางกายภาพเป็นกลไกหลักในการเกิดไมโครพลาสติกในบ่อฝังกลบขยะ ตามที่ Upadhyay and Bajpai [9] ได้อธิบายว่าพลาสติกขนาดใหญ่ถูกบดอัด ถูกกระแทก และผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยแสง ความร้อน และความเค้นกล จนแตกตัวเป็นชิ้นเล็กๆ (Fragment) การเพิ่มขึ้นของสัดส่วน Fragment จากร้อยละ 63.46 ในฤดูฝนเป็นร้อยละ 85.71 ในฤดูแล้ง ($p < 0.001$) ชี้ให้เห็นว่าฤดูแล้งเอื้อต่อกระบวนการแตกตัวของพลาสติกมากกว่า เนื่องจากอุณหภูมิสูงและแสงแดดที่เข้มข้นเร่งกระบวนการ Photodegradation และ Thermal degradation กระบวนการสลายตัวของพลาสติกส่งผลโดยตรงต่อความแตกต่างของปริมาณไมโครพลาสติกระหว่างสองฤดูกาล โดยในฤดูแล้ง ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการสลายตัวประกอบด้วยแสงยูวี (UV radiation) ที่มีความเข้มข้นสูง อุณหภูมิที่สูงซึ่งเร่งกระบวนการ Thermal oxidation และความชื้นต่ำที่ทำให้พื้นผิวพลาสติกแห้งและเปราะบางมากขึ้น สภาวะเหล่านี้ทำให้โครงสร้างโพลีเมอร์ถูกทำลาย พันธะเคมีแตกหัก และพลาสติกชิ้นใหญ่แตกตัวเป็นไมโครพลาสติกได้มากขึ้นในอัตราที่สูงกว่าฤดูฝน นอกจากนี้ ในฤดูแล้งยังมีการชะล้างของน้ำฝนน้อย ทำให้ไมโครพลาสติกที่เกิดขึ้นใหม่สะสมอยู่ในดินผิวดินชั้นบนมากกว่าที่จะถูกพัดพาไป ในทางตรงกันข้าม ฤดูฝนแม้จะมีการสลายตัวทางเคมีและชีวภาพในระดับหนึ่ง

แต่กระบวนการชะล้างด้วยน้ำฝนกลับนำพาไมโครพลาสติกออกจากพื้นที่เก็บตัวอย่างไปยังชั้นดินที่ลึกขึ้นหรือบริเวณโดยรอบ ส่งผลให้ปริมาณไมโครพลาสติกในดินผิวดินลดลง ความแตกต่างของกลไกเหล่านี้จึงอธิบายได้ว่าทำไมปริมาณไมโครพลาสติกในฤดูแล้ง ($1,013.33 \pm 220.30$ ชิ้นต่อกิโลกรัม) จึงสูงกว่าฤดูฝน (413.33 ± 151.44 ชิ้นต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ Fiber มีสัดส่วนลดลงจากร้อยละ 34.61 ในฤดูฝนเป็นร้อยละ 14.29 ในฤดูแล้ง อาจเป็นผลจากการชะล้างของเส้นใยที่มีน้ำหนักเบาออกจากพื้นที่ศึกษาในช่วงฤดูฝน หรือการเปลี่ยนแปลงของแหล่งที่มาของขยะ การพบ Film เฉพาะในฤดูฝน (ร้อยละ 1.93) อาจสัมพันธ์กับการใช้ฟิล์มพลาสติกห่ออาหารที่เพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน หรือเนื่องจากฟิล์มมีน้ำหนักเบาและบางมาก จึงสลายตัวเป็น Fragment ได้เร็วในสภาวะอุณหภูมิสูงของฤดูแล้ง

ผลกระทบและนัยสำคัญเชิงสิ่งแวดล้อม ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าบ่อฝังกลบขยะไม่เพียงแต่เป็นแหล่งเก็บสะสมไมโครพลาสติกเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของไมโครพลาสติกที่สามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยรอบ โดยเฉพาะผ่านกระบวนการชะล้างด้วยน้ำฝนในฤดูฝน และการกระจายตัวด้วยลมในฤดูแล้ง ตามที่ Upadhyay and Bajpai [9] ได้รายงานว่ามีไมโครพลาสติกจากบ่อฝังกลบขยะสามารถปนเปื้อนในดิน แหล่งน้ำ และระบบนิเวศโดยรอบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหารและสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว ไมโครพลาสติกมีคุณสมบัติพื้นผิวแบบ Hydrophobic ทำให้สามารถดูดซับและรวมตัวกับสารมลพิษอื่นๆ เช่น โลหะหนัก สารอินทรีย์ที่ยากต่อการย่อยสลาย และจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้ไมโครพลาสติกกลายเป็นพาหะของสารพิษที่สามารถเคลื่อนย้ายและปล่อยสารเหล่านี้ออกมาเมื่อเข้าสู่ร่างกายของสิ่งมีชีวิต ตามที่ Mewaldt et al. [13] ได้รายงาน

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้พบว่าขยะพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 20 ของขยะทั้งหมด โดยชนิด LDPE เป็นประเภทที่พบมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 70) ปริมาณไมโครพลาสติกในฤดูแล้ง (ประมาณ 1,000 ชิ้นต่อกิโลกรัม) สูงกว่าฤดูฝน (ประมาณ 400 ชิ้นต่อกิโลกรัม) อย่างมีนัยสำคัญ ลักษณะทางกายภาพของไมโครพลาสติกที่พบมากที่สุดคือชนิด Fragment (ร้อยละ 65 - 85) รองลงมาคือชนิด Fiber (ร้อยละ 15 - 35) ชนิดโพลีเมอร์ที่ตรวจพบ ได้แก่ PP, PET และ PS ขณะที่ไม่พบ LDPE และ HDPE ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอัตราการย่อยสลายของโพลีเมอร์แต่ละชนิดภายใต้สภาพแวดล้อมของบ่อฝังกลบขยะ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าฤดูกาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณและลักษณะของไมโครพลาสติกในดินบริเวณบ่อฝังกลบขยะ

ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบมาตรการจัดการขยะที่คำนึงถึงปัจจัยตามฤดูกาล เช่น การเพิ่มความถี่ในการคลุมดินบริเวณหน้าบ่อฝังกลบในช่วงฤดูแล้งเพื่อลดการเสื่อมสภาพของพลาสติกจากการได้รับแสงแดด การปรับปรุงระบบระบายน้ำฝนเพื่อควบคุมการชะล้างและการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกในช่วงฤดูฝน รวมถึงการส่งเสริมการคัดแยกขยะพลาสติกประเภท PP, PET และ PS ซึ่งมีแนวโน้มแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกได้อย่างรวดเร็ว องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสามารถใช้ข้อมูลนี้ในการวางแผนการจัดเก็บและกำจัดขยะพลาสติกอย่างเหมาะสมกับช่วงเวลาและฤดูกาล อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัด ได้แก่ จำนวนพื้นที่ในการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างเพียงสองฤดูกาล (ฤดูฝนและฤดูแล้ง) และการวิเคราะห์เฉพาะชั้นผิวดิน ซึ่งอาจยังไม่สะท้อนภาพรวมของการกระจายตัวของไมโครพลาสติกในชั้นดินลึกหรือพื้นที่อื่น

การศึกษาต่อในอนาคตควรขยายขอบเขตไปสู่การติดตามการแพร่กระจายของไมโครพลาสติกจากบ่อฝังกลบไปยังแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินโดยรอบ เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมถึงการศึกษาในระยะยาวเพื่อทำความเข้าใจแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของการสะสมและลักษณะของไมโครพลาสติกตามช่วงเวลาซึ่งจะช่วยสนับสนุนการกำหนดนโยบายและการจัดการสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณองค์การบริหารส่วนจังหวัดลำปาง นายปฐมพงศ์ มะลิ (วิศวกรสุขาภิบาลปฏิบัติการ) นายบุรินทร์ เมืองมูล (นักวิชาการสิ่งแวดล้อมปฏิบัติการ) นางสาวอังคณา ปินตาเทพ (เจ้าหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูล) ที่ได้กรุณาให้

ความอนุเคราะห์การเก็บข้อมูลและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์ลำปาง) กองทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาเพื่อการพัฒนาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่สนับสนุนอุปกรณ์และงบประมาณในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] The active. (2025, August. 2). เร่งหาวิธีแนวทางลดขยะพลาสติกดีลิเวอรี่ 840 ล้านชิ้นต่อปี, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://theactive.thaipbs.or.th/news/pollution-20221227>
- [2] Y. Kim, J. Kang, and H. Chun, "Is online shopping packaging waste a threat to the environment?", *Economics Letters*, 214, 2022, pp. 110398.
- [3] United Nations Environment Programme. (2025, Aug. 7). Global waste management outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into resource, [Online] Available: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44939>
- [4] กรมควบคุมมลพิษ, แผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติก ระยะที่ 1 (พ.ศ. 2563 – 2565), กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพฯ, 2564.
- [5] กรมควบคุมมลพิษ, รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย, กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย, กรุงเทพฯ, 2568.
- [6] I.E. Napper, and R.C. Thomson, "Plastic debris in the marine environment: History and Future Challenges", *Global Challenges*, 4, 2020, pp. 1900081.
- [7] Plastics Europe. (2025, Oct 13). Plastics-the fast facts 2025, [Online] Available: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2025/09/PE_TheFacts_25_digital-1pager-scrollable.pdf
- [8] P.P. Alva, and T.A. Thomas, "Microplastics: a global threat to life and living", *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(725), 2025, pp. 1-28.
- [9] K. Upadhyay, and S. Bajpai, "Microplastics in landfills: A comprehensive review on occurrence, characteristics and pathways to the aquatic environment", *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(5), 2021, pp. 1935-1945.
- [10] S. Mahesh, N.K. Gowda, and S. Mahesh, "Identification of microplastics from urban informal solid waste landfill soil; MP associations with COD and chloride", *Water Science and Technology*, 87(1), 2023, pp. 115-129.
- [11] A. Puthcharoen, and S. Leungprasert, "Determination of microplastics in soil and leachate from the landfills", *Thai Environmental Engineering Journal*, 33(3), 2019, pp. 39-46.
- [12] P. Koonmee, P. Vibhatabandhu, and S. Srithongouthai, "Microplastic contamination in landfill leachate and surface water: Assessment of wastewater treatment efficiency at the Nonthaburi waste management center, Thailand", *South Eastern European Journal of Public Health*, XXV(S1), 2024, pp. 1451-1457.
- [13] C. Mewaldt, W. Armand, J. Slutzman, and J. Eisen, "The plastic pandemic: Quantification of waste on an inpatient medicine unit", *The Journal of Climate Change and Health*, 11, 2023, pp. 100230.
- [14] W. Wisitthamasri, P. Promduang, and S. Chotpantararat, "Characterization of microplastics in soil, leachate and groundwater at a municipal landfill in Rayong Province, Thailand", *Journal of Contaminant Hydrology*, 267(104455), 2024, pp. 1-14.
- [15] สำนักงานจังหวัดลำปาง, *บรรยายสรุปจังหวัดลำปาง*, กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด, ลำปาง, 2568
- [16] กรมควบคุมมลพิษ, คู่มือการคัดแยกองค์ประกอบขยะมูลฝอย ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอย, กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย, กรุงเทพฯ, 2565.

- [17] J. Masura, J. Baker, G. Foster, and C. Arthur, *Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments*, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, 2015.
- [18] P. Saengchut, H. Viriya, and N. Kongritti, "Source apportionment of microplastics in environment from sanitary landfill: A case study of Muangpak municipality landfill, Thailand", *Journal of Ecological Engineering*, 25(1), 2024, pp. 278-284.
- [19] A. Naji, Z. Esmaili, S.A. Mason, and A.D. Vethaak, "The occurrence of microplastic contamination in littoral sediments of the Persian Gulf, Iran", *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2017, pp. 20459-20468.

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล

Small Modular Reactor (SMR)

ฐกฤต ปานขลิบ*

Thakrit Panklib

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

Faculty of Engineering and Technology, Siam Technology College

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

Received: February 19, 2025

Revise: February 20, 2025

Accepted: February 21, 2025

บทคัดย่อ

ในว่ันนี้านานาประเทศทั่วโลกล้วนมีเป้าหมายในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในการผลิตพลังงานแบบเดิมที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก ไม่ว่าจะเป็น แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน หรือน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศ มาสู่การผลิตพลังงานรูปแบบใหม่ ที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือที่นิยมเรียกกันว่าพลังงานสะอาด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม น้ำ และนิวเคลียร์ ซึ่งการผลิตพลังงานจากแหล่งพลังงานสะอาดเหล่านี้มีการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศในปริมาณที่น้อยมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับการผลิตพลังงานโดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ทว่าแหล่งพลังงานสะอาดต่างๆ ก็ไม่ได้มีแต่ข้อดีไปเสียหมด บางแหล่งพลังงานยังไม่มีความสะดวกสบายเพียงพอต่อการใช้งาน อีกทั้งอาจจะต้องใช้ทรัพยากรและการลงทุนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นพลังงานนิวเคลียร์จึงเป็นอีกทางเลือกของนานาประเทศที่มีเป้าหมายในการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศหรือการปลดปล่อยคาร์บอนเป็นศูนย์ (Net Zero Emission) เนื่องจากเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาภาวะโลกร้อนที่เรากำลังเผชิญกันอยู่ในว่ันนี้ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (Small Modular Reactor หรือ SMR) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบอิสระ สามารถผลิตไฟฟ้าได้แบบสมบูรณ์แบบในตัวเองและมีข้อดีหลายประการ เช่น การผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้พื้นที่การก่อสร้างน้อย นอกจากนี้ยังมีระบบป้องกันความปลอดภัยที่สูงสามารถหยุดการทำงานได้เองเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ในอนาคตคาดว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) จะมีบทบาทสำคัญเพิ่มมากขึ้นในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาด

คำสำคัญ: โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล พลังงานทดแทน พลังงานสะอาด

Abstract

Today, countries around the world are aiming to change the traditional model of energy production that mainly uses fossil fuels. Whether it is natural gas, coal, or oil, which is the main cause of greenhouse gas emissions into the atmosphere, to the production of new forms of energy that do not cause environmental impacts, or commonly known as clean energy such as solar, wind, water, and nuclear. Greenhouse gases are released into the atmosphere in very small amounts. Especially compared to energy production using fossil fuels, clean energy sources do not have all the advantages. Some energy sources are not stable enough to be used, and they may require relatively high resources and investments. So nuclear energy is therefore another option for countries that aim to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere or to zero carbon emissions. This is because it is the main cause of the global warming problem that we are facing today. Small Modular Reactor (SMR) It is an independent small-scale nuclear power generation system that can generate electricity completely on its own, and

has many advantages, such as continuous power generation. It has no carbon dioxide emissions and uses little construction space. It also has a high security protection system. In the future, it is expected that small modular nuclear power plants (SMR) will play an increasingly important role in generating electricity from clean energy.

Keywords: small modular reactor; alternative energy; renewable energy; SMR

1. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์

หลักการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้นก็ไม่ต่างกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแบบทั่วไปเท่าไรนัก จะต่างกันที่แหล่งพลังงานความร้อนสำหรับทำให้น้ำร้อนขึ้นและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำเพื่อไปขับเคลื่อนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแหล่งพลังงานความร้อนของโรงไฟฟ้าทั่วไป อาจได้จาก น้ำมันถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ในขณะที่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (nuclear fission) ทำให้ไอโซโทปกัมมันตรังสีที่สามารถแตกตัวได้ (โดยมากที่นิยมใช้คือยูเรเนียม-235 หรือพลูโทเนียม-239) เกิดการแตกตัว แล้วคายพลังงานความร้อนออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของยูเรเนียม-235 ปริมาณเพียง 1 กรัม เทียบเท่ากับพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินปริมาณมากถึง 3,000 กิโลกรัม



รูปที่ 1 แบบจำลองสามมิติของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [8]

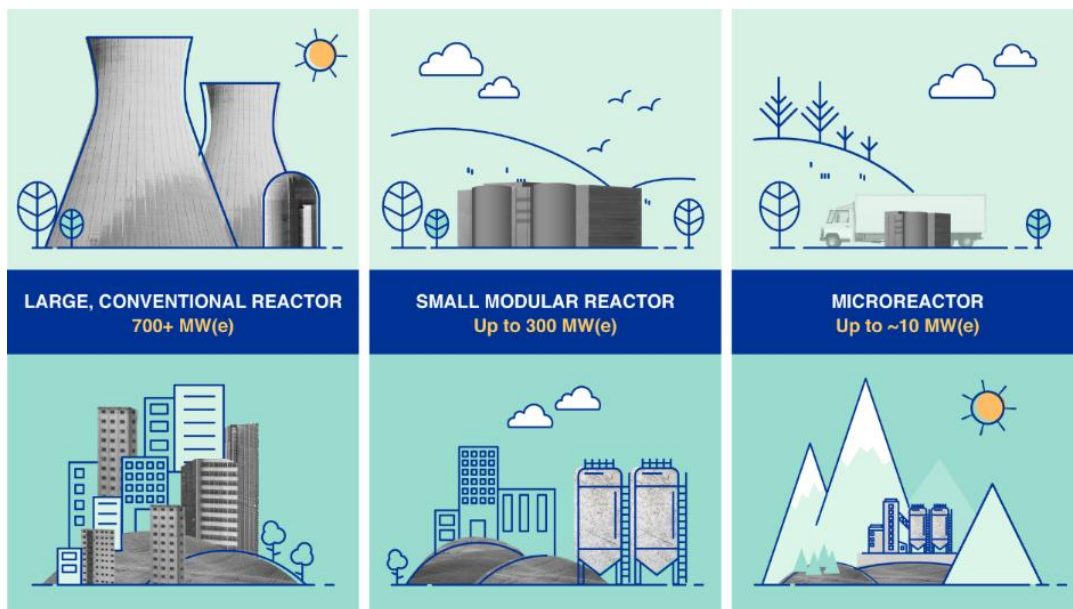
จากรูปที่ 1 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญ 5 ส่วน ได้แก่ (1) กังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (2) ระบบความปลอดภัย (safety features) ซึ่งควบคุมให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์หยุดการทำงานโดยอัตโนมัติเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน (3) เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันและถ่ายเทความร้อนหรือระบายความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของน้ำหล่อเย็นกลายเป็นไอน้ำร้อน (4) หอคอยระบายความร้อน (cooling tower) เปลี่ยนสถานะของไอน้ำให้กลับมาเป็นของเหลว และหมุนเวียนกลับไปรับพลังงานความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใหม่อีกครั้ง และ (5) ห้องควบคุมการทำงาน

ซึ่งตั้งแต่โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แห่งแรกของโลกได้ถือกำเนิดขึ้นในช่วงทศวรรษ 1950 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก็ได้มีพัฒนาการต่อเนื่องเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญของเทคโนโลยีนี้ก็คือ กากกัมมันตรังสี (radioactive waste) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยวิธีการจัดการเฉพาะเพื่อให้มั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดการรั่วไหลของกากกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม

จากข้อมูลสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ยย้อนหลัง 11 ปี (2012-2022) ของทั้ง 30 ประเทศทั่วโลก โดย World Nuclear Association พบว่าแต่ละประเทศมีการใช้เชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นสัดส่วนของการผลิตไฟฟ้าในประเทศ ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ฝรั่งเศส มาเป็นอันดับ 1 อยู่ที่ 71% กลุ่มที่ 2 สโลวาเกีย ยูเครน ฮังการี และเบลเยียม อยู่ที่ 46-54% กลุ่มที่ 3 สโลวาเนีย สวีเดน เซค บังกาเรีย สวิตเซอร์แลนด์ ฟินแลนด์ อาร์เมเนีย และเกาหลี อยู่ที่ 28-37% กลุ่มที่ 4 สเปน สหรัฐอเมริกา รัสเซีย โรมาเนีย จีน อังกฤษ แคนาดา และเยอรมันนี อยู่ที่ 12-20% กลุ่มที่ 5 ปากีสถาน แอฟริกาใต้ อาร์เจนตินา เม็กซิโก ญี่ปุ่น เนเธอร์แลนด์ อินเดีย บราซิล เบลารุส อิหร่าน และอาหรับเอมิเรตส์ อยู่ที่ 1-7%

2. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (Small Modular Reactor หรือ SMR) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบอิสระ สามารถผลิตไฟฟ้าได้แบบสมบูรณ์แบบในตัวเองโดยไม่ต้องพึ่งพาทรัพยากรและองค์ประกอบอื่นๆ จากภายนอก หากพิจารณาแล้วก็จะคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งเพียงแต่เติมเชื้อเพลิงเข้าไปก็สามารถทำงานและผลิตไฟฟ้าออกมาใช้ได้เลย



รูปที่ 2 แสดงโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ ขนาดใหญ่ เล็ก และเล็กมาก [6]

ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกต่างก็ให้ความสนใจและพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็ก หรือ SMR เพราะมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม ซึ่งได้แก่

2.1 มีขนาดเล็ก ขนาดของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SRM เล็กกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิมมาก ทำให้การก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR สามารถทำได้ในหลากหลายพื้นที่มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ขนาดเล็กซึ่งตั้งอยู่ห่างไกลและทุรกันการ

2.2 ต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ ด้วยโครงสร้างและอาคารต่าง ๆ ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR มีขนาดเล็กกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ต่ำกว่า

2.3 การทำงานแบบโมดูล ด้วยลักษณะการทำงานเป็นโมดูล (หน่วยย่อยอิสระ) ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR ทำให้สามารถแยกผลิตเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์จากสถานที่อื่น แล้วทำการขนย้ายมาติดตั้งที่โรงไฟฟ้าในภายหลังได้ (ด้วยเครื่อง

ปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบดั้งเดิมมีขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดข้อจำกัดด้านการขนย้าย) ซึ่งการดำเนินการเช่นนี้ช่วยร่นระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR ให้สั้นลงได้นั่นเอง

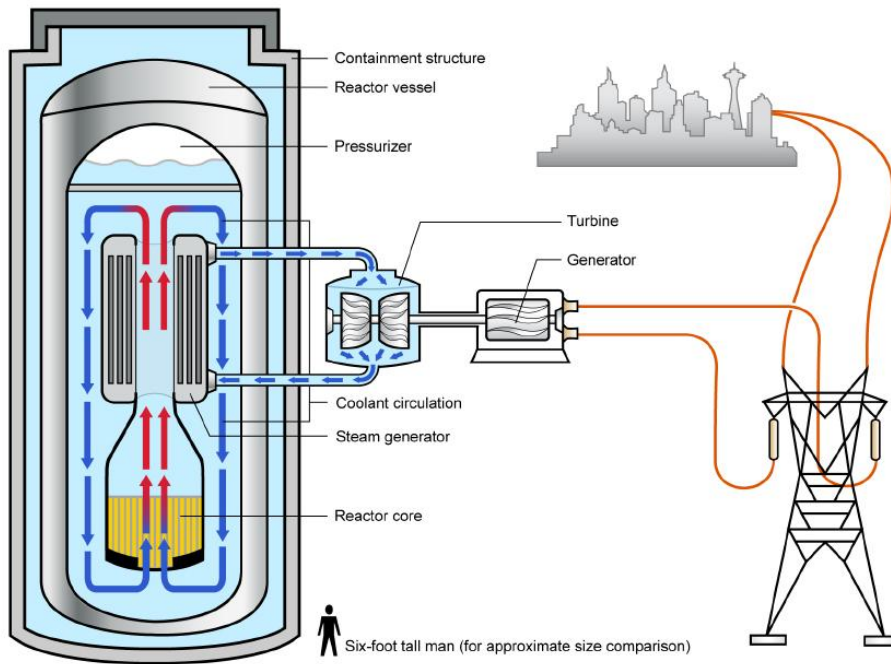
2.4 ลดปริมาณการเกิดกากกัมมันตรังสี ด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR มีขนาดเล็ก แห่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าจึงมีขนาดเล็กตามไปด้วย ส่งผลทำให้กากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แท่งเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม นอกจากนี้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR บางรุ่น ยังได้ออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบเกลือหลอมเหลว (molten salt reactor) ด้วยการใช้ระบบสารหล่อเย็นหรือการผสมเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เป็นเกลือคลอไรด์หรือฟลูออไรด์หลอมเหลวแทน โดยสถานะของเกลือหลอมเหลวนี้สามารถดูดซับกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันได้ดี ซึ่งเป็นประโยชน์ด้านความปลอดภัยด้วยการลดโอกาสการปนเปื้อนของกากกัมมันตรังสีได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.5 ระบบความปลอดภัย การออกแบบก่อสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR หลายแห่งได้มีการออกแบบและวางระบบรักษาความปลอดภัยอัตโนมัติเชิงรับ (passive safety features) ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยลดระดับความรุนแรงของความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากการเกิดอุบัติเหตุหรืออุบัติเหตุ เช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR หลายรุ่นถูกออกแบบให้สามารถปิดระบบตัวเองได้โดยอัตโนมัติเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน อีกทั้งยังสามารถควบคุมอุณหภูมิให้เย็นลง (cool down) ได้เองอีกด้วย

2.6 ความยืดหยุ่นในการผลิตไฟฟ้าร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนรูปแบบอื่นๆ โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบโมดูลนอกจากมีขนาดเล็กแล้ว ระบบการทำงานต่างๆ ยังได้รับการออกแบบให้มีความสลับซับซ้อนน้อยกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบดั้งเดิม ด้วยเหตุนี้จึงทำให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีความยืดหยุ่นสูงด้านการใช้งานร่วมกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดหรือพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) รูปแบบอื่น ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ลม และน้ำ เป็นต้น

2.7 ลดการปลดปล่อยคาร์บอนออกสู่ชั้นบรรยากาศ (decarbonization) การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR ยังคงปลดปล่อยคาร์บอนสุทธิออกสู่ชั้นบรรยากาศเป็นศูนย์ดังเช่นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่แบบเดิม แต่เนื่องด้วยข้อได้เปรียบหลายประการข้างต้น จึงทำให้การผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ SMR มีความยืดหยุ่นสูง ทั้งด้านการก่อสร้างและการใช้งาน

และที่สำคัญยังสามารถนำไปประยุกต์ได้มากมาย เช่น ในระบบพลังงานไฮบริดระหว่างพลังงานหมุนเวียนร่วมกับนิวเคลียร์เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพและความยืดหยุ่นของโครงข่ายไฟฟ้า ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ การผลิตน้ำจืด การผลิตก๊าซไฮโดรเจน ฯลฯ



รูปที่ 3 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็ก [8]

3. สถานการณ์โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) ในปัจจุบัน

ปัจจุบันมีโรงไฟฟ้า SMR ที่เปิดดำเนินการแล้วอยู่จำนวน 2 แห่ง คือ โรงไฟฟ้า Akademik Lomonosov เป็นโรงไฟฟ้า SMR แบบลอยน้ำ ขนาด 70 เมกะวัตต์ ตั้งอยู่ที่เมืองซุคอตคา ทางตอนเหนือของประเทศรัสเซีย สามารถผลิตไฟฟ้าให้กับประชาชนกว่า 1 แสนคน และโรงไฟฟ้า HTR-PM ของสาธารณรัฐประชาชนจีน ขนาด 210 MWe เริ่มเดินเครื่องเมื่อปี 2565 สามารถผลิตไฟฟ้าให้กับประชาชนกว่า 3 แสนครัวเรือน นอกจากนี้จีนยังอยู่ระหว่างก่อสร้างโรงไฟฟ้า Hainan Changjiang SMR ขนาด 125 เมกะวัตต์ คาดว่าจะเริ่มจ่ายไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ภายในปี 2569

โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล หรือ SMR มีข้อดีหลายประการ เช่น การผลิตไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้พื้นที่การก่อสร้างน้อยกว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบทั่วไปถึง 10 เท่า นอกจากนี้ยังมีระบบป้องกันความปลอดภัยที่สูงขึ้น สามารถหยุดการทำงานได้เองเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน จึงคาดการณ์ว่าในอนาคตโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูล (SMR) จะมีบทบาทสำคัญในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดมากขึ้น ซึ่งทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) คาดว่ากำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ของโลกจะขยายตัวถึง 2.5 เท่าภายในปี 2050 โดยโรงไฟฟ้า SMR จะมีส่วนช่วยในการสนับสนุนให้ประเทศต่างๆ ก้าวสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emission) ในปี 2065

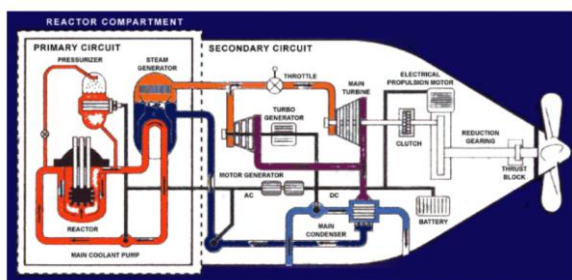
หลายประเทศกำลังวางแผนก่อสร้างโรงไฟฟ้า SMR เพื่อรองรับความต้องการไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากยานยนต์ไฟฟ้า การสร้างศูนย์ข้อมูล (Data Center) และเทคโนโลยี AI ตัวอย่างเช่น นอร์เวย์วางแผนก่อสร้างโรงไฟฟ้า SMR เพื่อผลิตไฟฟ้าและความร้อนให้กับนิคมอุตสาหกรรมหรือธุรกิจ Data Center แคนาดาตั้งเป้าก่อสร้างโรงไฟฟ้า SMR แห่งแรกภายในปี 2577 เกาหลีใต้ได้ประกาศวางแผนพัฒนาพลังงานแห่งชาติชุดใหม่ โดยมีแผนก่อสร้างโรงไฟฟ้า SMR ให้พร้อมใช้งานประกอบอยู่ด้วย

สำหรับประเทศไทย ได้เตรียมการจัดตั้งโครงสร้างพื้นฐานพลังงานนิวเคลียร์และประเมินความพร้อมโครงสร้างพื้นฐาน 19 ด้าน มาอย่างต่อเนื่อง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ติดตามศึกษาเทคโนโลยีนิวเคลียร์และ SMR จากหลายประเทศทั่วโลก เพื่อศึกษาเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับประเทศไทย

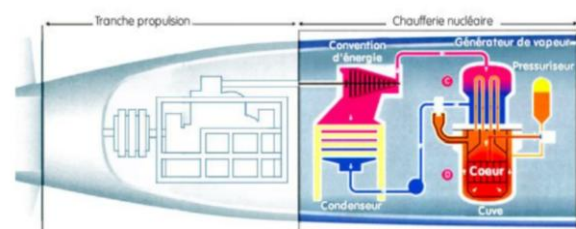
4. การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี SMR

อย่างที่ทราบกันว่า SMR (Small Modular Reactor) ก็คือ เตปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบโมดูลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นนวัตกรรมใหม่ของเทคโนโลยีด้านพลังงานนิวเคลียร์ มีขนาดเล็กกะทัดรัดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในอดีต หากในวันข้างหน้ามีความจำเป็นต้องลดสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและก๊าซธรรมชาติ SMR ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเข้ามาช่วยเสริมเพื่อรองรับความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในอนาคต อีกทั้งสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพของพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น ลม แสงอาทิตย์ ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบการผลิตในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมอย่างฉับพลัน

SMR เป็นเตปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่มีขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดถึง 300 MW ต่อเครื่อง ซึ่งเทียบเท่าประมาณ 1 ใน 3 ของขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของเตปฏิกิริยานิวเคลียร์แบบดั้งเดิม โดย SMR จะถูกผลิตจากโรงงานและขนส่งไปติดตั้งยังสถานที่ปลายทางตามที่ต้องการ ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว จึงทำให้ในอนาคตอาจมีการนำเอาเทคโนโลยี SMR ไปประยุกต์ใช้งานเกิดขึ้นมากมาย ที่ผ่านมามีการนำเอาไปใช้ในเรือดำน้ำและยานอวกาศ เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัดและมีความสามารถในการผลิตพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กทำหน้าที่ผลิตไอน้ำไปขับเคลื่อนกังหันเพื่อขับเคลื่อนเรือดำน้ำและผลิตไฟฟ้าสำหรับระบบบนเรือ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ช่วยให้เรือดำน้ำสามารถอยู่ใต้น้ำได้นานขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับภารกิจทางการทหารและการวิจัยต่างๆ ได้เป็นอย่างดี ในส่วนของการติดตั้งบนยานอวกาศ สามารถช่วยลดการพึ่งพาแผงโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ที่ติดตั้งเอาไว้บนยานอวกาศได้เป็นจำนวนมาก ช่วยให้มีน้ำหนักและขนาดที่เล็กลงและสามารถปฏิบัติการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



UK nuclear submarine layout



French integral PWR system for submarine (steam generator within reactor pressure vessel)

รูปที่ 4 แสดงการใช้งาน SMR ในเรือดำน้ำและในยานอวกาศ [2]

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Panklib T. Energy storage technologies for renewable energy. J Energy Environ Technol Grad Sch Siam Technol Coll. 2022;9(1):103–117.
- [2] Energy Regulatory Commission (ERC). Energy articles [Internet]. Bangkok: Energy Regulatory Commission; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://www.erc.or.th/th/energy-articles/2924>
- [3] Green Network Thailand. SMR nuclear power plant [Internet]. Bangkok: Green Network Thailand; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://www.greennetworkthailand.com/smr-nuclear-power-plant>
- [4] Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). Power generation information [Internet]. Nonthaburi: EGAT; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://ned.egat.co.th/index.php/component/sppagebuilder/?view=page&id=50>
- [5] Kader A. Small modular reactors [Internet]. Stanford (CA): Stanford University; 2022 [cited 2025 Aug 27]. Available from: <http://large.stanford.edu/courses/2022/ph241/kader1/>

- [6] International Atomic Energy Agency (IAEA). What are small modular reactors (SMRs)? [Internet]. Vienna: IAEA; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [7] ScienceDirect Topics. Small nuclear reactors [Internet]. Amsterdam: Elsevier; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/small-nuclear-reactors>
- [8] Nuclear Power. Nuclear power plant [Internet]. [place unknown]: Nuclear Power; [cited 2025 Aug 27]. Available from: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power-plant/>

การทบทวนงานวิจัยอย่างมีระบบ: การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์และการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์เพื่อความยั่งยืน

A Systematic Review: Carbon Footprint Reduction and Technological Transition in the Compressor Industry for Sustainability

อริศโนชา เพ็ญหนู¹ เสรีย์ ตู้ประกาย^{1*} กฤษดา พิศลยุบุตร¹ อนุวัต เจริญสุข² นันทน์ภัสร์ อินยิม¹ วัฒนา จันทะโคตร¹
Aritsanocha Pennoo¹ Seree Tuprakay^{1*} Krissada Phitsanlabut¹ Anuwat Charoensuk² Nannapasom Inyim¹
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 Chalemprakiew University

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

Received: October 30, 2025

Revise: November 26, 2025

Accepted: December 18, 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมการผลิตคอมเพรสเซอร์ โดยประเมินทั้งในระดับองค์กรและในบริบทเชิงอุตสาหกรรม พบว่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Scope 2) เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สูงที่สุดของโรงงานคอมเพรสเซอร์ เนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปโลหะ การทดสอบระบบ และการเดินเครื่องจักรต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจำนวนมาก โดย Scope 2 มีสัดส่วนมากกว่า Scope 1 (เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น) อย่างชัดเจน ขณะที่ Scope 3 แม้จะครอบคลุมคาร์บอนฝังตัวในวัตถุดิบโลหะ กระบวนการผลิตวัตถุดิบ และการขนส่งผลิตภัณฑ์ไปยังตลาดส่งออก แต่ยังคงมีความแปรผันสูงขึ้นอยู่กับข้อมูลรายซัพพลายเออร์และโครงสร้างซัพพลายเชนของแต่ละบริษัท ในการศึกษาตลาดโลกพบว่า จีนครองส่วนแบ่งตลาดคอมเพรสเซอร์สูงสุดราว 42–43% รองลงมาได้แก่ยุโรป สหรัฐฯ และอินเดีย ซึ่งต่างเร่งปรับตัวด้านเทคโนโลยีสะอาดคล้อยตามกฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด ส่งผลต่อความสามารถแข่งขันของผู้ผลิตไทย ทางด้านเทคโนโลยี พบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพอินเวอร์เตอร์คอมเพรสเซอร์ การเลือกใช้สารทำความเย็นที่มีค่า GWP ต่ำ การออกแบบเชิงวิศวกรรมขั้นสูง และระบบบริหารจัดการพลังงาน เป็นมาตรการที่ช่วยลดการปล่อยรวมได้ราว 20–38% โดยเฉพาะมาตรการที่ช่วยลดการใช้ไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อ Scope 2 มากที่สุด เมื่อประเมินบริบทอุตสาหกรรมพบว่า คอมเพรสเซอร์เป็นอุตสาหกรรมที่สามารถลดการปล่อยได้อย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมหนักอื่นที่พึ่งพาเทคโนโลยีต้นทุนสูง จึงมีบทบาทสำคัญในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร เพิ่มความสามารถแข่งขัน และเตรียมความพร้อมสู่ตลาดส่งออกที่มีมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมเข้มงวด ตลอดจนสนับสนุนยุทธศาสตร์ความยั่งยืนของอุตสาหกรรมไทยในการมุ่งสู่เป้าหมาย Net Zero ในระยะยาว

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร การประเมินวัฏจักรชีวิต การเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยี ความเป็นกลางทางคาร์บอน อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

Abstract

This study examines greenhouse gas (GHG) emissions in the compressor manufacturing industry at both the organizational level and the broader industrial context. The objective is to assess mitigation potential across the value chain (Scope 1–3) under ongoing technological transitions and evolving global market demands. The analysis reveals that electricity consumption (Scope 2) is the largest source of GHG emissions in compressor manufacturing. High electricity use in metal forming, machining, system testing, and continuous machine operation contributes to Scope 2 emissions that clearly exceed those from Scope 1 sources (fuel combustion and refrigerant leakage). Although Scope 3 emissions include embodied carbon in metal raw materials, upstream material processing, and transportation to export markets, these values vary significantly depending on supplier-specific data and supply-chain structures. A global market review shows that China dominates the compressor market with a 42–43% share, followed by Europe, the United States, and India. Each region is rapidly adapting to environmental regulations and low-carbon technology requirements, which directly influence the competitiveness of Thai manufacturers within international supply chains. On the technological front, key mitigation opportunities include efficiency improvements in inverter compressors, adoption of low-GWP refrigerants, advanced engineering design, and comprehensive energy-management systems. These measures can collectively achieve approximately 20–38% emission reduction, with the most significant impact linked to reductions in electricity consumption—therefore directly targeting Scope 2, the highest-emitting category. From an industrial perspective, the compressor sector is considered a “fast-transition” industry compared to heavy industries that depend on high-cost decarbonization technologies. As such, it plays an important role in lowering organizational carbon footprints, enhancing competitiveness, and meeting stricter environmental requirements in export markets. These developments also support the long-term sustainability strategy of Thai manufacturers as they progress toward Net Zero targets.

Keywords: Carbon Footprint of Organization, Life Cycle Assessment, Technological Transition, Carbon Neutrality, Compressor Industry

1. บทนำ

อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์เป็นส่วนสำคัญของระบบทำความเย็นที่ใช้พลังงานคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 ของพลังงานโลก [1] ทำให้อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในภาคอุตสาหกรรม ในประเทศไทยตลาดอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์มีการเติบโตต่อเนื่อง ปี ค.ศ. 2023 ที่ส่งออกคอมเพรสเซอร์ 163.68 ล้าน กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 5.25 ของตลาดโลก และมีแนวโน้มเติบโตทั้งเชิงปริมาณและมูลค่าตลาดในอนาคต [2, 3] อย่างไรก็ตามการเติบโตนี้มีผลกระทบหลายมิติ ได้แก่ การเพิ่มสูงของอุณหภูมิโลก การสูญพันธุ์ของแนวปะการัง และการเพิ่มความรุนแรงของภัยธรรมชาติ (ด้านระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม) การเพิ่มภาระต้นทุนการดำเนินงานในอนาคตจากมาตรการการค้าคาร์บอนระหว่างประเทศ CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) ในปี ค.ศ. 2026–2027 (ด้านเศรษฐกิจ) และส่งผลต่อคุณภาพอากาศ และความเสถียรด้านสุขภาพในระยะยาว (ด้านสุขภาพและสังคม) [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]

ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีคอมเพรสเซอร์และการปรับปรุงประสิทธิภาพจึงเป็นกลไกสำคัญ เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคอุตสาหกรรม ช่วยให้ผู้ประกอบการในห่วงโซ่อุปทานสามารถแข่งขันได้ในระยะยาวภายใต้มาตรการคาร์บอนระหว่างประเทศ สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ได้แก่ SDG 7 การเข้าถึงพลังงานสะอาด, SDG 9 การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน อุตสาหกรรมและนวัตกรรม, และ SDG 13

การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [12] รวมทั้งขาดการศึกษาเปรียบเทียบเชิงระบบในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ของไทย จึงดำเนินการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของคอมเพรสเซอร์ประเภทต่าง ๆ เปรียบเทียบศักยภาพการลดการปล่อยของเทคโนโลยีในปัจจุบันและอนาคต เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของภาคอุตสาหกรรม [13]

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ โดยสำรวจแนวทางการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากงานวิจัยในระดับสากลและประเทศไทย เพื่อแสดงภาพรวมและแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และ (2) วิเคราะห์และเปรียบเทียบศักยภาพของเทคโนโลยีคอมเพรสเซอร์ที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก พร้อมเสนอแนวทางเชิงกลยุทธ์เพื่อสนับสนุนการยกระดับอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ของไทยในการเปลี่ยนผ่านสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนและการแข่งขันในตลาดโลกอย่างยั่งยืน

3. เครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แนวทาง การทบทวนเชิงระบบ (Systematic Research Synthesis) เพื่อรวบรวม ความรู้ด้านการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ โดยอ้างอิงแนวทาง PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [13] เพื่อให้การคัดเลือกงานวิจัยมีความโปร่งใส และตรวจสอบได้ด้วยการกำหนด n คือ จำนวนงานวิจัยตามวิธีการ ดังนี้

3.1 การระบุงานวิจัย (Identification)

ทำการสืบค้นเอกสารจากฐานข้อมูลวิชาการหลัก ได้แก่ Scopus, ScienceDirect, SN Applied Sciences และ ResearchGate รวมทั้งรายงานจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้คำสำคัญทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ได้แก่ life cycle assessment, carbon footprint, compressor, carbon neutrality, greenhouse gas emissions, compressor technology efficiency [14, 15] ครอบคลุมช่วงปี ค.ศ. 2015–2025

3.2 การคัดกรอง (Screening)

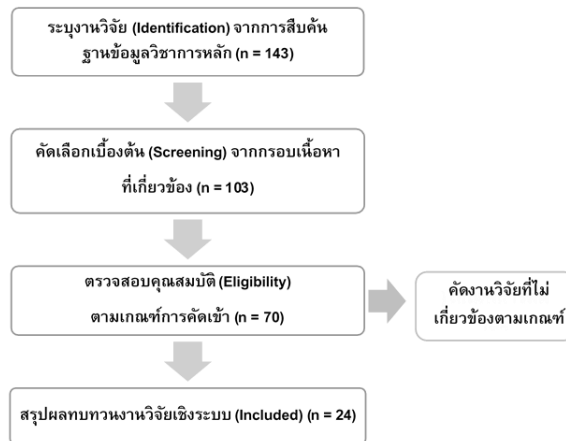
คัดกรองเอกสารเบื้องต้นตามประเด็นที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ได้แก่ (1) แนวทางการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศโดยอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารสืบเนื่องการประชุมวิชาการนานาชาติด้วยคอมเพรสเซอร์ รายงานจากการประชุมนานาชาติว่าด้วยความก้าวหน้าในการวิจัยพลังงานสะอาด รายงานด้านความยั่งยืนของบริษัทเครื่องปรับอากาศชั้นนำ ตลอดจนข้อมูลจากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) และ (2) เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และตัดทิ้งเอกสารที่ไม่เกี่ยวข้องกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือไม่มีข้อมูลด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงออก

3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติ (Eligibility)

ประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของเอกสาร โดยตัดเข้า: งานวิจัยที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (peer-reviewed) และรายงานจากองค์กรระหว่างประเทศหรือหน่วยงานวิชาการด้านอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ พลังงานนวัตกรรม เทคโนโลยีและก๊าซเรือนกระจก และคัดออก: เอกสารที่ไม่สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ หรือเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อมทั่วไปที่ไม่เชื่อมโยงกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการปรับปรุงด้านเทคโนโลยีภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

3.4 การสรุปผล (Included)

หลังคัดเลือกงานวิจัยอย่างเป็นระบบได้จำนวน 24 เรื่อง เพื่อนำไปวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบตามประเด็นหลัก ได้แก่ รูปแบบและปริมาณการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ และเทคโนโลยีและศักยภาพการลดก๊าซเรือนกระจกของกิจกรรม หรือกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์โดยกรอบการทบทวนเหล่านี้ช่วยสนับสนุนทิศทางการวิจัย และนโยบายด้านการลดก๊าซเรือนกระจกให้สอดคล้องกับ SDGs



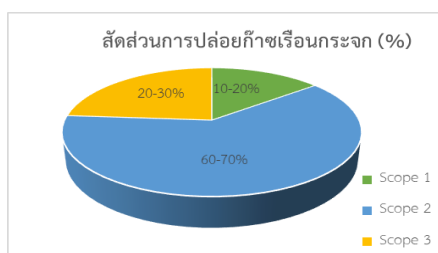
รูปที่ 1 เครื่องมือและวิธีการดำเนินการทบทวนงานวิจัยเชิงระบบ

4. ผลการศึกษางานวิจัย

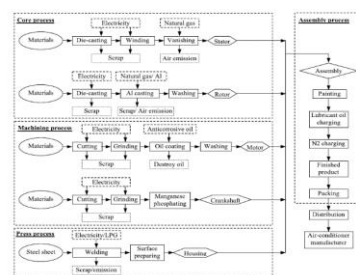
จากการทบทวนและสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

4.1 การวิเคราะห์สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามขอบเขต (GHG Scopes)

สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงานคอมเพรสเซอร์ แบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตหลัก ได้แก่ Scope 1, Scope 2 และ Scope 3 ซึ่งแต่ละ Scope มีแหล่งกำเนิดและข้อมูลกิจกรรม (Activity Data) ที่แตกต่างกัน โดยมีผลกระทบต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในสัดส่วนไม่เท่ากัน



รูปที่ 2 สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ [16, 17, 18]



รูปที่ 3 กระบวนการผลิตโรตารีคอมเพรสเซอร์

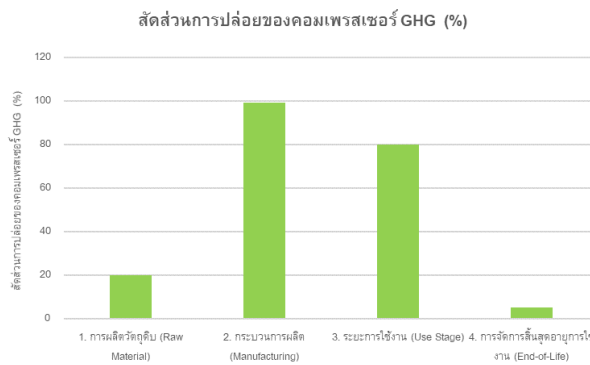
จากรูปที่ 2 พบว่าสัดส่วนการปล่อยจาก Scope 2 สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิตคอมเพรสเซอร์เป็นจุดวิกฤตของการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โรงงานต้องใช้เครื่องจักรความแม่นยำสูงต่อเนื่อง เช่น กลึง เจียร อบชุบ และทดสอบ (รูปที่ 3) ทำให้ไฟฟ้าเป็นต้นทุนพลังงานหลัก [16] ดังนั้น การลด Scope 2 จึงต้องมุ่งเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องจักร ลด Idle Time ปรับปรุงกระบวนการผลิต ใช้พลังงานสะอาด และใช้ข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อสร้างความได้เปรียบเชิงการแข่งขัน [17]

Scope 3 รองลงมา โดยส่วนใหญ่มาจากคาร์บอนฝังตัวในวัตถุดิบต้นน้ำ โดยเฉพาะเหล็กและทองแดงประมาณ 20–30% (รูปที่ 3) รวมถึงการขนส่งวัตถุดิบ [18] จึงสามารถลดได้ผ่านการเลือกวัสดุที่เหมาะสม การใช้โลหะรีไซเคิล และการบริหารห่วงโซ่อุปทานสีเขียว ซึ่งเป็นมาตรการสำคัญในระยะกลางถึงระยะยาว

Scope 1 มีสัดส่วนน้อยที่สุด แต่มีความเสี่ยงด้านสิ่งแวดล้อมสูง เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น ซึ่งมี GWP สูงมาก [19] แม้ปริมาณการปล่อยจะต่ำ แต่ผลกระทบต่อโลกร้อนต่อหน่วยสูง จึงต้องให้ความสำคัญกับการควบคุมการรั่วไหลและการเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นแบบ Low-GWP

โดยสรุป ผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 Scopes ชี้ว่า การลดการปล่อยอย่างมีประสิทธิภาพต้องดำเนินการทั้งด้านเทคโนโลยีและการบริหารจัดการ ได้แก่ 1) เพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและพลังงานหมุนเวียนเพื่อลด Scope 2 (สนับสนุน SDG 7 และ SDG 13) 2) จัดการสารทำความเย็นและลดการรั่วไหลเพื่อลด Scope 1 (สอดคล้องกับ SDG 12) และ 3) พัฒนาห่วงโซ่อุปทานสีเขียวเพื่อลด Scope 3 (สนับสนุน SDG 9 และ SDG 12)

4.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบสัดส่วนวงจรชีวิตของคอมพิวเตอร์ (Life Cycle Inventory Analysis) ในการปล่อยก๊าซเรือนกระจก



รูปที่ 4 สัดส่วนวงจรชีวิตของคอมพิวเตอร์ [21, 22, 23, 24, 25]

จากกราฟที่ 4 วงจรชีวิต (Life Cycle Assessment: LCA) ของคอมพิวเตอร์ครอบคลุมตั้งแต่ การผลิตวัตถุดิบ (Raw Material) เช่น เหล็กและทองแดง ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักเนื่องจากมีคาร์บอนฝังตัวสูง โดยพลังงานหลักที่ใช้ในการผลิตได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันดิบ คิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 15–20 ของการปล่อยรวมตลอดวงจรชีวิต [21] ต่อมาคือกระบวนการผลิต (Process/Manufacturing) ที่ใช้ไฟฟ้าปริมาณมากในขั้นตอนการกลึง ออบชุบ และทดสอบ ส่งผลให้การปล่อยใน Scope 2 ของโรงงานเป็นแหล่งสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 99.1–99.3 ของการใช้พลังงานทั้งหมด [22, 23] อีกทั้งยังมีการปล่อยจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นในระบบทดสอบ [24]

มากกว่าระยะการใช้งาน (Use Stage) ของผู้บริโภค ถือเป็นจุดที่ปล่อยสูงที่สุด โดยมีการใช้ไฟฟ้าสูงถึง 70–80% เนื่องจากคอมพิวเตอร์ต้องทำงานต่อเนื่อง ทั้งนี้การปรับอุณหภูมิขึ้นเพียง 1°C สามารถลดการปล่อย CO₂ ได้ราว 6.37% ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทสำคัญของเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์และพฤติกรรมผู้บริโภค [23, 25] ส่วนการกำจัด (Disposal) และระยะสุดท้ายของการใช้งาน (End-of-Life) ส่วนมากมาจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซน (ODP) และค่า GWP สูง แม้ผลกระทบต่อด้าน Climate Change จะมีสัดส่วนต่ำ (<5% ของก๊าซเรือนกระจกรวมตลอดวงจรชีวิต) แต่หากมีการจัดการอย่างเป็นระบบ เช่น การรีไซเคิลโลหะ จะสามารถลดการปล่อยเพิ่มเติมและสร้างโอกาสของเศรษฐกิจหมุนเวียนได้ (Circular Economy) [23, 24, 25]

ดังนั้น เมื่อพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของวงจรคอมพิวเตอร์ พบว่าช่วงกระบวนการผลิตของคอมพิวเตอร์เป็นแหล่งปล่อยที่สูงกว่าขั้นอื่น เนื่องจากการพึ่งพาไฟฟ้าปริมาณมาก โดยเฉพาะในขั้นตอนการผลิตชิ้นงาน

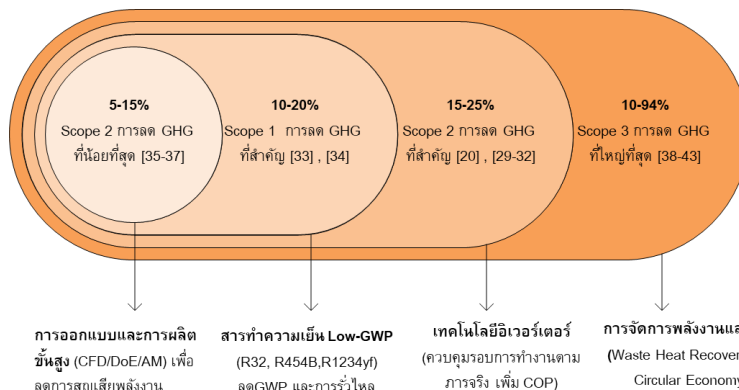
เพื่อส่งเข้าประกอบและการทดสอบทุกเครื่องก่อนส่งมอบ สะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตที่ประหยัดพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องจักร และการเปลี่ยนไปใช้พลังงานหมุนเวียนในโรงงาน เพื่อช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตได้

4.3 ศักยภาพการลดคาร์บอนของคอมเพรสเซอร์แต่ละประเภท

จากการประเมินข้อ 4.2 พบว่าระยะเวลาการใช้งานเป็นแหล่งการปล่อยสูงสุดของคอมเพรสเซอร์ โดยเฉพาะไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับ Scope 2 รองลงมาคือ Scope 3 จากวัตถุดิบและการขนส่ง และ Scope 1 จากการรั่วไหลของสารทำความเย็น ดังนั้นการลด GHG จึงเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและใช้สารทำความเย็น GWP ต่ำ เช่น อินเวอร์เตอร์โรตารีที่ใช้ R32 ลดได้สูงสุด ~38% เหมาะกับตลาดเอเชีย ส่วนสโครลดได้ ~20-35% ใช้กับอาคาร คอมเพรสเซอร์สกรูลด ~15-30% ในอุตสาหกรรม และลูกสูบลด ~10-20% ยังนิยมเพราะราคาต่ำ สรุปคือเทคโนโลยีด้านพลังงานและสารทำความเย็นสำคัญในปัจจุบัน ขณะที่การพัฒนาซัพพลายเชนและรีไซเคิลเป็นมาตรการระยะยาวเพื่อความยั่งยืนของอุตสาหกรรม [26-29]

4.4 เทคโนโลยีและนวัตกรรมในการลดคาร์บอนของคอมเพรสเซอร์

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์สามารถทำได้หลายแนวทาง ทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน การใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการจัดการวัตถุดิบและพลังงานหมุนเวียนดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเชื่อมโยงแนวทางด้านเทคโนโลยีและศักยภาพการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์

จากรูปที่ 5 พบว่าเทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์เป็นมาตรการที่นำไปใช้ได้ทันที ลดการสูญเสียจากการเปิด-ปิด เพิ่ม COP ช่วยลด Scope 2 ได้ราว 15-25% [20], [29-32] สารทำความเย็น Low-GWP เช่น R32, R454B ช่วยลดทั้งการใช้พลังงานและการรั่วไหล (Scope 1) ได้ 10-20% โดยพบว่า การฉีดไอ (vapor injection) เพิ่ม COP ได้ 4.3-4.4% [33], [34] Advanced Design เช่น CFD/DoE การจัดการอุณหภูมิ twin screw และ motion efficiency ของ scroll ช่วยลดพลังงานลง 5-15% [35-37] ระบบจัดการพลังงานทั้ง เช่น WHR ใน oil-free screw compressors นำความร้อนกลับมาใช้ได้ 90-94% และ Circular Economy ลด Scope 3 ได้อย่างมีนัยสำคัญ [38-43] สรุปแนวทางที่เน้นประสิทธิภาพพลังงานตอบโจทย์การลดการปล่อยช่วงใช้งานที่มีสัดส่วนสูงสุด สอดคล้อง SDG 7 และ SDG 13 ขณะที่สารทำความเย็น Low-GWP และการจัดการวัสดุสนับสนุน SDG 9 และ SDG 12 ส่งเสริมการเปลี่ยนผ่านสู่อุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์คาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

4.5 กรณีศึกษาการเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์

การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ไม่เพียงช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก แต่ยังสร้างโอกาสทางธุรกิจใหม่ทั้งด้านผลิตภัณฑ์ ตลาด และห่วงโซ่อุปทาน แนวทางสำคัญ ได้แก่ การใช้มอเตอร์อินเวอร์เตอร์ เพื่อลดพลังงานในช่วง Use Stage ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยคาร์บอนสูงสุด และการเปลี่ยนสารทำความเย็นไปสู่ชนิด Low-GWP หรือสารธรรมชาติ ได้แก่ ญี่ปุ่น: ผู้ผลิต Daikin และ Panasonic ใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ร่วมกับ R32 ตั้งแต่ทศวรรษ 1990 ช่วยลดการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ย 20-30% ตลอดอายุการใช้งาน และลดการปล่อยคาร์บอนจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นราว

67% เมื่อเทียบกับ R410A นอกจากนี้ยังสร้างรายได้จากการขาย carbon credits โดยเฉพาะในตลาดเอเชีย-แปซิฟิกที่มีอัตราเติบโตสูง [16, 26, 44], ยุโรป: Bitzer และ GEA Group พัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้สารทำความเย็นธรรมชาติ สอดคล้องกับ EU F-gas Regulation การเปลี่ยนผ่านนี้ช่วยลดศักยภาพการก่อโลกร้อนจากสารทำความเย็นเกือบทั้งหมด อีกทั้งเปิดตลาดใหม่ด้านบริการรวบรวมและรีไซเคิลสารทำความเย็น สนับสนุน circular economy และเป้าหมาย Net Zero ของ European Green Deal ภายในปี 2050 [30, 45–48] จีนและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้: ผู้ผลิตใหญ่ เช่น Midea และ Gree ลงทุนในอินเวอร์เตอร์คอมเพรสเซอร์และ R32 อย่างต่อเนื่อง ลดการใช้ไฟฟ้าของผู้บริโภคจำนวนมาก และช่วยลดการปล่อยคาร์บอนระดับประเทศ พร้อมเพิ่มโอกาสในตลาดส่งออกผ่านฉลาก Energy Star และ Carbon Label ซึ่งเสริมความสามารถแข่งขันในอนาคต [49–51] จากกรณีศึกษาพบว่า การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีที่เน้นอินเวอร์เตอร์และสารทำความเย็น Low-GWP เป็นมาตรการสำคัญที่ลดการปล่อยคาร์บอน สร้างมูลค่าเพิ่ม และสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนรวมทั้งการตอบสนองต่อกฎหมายและเป้าหมายความยั่งยืนระดับสากล

4.6 การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรม

การเปลี่ยนผ่านด้านเทคโนโลยีในภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์สู่เทคโนโลยีคาร์บอนต่ำแตกต่างกันตามต้นทุนเวลา และความพร้อมของนวัตกรรมอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์จัดเป็นกลุ่ม Quick Win สามารถลดการปล่อยก๊าซ 20–38% ในระยะสั้นผ่านการใช้ระบบอินเวอร์เตอร์ สารทำความเย็น Low-GWP และการออกแบบประสิทธิภาพสูง โดยไม่ต้องลงทุนโครงสร้างพื้นฐานใหม่ [52, 53] ในทางตรงข้าม อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์และเหล็ก จัดเป็นกลุ่ม hard-to-abate sectors เนื่องจากแหล่งปล่อยหลักมาจากกระบวนการพื้นฐาน ต้องอาศัยเทคโนโลยีใหม่ที่มีต้นทุนสูงและใช้เวลาพัฒนา เช่น การดักจับคาร์บอนและไฮโดรเจน [54, 55] อุตสาหกรรมยานยนต์ แม้ศักยภาพลดการปล่อยสูง 25–50% ผ่านการเปลี่ยนไปสู่รถยนต์ไฟฟ้า แต่ยังคงจำกัดด้วยห่วงโซ่อุปทานและความท้าทายด้านวัตถุดิบและความยั่งยืน [56, 57]

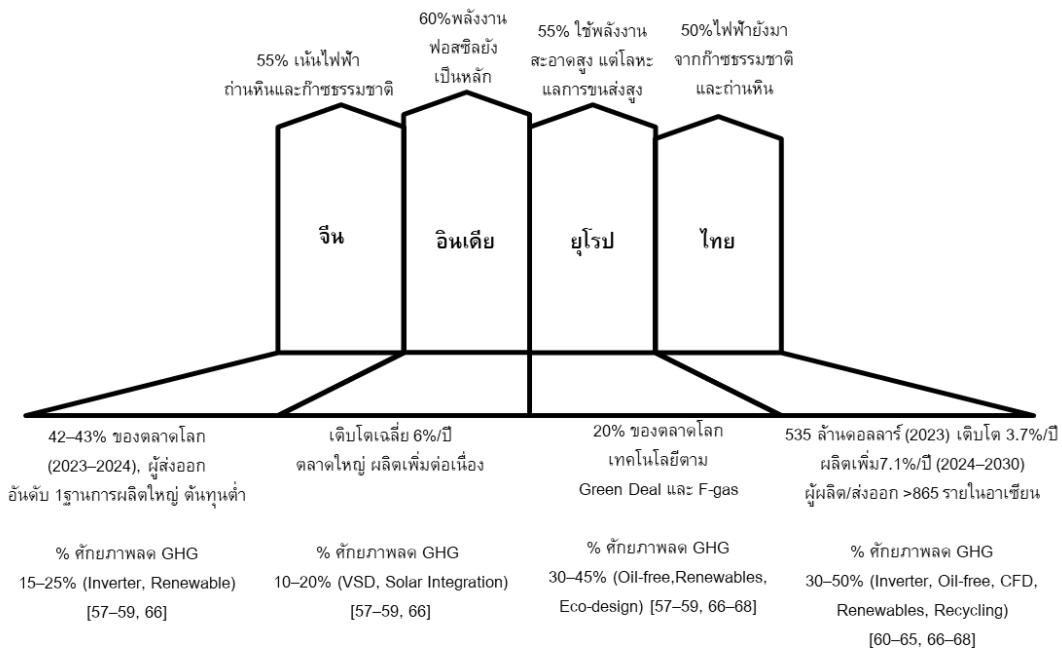
4.7 ตลาดคอมเพรสเซอร์กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

จีนครองสัดส่วนตลาดคอมเพรสเซอร์โลกสูงสุด 42–43% ในปี 2023–2024 และเป็นผู้ส่งออกอันดับหนึ่ง อินเดียเติบโตเฉลี่ย 6% ต่อปี ยุโรปประมาณ 20% ของตลาดเห็นเทคโนโลยีสอดคล้อง European Green Deal และ F-gas Regulation ส่วนสหรัฐฯ มีจุดแข็งด้านคอมเพรสเซอร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูง [57–59]

สำหรับไทย แม้ตลาดเล็กกว่าจีน แต่เติบโตต่อเนื่อง มูลค่าปี 2023 ประมาณ 535.3 ล้านดอลลาร์ คาดเติบโต 3.7% ต่อปี ผลิตเพิ่มเฉลี่ย 7.1% ต่อปี (2024–2030) ส่งออกปี 2023 อยู่ที่ 163.68 ล้านกก. คาดเพิ่มเป็น 187 ล้านกก. ในปี 2028 ตลาดหลัก ได้แก่ เวียดนาม อินเดีย และอินโดนีเซีย โดยมีผู้ผลิตและผู้ส่งออกกว่า 865 ราย [63–65]

การเพิ่มขึ้นของการผลิตและส่งออกไทยส่งผลต่อการปล่อย GHG ทั้ง Scope 1 จากเชื้อเพลิงและการรั่วไหลสารทำความเย็น, Scope 2 จากไฟฟ้าที่พึ่งพาก๊าซธรรมชาติและถ่านหิน, และ Scope 3 จากคาร์บอนฝังตัวในโลหะและการขนส่งไปตลาดส่งออก (~80% ของการส่งออกทั้งหมด) [60–65]

แม้เอเชีย-แปซิฟิกครองตลาดสูง แต่จีนและอินเดียยังพึ่งพาพลังงานฟอสซิล แตกต่างจากยุโรปและสหรัฐฯ ที่มีมาตรฐานสิ่งแวดล้อมเข้มงวด เช่น European Green Deal, F-gas Regulation และ CBAM [66, 67] ดังนั้นผู้ผลิตไทยจำเป็นต้องลงทุนเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูง เช่น อินเวอร์เตอร์ คอมเพรสเซอร์ออยล์ฟรี และการออกแบบ CFD พร้อมกลยุทธ์จัดการคาร์บอน เพื่อรักษาความสามารถแข่งขันและสอดคล้องทิศทาง carbon neutrality [66–68] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเชื่อมโยงตลาดคอมเพรสเซอร์ และศักยภาพลด GHG โดยเทคโนโลยีหลัก

5. สรุปผลการสังเคราะห์งานวิจัยเชิงระบบ

ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในภาคอุตสาหกรรมคอมเพรสเซอร์ สามารถสะท้อนภาพรวมของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งจากการใช้พลังงานจากการผลิตในโรงงาน (Scope 2), การใช้เชื้อเพลิงและการรั่วไหลของสารทำความเย็น (Scope 1) และคาร์บอนฝังตัวจากวัตถุดิบและการขนส่ง (Scope 3) โดยข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเชิงระบบชี้ว่า Scope 2 เป็นแหล่งปล่อยสูงสุดของโรงงาน ผลลัพธ์นี้สะท้อนความสำคัญของการบริหารจัดการพลังงานและการลงทุนด้านพลังงานสะอาด การใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์และการจัดการวัตถุดิบสีเขียวที่เกี่ยวข้องกับการได้มาซึ่งวัตถุดิบสามารถลดการปล่อยก๊าซได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่การปรับปรุงกระบวนการผลิตและการรีไซเคิลช่วยลด Scope 3 และสร้างโอกาสในเชิงเศรษฐกิจหมุนเวียน

การวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างโรงงานและผู้ผลิตในระดับภูมิภาคยังชี้ให้เห็นว่าการลงทุนในเทคโนโลยีประสิทธิภาพสูงและการจัดการคาร์บอนอย่างเป็นระบบช่วยลดความเสี่ยงจาก มาตรการการค้าคาร์บอนระหว่างประเทศ (CBAM) และสนับสนุนความสามารถแข่งขันของผู้ผลิตไทยในตลาดโลก นอกจากนี้ ผลการศึกษาเชื่อมโยงอย่างชัดเจนกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะ SDG 7 การใช้พลังงานสะอาด, SDG 9 การเข้าถึงอุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐาน และมุ่งสู่ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้ชี้ชัดได้ว่าการจัดการคาร์บอนในระดับภาคอุตสาหกรรมสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาระดับโลก และสามารถใช้เป็นกรอบสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหารได้อีกด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ritchie H. (2024). Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions. How will this change in the future? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future>
- [2] MarkNtel Advisors. (2025). Thailand Portable Diesel Air Compressor Market Size. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.marknteladvisors.com/research-library/thailand-portable-diesel-air-compressor-market.html> Next Move

- Strategy Consulting. Thailand Air Compressor Market Analysis. [อินเทอร์เน็ต]. 25 ก.พ. 2025 [เข้าถึงเมื่อ 22 ส.ค. 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.nextmsc.com/report/thailand-air-compressor-market>
- [3] Next Move Strategy Consulting. (2025). Thailand Air Compressor Market Analysis. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.nextmsc.com/report/thailand-air-compressor-market>
- [4] ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย. (2565). ทำความรู้จัก CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.set.or.th/th/about/setsource/insights/article/55-cbam>
- [5] ถวัลย์จันทร์ ตันติเวชวุฒิกุล, กรรณิการ์ ธรรมพานิชวงศ์, จิรายุ จันทรสชา, จิตาภา ลู่วิโรจน์, รินรดา ศีฆรานานนท์. (2567). มาตรการ CBAM กระทบการส่งออกไทยแค่ไหน อย่างไร. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.pier.or.th/abridged/2024/13/>
- [6] National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2024). What is the greenhouse effect? [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/>
- [7] Allen MR, Shine KP, Fuglestedt JS, Millar RJ, Cain M, Frame DJ, Macey AH. (2018). A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. NPJ Climate and Atmospheric Science. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.nature.com/articles/s41612-018-0026-8>
- [8] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Bindi M, Brown S, Camilloni I, Zhou G, et al. (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H-O, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, et al., editors. Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.cambridge.org/core/books/global-warming-of-15c/impacts-of-15c-global-warming-on-natural-and-human-systems/DB3792F393E5009842EE23B9532B4654>
- [9] World Health Organization (WHO). (2023). Climate change and health. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- [10] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [11] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2025). Global Greenhouse Gas Overview. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview>
- [12] ศูนย์วิจัยและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Centre for SDG Research and Support: SDG Move). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.sdgmovement.com/intro-to-sdgs/>
- [13] Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, McKenzie JE. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n160. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n160>
- [14] Schulze R, Knödl S. (2023). Digital Twin Technology for Compressor and Turbine Efficiency Evaluation – Application to Energy and GHG savings. Singapore: Gastech Exhibition & Conference; 5–8 ก.ย. 2023. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/publication/373917175_Digital_Twin_Technology_for_Compressor_and_Turbine_Efficiency_Evaluation-Application_to_Energy_and_GHG_savings

- [15] Tătaru AC, Tătaru D, Petrilean D. (2025). Reduction of energy consumption and greenhouse gas emissions in oil injected helical screw compressors. *Revista Minelor*, 31(1), 100–106. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://doi.org/10.2478/minrv-2025-0009>
- [16] International Energy Agency (IEA). (2018). *World Energy Outlook 2018*. Paris: International Energy Agency; 13 พ.ย. 2018. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- [17] Kobos PH, Malczynski LA, Walker LTN, Borns DJ, Klise GT. (2018). Timing is everything: A technology transition framework for regulatory and market readiness levels. *Technological Forecasting and Social Change*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004016251830252X>
- [18] Ouyang T, Zhao Z, Lu J, Su Z, Li J, Huang H. (2020). Waste heat cascade utilisation of solid oxide fuel cell for marine applications. *J Clean Prod*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620341780>
- [19] United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Technical Options Report: Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps*. Nairobi: UNEP Ozone Secretariat. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://ozone.unep.org/resources>
- [20] Rewlay-ngoan C, Papong S. (2020). Environmental impact assessment of a rotary compressor in Thailand based on life cycle assessment methodology. *SN Applied Sciences*. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03278-w>
- [21] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [22] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [24] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- [25] International Energy Agency (IEA). (2020). *World Energy Outlook 2020*. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- [26] International Energy Agency (IEA). (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [27] International Energy Agency (IEA). (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- [28] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023*. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2023/Jun/WETO-2023>

- [29] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Green Hydrogen Cost and Potential. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-to-Meet-Climate-Goal>
- [30] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2023/Jun/WETO-2023>
- [31] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Green Hydrogen Cost and Potential. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Global-Hydrogen-Trade-to-Meet-Climate-Goal>
- [32] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). The Paris Agreement. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [33] European Commission. (2019). The European Green Deal. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [34] European Commission. (2019). The European Green Deal. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- [35] European Commission. (2023). Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en
- [36] International Monetary Fund (IMF). (2022). Climate Change and the Global Economy. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.imf.org/en/Topics/climate-change>
- [37] World Bank. (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/publications/state-and-trends-of-carbon-pricing-2023>
- [38] World Economic Forum (WEF). (2023). The Global Risks Report 2023. Geneva: World Economic Forum. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023>
- [39] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). Industrial Policy for the Green Transition. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oecd.org/greengrowth/industrial-policy-for-the-green-transition.htm>
- [40] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2022). Industrial Development Report 2022: The Future of Industrialization in a Post-Pandemic World. Vienna: UNIDO. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unido.org/resources-publications-flagship-industrial-development-report>
- [41] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2024). Industrial Development Report 2024: Green Industrialization. Vienna: UNIDO. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unido.org/resources-publications-flagship-industrial-development-report>
- [42] United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Emissions Gap Report 2023. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>
- [43] United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Cambridge: Cambridge University Press. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6>
- [44] International Energy Agency (IEA). (2023). Tracking Industry 2023. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/tracking-industry-2023>

- [45] International Energy Agency (IEA). (2023). Energy Efficiency 2023. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
- [46] International Energy Agency (IEA). (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: International Energy Agency. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [47] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Renewable Power Generation Costs in 2022. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>
- [48] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2021). Innovation Outlook: Renewable Methanol. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2021/Sep/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>
- [49] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Green Hydrogen: A Guide to Policy Making. Abu Dhabi: IRENA. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen-A-guide-to-policy-making>
- [50] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2023). Nationally Determined Contributions (NDCs). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs>
- [51] European Commission. (2022). REPowerEU Plan. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/repower-eu-plan_en
- [52] European Commission. (2021). Fit for 55. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fit-55_en
- [53] European Environment Agency (EEA). (2023). Greenhouse gas emission statistics – emission inventories. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-statistics-emission-inventories>
- [54] World Bank. (2023). World Development Report 2023: Migrants, Refugees, and Societies. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023>
- [55] World Bank. (2023). Global Economic Prospects, June 2023. Washington, DC: World Bank. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects>
- [56] World Economic Forum (WEF). (2023). Net-Zero Industry Tracker 2023. Geneva: World Economic Forum. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2023>
- [57] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). OECD Green Growth Indicators 2023. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oecd.org/greengrowth/green-growth-indicators-2023.htm>
- [58] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). Aligning Energy Policies with Climate Goals. Paris: OECD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oecd.org/energy/aligning-energy-policies-with-climate-goals.htm>
- [59] United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2023). World Investment Report 2023: Investing in Sustainable Energy for All. Geneva: UNCTAD. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://unctad.org/webflyer/world-investment-report-2023>
- [60] United Nations Development Programme (UNDP). (2024). Human Development Report 2023/24: Breaking the Gridlock. New York: UNDP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://hdr.undp.org/content/2023-24-human-development-report>

- [61] United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Sustainable Development Goals Report 2023. New York: UNDP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>
- [62] United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Global Methane Assessment: 2030 Baseline Report. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unep.org/resources/global-methane-assessment-2030-baseline-report>
- [63] United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). Cooling Emissions and Policy Synthesis Report 2020. Nairobi: UNEP. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.unep.org/resources/report/cooling-emissions-and-policy-synthesis-report-2020>
- [64] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Special Report on Global Warming of 1.5°C. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [65] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [66] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>

การพัฒนาพลังงานในประเทศไทยอย่างยั่งยืน

Sustainable Energy Development in Thailand

จอร์จ เคดารี^{1*} มารี เคดารี² และจงจิตร์ หิรัญลาม³Georges Khedari^{1*} Marie Khedari² Jongjit Hirunlabh

^{1*} ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมและการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

² บริษัท ชันซีร์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

*Corresponding author : georges.k@archd.kmutnb.ac.th

Received: December 14, 2025

Revise: December 20, 2025

Accepted: December 21, 2025

บทคัดย่อ

พลังงาน คือ ปัจจัยพื้นฐานสำคัญต่อความมั่นคงทางเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิต มนุษย์เริ่มใช้พลังงานธรรมชาติแล้วเปลี่ยนผ่านเป็นรูปแบบพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงฟอสซิล ปัจจุบันประเทศไทย มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง จากการใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล หม้อไอน้ำ โรงไฟฟ้าถ่านหิน/ลิกไนต์ โรงไฟฟ้าพลังน้ำ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม และเทคโนโลยีดิจิทัลในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ หน่วยงานหลัก ที่รับผิดชอบระบบไฟฟ้า ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้ร่วมกันบริหารจัดการระบบการผลิต การส่ง และการจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อส่งเสริมการใช้ไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพในทุกภาคส่วน ตั้งแต่ภาคอุตสาหกรรม บริการ การขนส่ง เกษตรกรรม จนถึงระดับครัวเรือน อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยยังคงเผชิญกับความท้าทายด้านความมั่นคงพลังงาน ความมั่นคงทางอาหาร กับความมั่นคงประเทศ การเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานหมุนเวียน/พลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และก๊าซชีวภาพ เพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รัฐบาลได้สนับสนุน พลังงานสะอาด พลังงานสีเขียว พลังงานทางเลือก พลังงานใหม่ พลังงานไฮโดรเจน ยานยนต์ไฟฟ้า การพัฒนาพลังงานชุมชน และการเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน อีกทั้งมีมาตรการจูงใจภาคเอกชน ทั้งด้านภาษี การลงทุน และอัตราค่าไฟฟ้า รัฐบาลได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานขึ้น ดังนี้ 1. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย (PDP) 2. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP) 3. แผนประสิทธิภาพ/อนุรักษ์พลังงาน (EEP) 4. แผนการจัดการก๊าซธรรมชาติ (Gas Plan) และแผนบริหารจัดการน้ำมันเชื้อเพลิง (Oil Plan) แผนทั้งหมดนี้ เพื่อเตรียมความพร้อมสู่เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน ภายในปี 2568-2573 ก้าวสู่เศรษฐกิจสีเขียวแบบชีวภาพหมุนเวียน ในการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความเป็นกลางทางคาร์บอน พลังงานไฟฟ้า พลังงานทดแทน

Abstract

Energy is a fundamental factor for economic security and quality of life. Since humans began using natural energy and gradually transforming into electricity and fossil fuels, electricity was initially used only in urban areas. Currently, Thailand has a nationwide electricity system. Power generation technology has been continuously developed, starting with diesel generators, boilers, coal/lignite power plants, hydroelectric power plants, combined cycle power plants, and the development of digital technology in smart grid systems. The main agencies responsible

for the power system, such as the Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), the Metropolitan Electricity Authority (MEA), and the Provincial Electricity Authority (PEA), have collaborated to manage the efficient production, transmission, and distribution of electricity, as well as promote electricity use in all sectors, from industry, services, transportation, agriculture, to households. However, Thailand still faces challenges in energy security, food security, and national security. The transition to renewable energy, including solar energy, wind energy, biomass energy, and biogas are to response to climate change. The government has supported clean energy, green energy, alternative energy, new energy, hydrogen energy, electric vehicles (EV), and community energy development such as waste to energy, etc. There are tax incentives, investment, and electricity rates to support the private sector. And has drawn up the following energy development plans: 1. Thailand Power Development Plan (PDP) 2. Alternative Energy Development Plan (AEDP) 3. Energy Efficiency Plan / Energy Conservation Plan (EEP) 4. Natural Gas Management Plan (Gas Plan) and Oil Management Plan (Oil Plan). All energy development plans are to prepare for the goal of carbon neutrality by 2025-2030, moving towards a bio-circular green economy for sustainable national development.

Keywords : Climate Change, Carbon Neutrality, Electricity, Renewable Energy

1. บทนำ

การใช้พลังงานของประเทศไทย มีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องตามการเติบโตของเศรษฐกิจ สังคม การเมือง และเทคโนโลยี ในอดีตพลังงานมาจากแรงงานมนุษย์และสัตว์ ต่อมามนุษย์เริ่มใช้เชื้อเพลิงประกอบอาหาร และคิดค้นหาแหล่งพลังงาน เพื่อทุนแรง จนถึงยุคก่อนมีไฟฟ้า (ก่อนพุทธศตวรรษที่ 25) นับตั้งแต่สมัยสุโขทัย อยุธยา จนถึงรัตนโกสินทร์ ตอนต้น ส่วนใหญ่เป็นการใช้พลังงานในรูปความร้อนและแสงสว่าง ใช้เชื้อเพลิงจากธรรมชาติ เช่น แกลบ ไม้ ฟืน ถ่าน สำหรับกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมครัวเรือนและงานหัตถกรรม เช่น ทำเครื่องถ้วยชามสังคโลก หรือหล่อพระพุทธรูป ทำอาวุธ และก่อสร้าง ในการประกอบอาชีพเกษตรกรรม ใช้แรงงานสัตว์ การคมนาคม ใช้เกวียนและเรือพาย ในครัวเรือน ใช้ตะเกียงน้ำมันพืชหรือไขสัตว์ แล้วค่อยๆ เปลี่ยนรูปแบบการใช้พลังงาน เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลและพลังงานไฟฟ้า ตั้งแต่ปลายทศวรรษ 2540 เป็นต้นมา แต่การใช้พลังงานเริ่มก่อปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมในระดับโลก ที่ทุกคนไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ และส่งผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ และสุขอนามัยโดยรวม ทั้งนี้เกิดจากการจัดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างไม่ถูกต้อง ทำให้ป่าไม้ ไร่ราด และเชื้อเพลิงสิ้นเปลืองไปอย่างรวดเร็ว รวมทั้งการเร่งสร้างอุตสาหกรรมต่าง ๆ และการนำเอาเทคโนโลยีมาใช้ โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยา อากาศเป็นพิษ คุณภาพของน้ำ และความเสื่อมโทรมของป่าไม้ ต้นน้ำถูกทำลาย สิ่งเหล่านี้ ไม่สามารถจะแก้ไขได้ภายในระยะเวลาอันสั้น ต้องอาศัยองค์ความรู้ ความเข้าใจ และการร่วมแรงร่วมใจจากทุกภาคส่วน ถึงแม้ว่าปัจจุบันส่วนใหญ่ ยังใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิง แต่ด้วยปัจจัยด้านราคา และจากสถานการณ์โลก: วิกฤตการณ์ขาดแคลนน้ำมัน ปัญหามลภาวะ สิ่งแวดล้อม และภาวะโลกร้อน รวมทั้งปัจจัยด้านเศรษฐกิจ สังคม และการเมือง ประเทศไทย จึงเริ่มศึกษาถึงการนำพลังงานทดแทน/หมุนเวียน พลังงานสะอาด/พลังงานสีเขียว พลังงานใหม่ และพลังงานทางเลือก มาใช้ เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิล [1]

ด้วยเป็นการน้อมรำลึกถึงพระมหากษัตริย์คุณของพระบาทสมเด็จพระบรมชนกาธิเบศร มหาภูมิพลอดุลยเดชมหาราช บรมนาถบพิตร และสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ พระบรมราชชนนีพันปีหลวง ด้วยทั้งสองพระองค์มีน้ำพระทัยอันแน่วแน่ กอปรกับพระอัจฉริยภาพในด้านต่าง ๆ ที่ได้ทรงศึกษามาอย่างลึกซึ้ง ในศาสตร์สาขาต่าง ๆ อย่างรอบด้าน เช่น การเกษตร การชลประทาน การอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม พระองค์ได้ทรงแนะนำราษฎร เรื่องเศรษฐกิจพอเพียง ตลอดจนได้พระราชทานข้อคิดต่าง ๆ ให้กับพสกนิกรได้ดำเนินตามรอยเบื้องพระยุคลบาท ในโครงการ

พระราชดำริต่าง ๆ เพื่อการใช้ทรัพยากรน้ำและป่าไม้ อย่างมีคุณค่า ก่อให้เกิดประโยชน์และลดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ [2] การพัฒนาพลังงานทดแทน เช่น พลังงานจากธรรมชาติ: พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานจากวัสดุเหลือใช้ เพื่อการพัฒนาแนวใหม่ ในการพัฒนาตนเองของท้องถิ่นและพัฒนาชุมชน อันเป็นแนวทางการพัฒนาแบบผสมผสานครบวงจร โดยมุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม เพื่อการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ น้ำ ป่าไม้ และสิ่งแวดล้อม เช่น กังหันน้ำชัยพัฒนา เชื้อเพลิงอัดแท่ง บ่อก๊าซชีวภาพ การผลิตแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) ฯลฯ อันแสดงให้เห็นถึงพระอัจฉริยภาพด้านพลังงานทดแทน [3] และทรงเป็นพระบิดาแห่งพลังงานไทย [4] ได้อย่างเด่นชัดตลอดมา ด้วยพระปรีชาญาณและพระอัจฉริยภาพเหล่านี้ ล้วนเป็นคุณูปการประโยชน์ ที่ได้ช่วยขจัดทุกข์ บำรุงสุขแก่พสกนิกร และแก้ไขปัญหาของประเทศชาติได้อย่างเป็นรูปธรรมและอเนกประการ

2. ประวัติความเป็นมาของการใช้พลังงานในประเทศไทย

2.1. ยุคเริ่มต้นของพลังงานไฟฟ้าในไทย (พ.ศ. 2427-2500)

ประวัติพลังงานไทย เริ่มในรัชสมัยพระบาทสมเด็จพระจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว เป็นการนำพลังงานในรูปแบบใหม่ มีโรงไฟฟ้าที่ใช้ปั่นเครื่องจักรไอน้ำ แต่ยังไม่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ต่อมาในรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว มีการพัฒนาตามแบบยุโรป จัดสร้างสาธารณูปโภคที่ทันสมัย เช่น รถไฟและเรือกำปั่น แต่ก็ยังใช้พลังงานประเภทฟืนและแกลบ จนกระทั่งมีการใช้ยานพาหนะ จึงจำเป็นต้องนำเข้าน้ำมันเบนซินมาใช้กับรถยนต์ และน้ำมันก๊าดใช้จุดตะเกียงให้แสงสว่างตามถนนหนทางและบ้านเรือน ต่อมา มีการผลิตและการใช้ไฟฟ้า โดยจอมพลเจ้าพระยาสุรศักดิ์มนตรี (เจิม แสงชูโต) ได้จัดซื้อสองเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric Generator) มา เพื่อผลิตไฟฟ้าและใช้ไฟฟ้างานครั้งแรกในพระบรมมหาราชวัง ในปี พ.ศ. 2427 ซึ่งถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของกิจการไฟฟ้าไทย และมีการตั้งโรงไฟฟ้าเชิงพาณิชย์แห่งแรก โดยบริษัทของเอกชน และในพ.ศ. 2437 ได้ผลิตและส่งกระแสไฟฟ้าใช้ในส่วนราชการและถนนหลวง ให้บริการประชาชนในเขตพระนคร ในปี 2441 มีการจัดตั้งบริษัทไฟฟ้าแรกของไทย: บริษัทบางกอกอิเล็คทริกไลท์ซินดิเคต (Bangkok Electric Light Syndicate) จ่ายไฟฟ้าตามท้องถนนและสถานที่ราชการ ซึ่งต่อมาได้โอนกิจการให้กับ บริษัทไฟฟ้าสยาม (Siam Electricity Co., Ltd.) ให้ดำเนินการกิจการไฟฟ้าต่อ เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ที่ข้างวัดราชบูรณะ (โรงไฟฟ้าวัดเลียบ) ในปี พ.ศ. 2455 พระบาทสมเด็จพระมงกุฎเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 6) ได้โปรดเกล้าฯ ให้สร้างโรงไฟฟ้าขึ้น ที่สามเสน เริ่มจำหน่ายไฟฟ้าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2457 โดยใช้ชื่อว่า การไฟฟ้าหลวงสามเสน ดำเนินการในรูปรัฐพาณิชย์ อยู่ภายใต้การควบคุมของกระทรวงมหาดไทย และต่อมาได้เปลี่ยนชื่อเป็น กองไฟฟ้าหลวงสามเสน ให้ประชาชนในเขตพระนครและธนบุรี มีไฟฟ้าใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมีหน่วยงานที่รับผิดชอบในการจ่ายไฟฟ้า คือ บริษัทไฟฟ้าสยาม (Siam Electricity Co., Ltd.) และส่วนกองไฟฟ้าหลวงสามเสน เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับประชาชน บริเวณตอนใต้และตอนเหนือของคลองบางลำภูและคลองบางกอกน้อย ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2497 รัฐบาลได้ออกพระราชกฤษฎีกา จัดตั้ง องค์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ให้อยู่ในสังกัดกรมโยธาเทศบาล กระทรวงมหาดไทย

2.2. ยุคการพัฒนาโรงไฟฟ้าระดับประเทศ (พ.ศ. 2500-2540)

พ.ศ. 2501 รัฐบาลได้ประกาศพระราชบัญญัติ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอากิจการไฟฟ้ากรุงเทพฯ กับกองไฟฟ้าหลวงสามเสนเข้าด้วยกัน โดยมีขอบเขตในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับผู้บริโภคในเขตกรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ ในปี พ.ศ. 2503 ได้ประกาศพระราชบัญญัติ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) แทนองค์การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ให้บริการกับประชาชนทุกจังหวัดทั่วประเทศ ยกเว้นในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่อยู่ในความรับผิดชอบของ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และในปี พ.ศ. 2511 ได้ประกาศพระราชบัญญัติ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยรวมองค์การที่ผลิตไฟฟ้า ได้แก่ การไฟฟ้ายันฮี (กฟย.) การลิกไนต์ (กลน.) และการไฟฟ้าตะวันออกเฉียงเหนือ (กฟ.อน.) ให้รวมกันเป็นหน่วยงานเดียวกัน ตั้งแต่ในปี พ.ศ. 2512 เป็นต้นมา [5-7]

3. เทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย

3.1. ยุคเริ่มต้น (พ.ศ. 2430–2500)

ในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 มีการใช้ไฟฟ้าในพระบรมมหาราชวังเป็นครั้งแรก กล่าวคือ โรงไฟฟารุ่นแรก ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไอน้ำ (Steam Engine Generator) โดยใช้ไม้และถ่านหิน เป็นเชื้อเพลิง มีกำลังผลิตขนาดเล็ก เพื่อแสงสว่างในพื้นที่จำกัด ช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 โรงไฟฟ้าที่มีอยู่ได้รับความเสียหายจากการระเบิด พลังงานที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ก็เริ่มหายากและมีราคาสูง จึงได้ศึกษาหาวิธีผลิตกระแสไฟฟ้า จากพลังงานอื่น ๆ และมีการนำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ ร่วมกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีเดิม มีโรงไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก เช่น ที่ลำปาง และในปี พ.ศ. 2500 เริ่มมีการสร้างโรงไฟฟ้าพลังน้ำ จากเขื่อนภูมิพล จังหวัดตาก

3.2. ยุคพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังความร้อน (Thermal Power Plants)

เริ่มตั้งแต่ช่วงทศวรรษ 2500 นั้น ส่วนใหญ่โรงไฟฟ้ายังใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล: ถ่านหิน และน้ำมันเตา เทคโนโลยีหลักที่ใช้ เป็นหม้อไอน้ำ (Boiler) และกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) โรงไฟฟ้าที่สำคัญในยุคนี้ ได้แก่ โรงไฟฟ้าบางปะกงและโรงไฟฟ้าพระนครใต้ และในปี พ.ศ. 2503 มีโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แต่มีประสิทธิภาพต่ำ เพื่อลดมลภาวะ ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเพิ่มประสิทธิภาพ จึงเริ่มศึกษาเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด (Clean Coal Technology) เพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

3.3. ยุคโรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydropower Plants)

เริ่มต้นในยุคเกี่ยวกับการสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ ใช้เทคโนโลยีเปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำมาหมุนกังหัน (Turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น เขื่อนภูมิพล (พ.ศ. 2507) และเขื่อนสิริกิติ์ (พ.ศ. 2510) เขื่อนภูมิพล เริ่มผลิตไฟฟ้าได้ในปี พ.ศ. 2507 จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับจังหวัดในภาคเหนือและภาคกลาง รวม 36 จังหวัด ช่วยลดปัญหาการปล่อยมลพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ แต่ต้องใช้พื้นที่กว้าง และมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยาจากการสร้างเขื่อน

3.4. ยุคโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plants)

ในช่วงทศวรรษ 2530 เชื้อเพลิงหลักเป็นก๊าซธรรมชาติ และใช้เทคโนโลยีผสมผสานระหว่างกังหันก๊าซ (Gas Turbine) กับกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) หรือระบบพลังความร้อนร่วม (Combined Cycle Power Plants) ในปี พ.ศ. 2530 เริ่มมีการใช้ก๊าซธรรมชาติผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น โรงไฟฟ้าบางปะกง โรงไฟฟ้าระยอง โรงไฟฟ้าราชบุรี และโรงไฟฟ้าพระนครใต้ เป็นต้น

3.5. ยุคโรงไฟฟ้าพลังงานทดแทน (Renewable Power Plants)

พลังงานหลายประเภท ได้นำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อลดการใช้ถ่านหินลิกไนต์และน้ำมัน เช่น พลังน้ำ และก๊าซธรรมชาติ ในปี พ.ศ. 2545 เริ่มมีการส่งเสริมพลังงานทดแทน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ มีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) โซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) โซลาร์เซลล์ลอยน้ำไฮบริด (Floating Solar) ที่เขื่อนสิรินธร มีการสร้างโรงไฟฟ้าชีวมวล (Biomass Plant) และมีโรงไฟฟ้าพลังงานลม ที่แหลมพรหมเทพ ที่ลำตะคอง ที่เขาค้อ และทุ่งกังหันลม ท่าเรือแหลมฉบัง เป็นต้น [5-7]

4. โครงสร้างพลังงานไฟฟ้า/พลังงานในประเทศไทย

4.1. การผลิตไฟฟ้า (Electricity Generation)

ประเทศไทยมีการพัฒนาแหล่งพลังงานอย่างต่อเนื่องตามความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ในทุกภาคส่วนต่าง ๆ เช่น ภาคอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม การท่องเที่ยว เป็นต้น มีการพัฒนาระบบการผลิตและระบบส่งจ่ายไฟฟ้าให้มีความทันสมัย โดยมีโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการระบบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประเทศไทย แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก: ระบบผลิตไฟฟ้า (Generation) การส่ง (Transmission) และการจำหน่าย (Distribution) มีหน่วยงานหลัก ที่ดูแล

ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล คือ การไฟฟ้านครหลวง (Metropolitan Electricity Authority; MEA) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority; PEA) เพื่อให้บริการไฟฟ้าในต่างจังหวัด นอกจากนี้ยังได้รวมหน่วยงานด้านไฟฟ้าและการขยายบริการสู่ภูมิภาค จัดตั้งเป็น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand; EGAT) ในการผลิตไฟฟ้าดำเนินการโดยภาครัฐและเอกชน กลุ่มผู้ผลิตหลัก ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) รับผิดชอบการผลิตและการส่งไฟฟ้าในระดับประเทศ คิดเป็นสัดส่วนประมาณ 35–40 % ของประเทศ ส่วนการไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีหน้าที่จัดจำหน่ายไฟฟ้าให้ประชาชนในเขตเมืองและชนบท นอกจากนี้มีผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producers; IPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก (Small Power Producers; SPP) ร่วมผลิตไฟฟ้าและจำหน่ายให้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และมีผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็กมาก (Very Small Power Producers; VSPP) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนขนาดเล็ก

4.2. ระบบส่งไฟฟ้า (Transmission System)

โรงไฟฟ้า มีระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเชื่อมโยงกันที่ทันสมัย มีประสิทธิภาพสูง มั่นคง และเชื่อถือได้ และระบบการส่งพลังงานไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าระดับแรงดันสูง (เช่น 230 kV, 500 kV) เพื่อส่งต่อในระบบส่งไฟฟ้า และมีโครงข่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Transmission Lines) ที่ครอบคลุมทั้งประเทศ โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.; EGAT) เป็นเพียงหน่วยงานเดียว ที่ส่งไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าหลัก ไปยังสถานีย่อย (Substations) หรือหน่วยงานจำหน่าย ใช้แรงดันสูงมากขณะส่ง เพื่อรักษาประสิทธิภาพและลดการสูญเสียพลังงาน โดยระบบถูกออกแบบให้มีความมั่นคง (Reliability) อีกทั้งมีระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่เชื่อมโยงทั่วประเทศ และบางส่วนมีการเชื่อมโยงกันในระดับภูมิภาค (Regional Grid Interconnection) เช่น กับประเทศลาวและประเทศมาเลเซีย

4.3. การจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะลดแรงดันลงจากแรงดันสูงเหลือ 22 kV, 11 kV และในระดับแรงต่ำ (Low Voltage) เช่น 220–240 โวลต์ ก่อนส่งถึงผู้ใช้ปลายทาง ดำเนินการโดย 2 หน่วยงานหลัก คือ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.; PEA) รับผิดชอบในส่วนพื้นที่ทั่วประเทศ ยกเว้นในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ นั้น เป็นเขตความรับผิดชอบของ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.; MEA) [5-7]

5. บทบาทของการใช้พลังงานในภาคส่วนต่าง ๆ กับเศรษฐกิจประเทศ

5.1. ผู้บริโภคพลังงาน

การใช้พลังงานแบ่งตามประเภทผู้ใช้ ดังนี้: ภาครัฐ/สาธารณะ: โรงเรียน โรงพยาบาล สถานที่ราชการ ภาคธุรกิจและบริการ ได้แก่ ห้างสรรพสินค้า โรงแรม สำนักงาน อาคารพาณิชย์ และภาคครัวเรือน ที่มีสัดส่วนผู้ใช้มากที่สุดของจำนวนบัญชีผู้ใช้ไฟฟ้า แต่ปริมาณการใช้ไฟฟ้าจะน้อยกว่าภาคอุตสาหกรรมและขนส่ง ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้ไฟฟ้ามากที่สุด เพื่อรองรับการผลิต รถไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า และการใช้เชื้อเพลิงในระบบขนส่งและอุตสาหกรรม

5.2. ภาคอุตสาหกรรม (Industrial Sector) และภาคขนส่ง (Transportations Sector)

ทั้งสองภาคส่วนนี้ ถือเป็นภาคที่ใช้พลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงฟอสซิล มากที่สุดของประเทศ ทั้งในภาคขนส่ง ในโรงงานอุตสาหกรรม ในกระบวนการผลิตทุกประเภท และระบบควบคุมอัตโนมัติ เช่น เหล็ก พลาสติก ปรีโตรเคมี อิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ รถยนต์ รถไฟฟ้าและรถยนต์ไฟฟ้า ล้วนแต่ต้องพึ่งพาเชื้อเพลิงและความมั่นคงของพลังงานไฟฟ้าที่ส่งผลโดยตรงต่อการลงทุนของภาคอุตสาหกรรม การคมนาคม และเศรษฐกิจของประเทศ

5.3. ภาคบริการและการค้า (Service and Commercial Sector)

ร้านค้า ห้างสรรพสินค้า โรงแรม โรงพยาบาล และธุรกิจบริการอื่น ๆ จำเป็นต้องใช้พลังงานและไฟฟ้า เป็นส่วนใหญ่ ทั้งในระบบปรับอากาศและแสงสว่างในอาคาร รวมทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ระบบดิจิทัลและเทคโนโลยี

สารสนเทศที่เติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น ศูนย์ข้อมูล (Data Centers) ระบบ AI และ Cloud Computing ล้วนมีต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในปริมาณสูงและคุณภาพดี

5.4. ภาคเกษตรกรรม (Agricultural Sector)

แม้จะมีสัดส่วนในภาพรวมไม่สูงนักของการใช้พลังงานและพลังงานไฟฟ้า ไฟฟ้าเริ่มเข้ามามีบทบาทสำคัญเพิ่มมากขึ้น ทั้งในระบบชลประทาน การสูบน้ำ การควบคุมอุณหภูมิในฟาร์ม และระบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) รัฐบาลจึงมีนโยบายสนับสนุนการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ในภาคเกษตร และมีการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในพื้นที่ห่างไกล เช่น ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ กังหันลม ชีวมวลและก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

5.5. ภาคครัวเรือน (Residential Sector) [9]

ภาคที่มีจำนวนผู้ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดในเชิงปริมาณ (มากกว่าหลายสิบล้านบัญชีผู้ใช้) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการขยายตัวของเมืองและวิถีชีวิตแบบดิจิทัล เพื่อใช้ไฟฟ้าให้ทั่วถึง ทั้งในระบบแสงสว่าง เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน พัดลม เครื่องปรับอากาศ และมีการส่งเสริมการใช้พลังงานชุมชนในภาคครัวเรือน

5.6. พลังงานกับดัชนีเศรษฐกิจ

ความมั่นคงพลังงาน ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจและระบบโครงสร้างประเทศ (Infra Structure) การเติบโตของการใช้พลังงาน มีความสัมพันธ์โดยตรงกับผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในประเทศ (GDP) เมื่อเศรษฐกิจเติบโต ความต้องการใช้พลังงานก็จะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นการหาแหล่งพลังงานในการผลิตไฟฟ้า จึงเป็นเรื่องสำคัญ หากเกิดการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าหรือไฟฟ้าไม่เสถียร ก็จะเป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ [8]

6. นโยบายและแผนพลังงานในระดับประเทศ

6.1. แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศ (PDP - Power Development Plan)

กระทรวงพลังงาน เป็นหน่วยงานหลักร่วมกับหลายหน่วยงาน เช่น คณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (กพข.) สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ในการกำหนดนโยบายพลังงานไฟฟ้า PDP (Power Development Plan) แผนแม่บทในการจัดการระบบไฟฟ้าของประเทศ ระยะเวลา 15–20 ปี โดยประเมินความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคต เพื่อวางแผนสร้างโรงไฟฟ้าและระบบส่ง ฉบับล่าสุด คือ PDP 2024 มุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน

6.2. แผนพลังงานหมุนเวียน (AEDP - Alternative Energy Development Plan)

ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และไฮโดรเจน เป้าหมาย คือ เพิ่มการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ให้ได้ในระดับ 30–35 % ของการผลิตรวมภายในปี 2037

6.3. แผนอนุรักษ์พลังงาน (EEP - Energy Efficiency Plan)

การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไฟฟ้า ลดความสูญเสียพลังงานในระบบการผลิต การขนส่ง การประหยัดพลังงานในทุกภาคส่วน และการใช้พลังงานอย่างรู้คุณค่า เพื่อการอนุรักษ์พลังงานและรักษาสิ่งแวดล้อม

6.4. แผนพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid)

การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลควบคุมการจ่ายไฟอย่างชาญฉลาด เพิ่มการบริหารจัดการพลังงานระยะไกล และเรียลไทม์ รองรับการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบกระจาย (Distributed Generation) และการใช้สมาร์ตกริดควบคุมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน เช่น จากพลังงานแสงอาทิตย์ (โซลาร์เซลล์) [10-11]

7. ยุคพลังงานหมุนเวียนและความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) (พ.ศ. 2540-ปัจจุบัน)

7.1. นโยบายลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ประเทศไทยได้ให้สัตยาบันต่อกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [12] (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) และตามความตกลงปารีส (Paris Agreement) และเพื่อลดการเพิ่มอุณหภูมิต่ำกว่า 1.5 องศาเซลเซียส

7.2. ยุคพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy Era)

ในปี พ.ศ. 2540 รัฐบาลเริ่มมีนโยบายที่ชัดเจนในการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดและยั่งยืนมากขึ้น เพื่อตอบสนองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบแสงสว่าง ความร้อน และไฟฟ้า โดยใช้โซลาร์เซลล์ (Solar Cell) เปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานลม โดยใช้กังหันลม (Wind Turbine) เปลี่ยนเป็นพลังงานกล และแปลงเป็นไฟฟ้า พลังงานชีวมวลและก๊าซชีวภาพ เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า การใช้ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิง พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังน้ำและคลื่น เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้า เป็นต้น

7.3. พลังงานชุมชน (Community Energy) และพลังงานไฟฟ้าจากขยะ (Waste-to-Energy)

ภายใต้แนวคิด “Energy for All-พลังงานของทุกคน” จากความร่วมมือของภาครัฐ กับภาคเอกชน และวิสาหกิจชุมชน เพื่อมุ่งเน้นให้ชุมชนสร้างพลังงาน จากวัตถุดิบและของเหลือใช้ในชุมชนนั้น ๆ มีการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการเผาขยะ เปลี่ยนพลังงานขยะเป็นพลังงานไฟฟ้า เพื่อการพัฒนาทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

7.4. พลังงานทางเลือก

มีการศึกษา เพื่อเตรียมพร้อมด้านเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์ และความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงในภาคขนส่ง อุตสาหกรรม และผลิตไฟฟ้า เพื่อพลังงานทางเลือกใหม่ [13]

8. สถานการณ์พลังงาน และบริบทของพลังงานประเทศไทย

8.1. สถานการณ์พลังงานประเทศไทย [14]

จากการเปิดเผยถึงในปี 2566 พบว่า การใช้พลังงานขั้นต้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.8 เทียบกับปีก่อน อยู่ที่ระดับ 2,007 พันบาร์เรลเทียบเท่าน้ำมันดิบต่อวัน จากสถานะเศรษฐกิจภายในประเทศที่ปรับตัวดีขึ้น โดยเพิ่มขึ้นในส่วนของการใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ดังนี้

8.1.1. การใช้น้ำมัน

เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.3 และการใช้ก๊าซธรรมชาติปรับตัวเพิ่มขึ้นมาก ถึงร้อยละ 9.1 จากฐานที่ต่ำกว่าปกติของปีที่ผ่านมา โดยเป็นการเพิ่มขึ้นจากการใช้ก๊าซธรรมชาติเหลว (LNG) ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าตามความต้องการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้ไฟฟ้าพลังน้ำ/ไฟฟ้านำเข้า ลดลงร้อยละ 6.4 เนื่องจากมีปริมาณการนำเข้าไฟฟ้าพลังน้ำจาก สปป.ลาว ลดลงจากปัญหาภาวะภัยแล้ง ซึ่งสถานการณ์พลังงานรายเชื้อเพลิงปี 2566 สรุปได้ ดังนี้ การใช้น้ำมันสำเร็จรูป เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 อยู่ที่ระดับ 138.4 ล้านลิตรต่อวัน โดยการใช้ น้ำมันดีเซล ลดลงร้อยละ 5.7 เฉลี่ยอยู่ที่ 68.9 ล้านลิตรต่อวัน การใช้น้ำมันเบนซินและแก๊สโซฮอล์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.0 เฉลี่ยอยู่ที่ 31.4 ล้านลิตรต่อวัน สำหรับการใช้ น้ำมันเครื่องบิน เพิ่มขึ้นร้อยละ 49.9 เฉลี่ยอยู่ที่ 13.7 ล้านลิตรต่อวัน ด้านน้ำมันเตา ลดลงร้อยละ 15.8 เฉลี่ยอยู่ที่ 5.4 ล้านลิตรต่อวัน

8.1.2. การใช้ LPG โพรเพน และบิวเทน

เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 อยู่ที่ระดับ 6,542 พันตัน โดยการใช้ LPG เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งมีสัดส่วนการใช้สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 43 มีการใช้เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.1 การใช้ภาคขนส่ง มีสัดส่วนร้อยละ 14 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 ภาคอุตสาหกรรม มีสัดส่วนร้อยละ 11 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ที่ร้อยละ 0.3 ในขณะที่การใช้เอง มีสัดส่วนร้อยละ 1 มีการใช้เพิ่มขึ้นร้อยละ 97.9 ในขณะที่ภาคครัวเรือน มีสัดส่วนร้อยละ 31 ลดลงร้อยละ 0.6 การใช้ก๊าซธรรมชาติ เพิ่มขึ้นร้อยละ 6.4 อยู่ที่ระดับ 4,410 ล้านลูกบาศก์ฟุตต่อวัน โดยมาจากการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 12.0 ตามความต้องการใช้ไฟฟ้าที่มากขึ้นจากการฟื้นตัวของเศรษฐกิจในประเทศ และราคาการนำเข้า LNG ระยะสั้น (Spot LNG) ที่ปรับตัวลดลง จึงมีการ

นำเข้า Spot LNG เพิ่มขึ้น เพื่อลดต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอื่น ๆ ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.4 ในขณะที่การใช้ในภาคอุตสาหกรรม ลดลงร้อยละ 3.3 และการใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ (NGV) ลดลงร้อยละ 2.5

8.1.3. การใช้ ถ่านหิน ลิกไนต์

ลดลงร้อยละ 15.0 อยู่ที่ 14,450 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (KTOE) จากการใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่ลดลงร้อยละ 13.3 และการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า IPP ลดลงร้อยละ 31.4 สำหรับการใช้ ลิกไนต์ ลดลงร้อยละ 10.6 อยู่ที่ 3,179 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ (KTOE) ทั้งนี้การใช้ลิกไนต์ ร้อยละ 99 เป็นการใช้ในภาคการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) สำหรับสัดส่วนการใช้ลิกไนต์ ที่เหลือร้อยละ 1 ถูกนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามตั้งแต่เดือนเมษายน 2566 เป็นต้นมา ยังไม่มีการใช้ลิกไนต์ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการหมดอายุประทานบัตรของเหมืองลิกไนต์ในประเทศแล้ว

8.2. บริบทของพลังงานประเทศไทย

พลังงานมีบริบทสำคัญ ที่เป็นปัจจัยในการขับเคลื่อนการเติบโตของเศรษฐกิจไทย ด้วยมีการใช้พลังงานในทุกภาคส่วนและมีบทบาทครอบคลุม ตั้งแต่ภาคการผลิต การบริการ การขนส่ง การเกษตร และภาคครัวเรือน นโยบายพลังงานและแนวทางการวางแผนจัดการพลังงานในระดับประเทศ รวมถึงการมีส่วนร่วมของภาคประชาชนในระดับครัวเรือน การเข้าถึงพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอและเชื่อถือได้ การเลือกใช้เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพควบคู่กับเชื้อเพลิงอย่างชาญฉลาด ในช่วงทศวรรษ 1980 ประเทศไทย เริ่มส่งเสริมพลังงานทดแทน (Renewable Energy) และการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation) ผ่านแผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติ การพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อความมั่นคงความยั่งยืน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ และเสริมสร้างศักยภาพการแข่งขันของประเทศในเวทีโลก

ปัจจัยสำคัญในการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดและทิศทางที่เป็นไปได้ในอนาคต ประเทศไทยมีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนพลังงานสะอาด (Clean Energy) เป็น 74 % ภายในปี พ.ศ. 2593 เพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) มุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ตามเป้าหมายระดับชาติ ภายในปี 2065–2070 [15] จากการศึกษาความเป็นไปได้ความเหมาะสมของการใช้พลังงานหมุนเวียน/พลังงานทดแทนในประเทศไทย [1] และการศึกษาใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน [16] มีการพัฒนาพลังงานสะอาด ไฮโดรเจนเป็นพลังงานใหม่ [17] การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พลังงานชุมชนมาใช้ประโยชน์ เช่น ก๊าซชีวภาพ พลังงานชีวมวล แก๊สโซฮอลล์ และไบโอดีเซล [18] การใช้พลังงานลมควบคู่พลังงานแสงอาทิตย์ ที่เป็นต้นกำเนิดของประเทศ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าบนหลังคาอาคารและที่อยู่อาศัย (Solar Rooftop) [19] การผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์ฟาร์ม (Solar Farm) [20] และการออกแบบบ้านชีวภาพ (Bioclimatic House) [21] เป็นต้น

9. ความท้าทายและแนวโน้มในอนาคตของพลังงานไทย

9.1. ความท้าทายสำคัญ

9.1.1. ความมั่นคงด้านพลังงาน (Energy Security)

เป็นปัจจัยสำคัญเพื่อลดความเสี่ยงจากการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติเหลว ที่มีราคาผันผวนตามกลไกของตลาดโลกและแหล่งพลังงาน [22, 23] ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน จากเหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่น ภัยพิบัติ หรือโรคระบาด และสงคราม เป็นต้น

9.1.2. การเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด (Energy Transition) [24]

ในการมีบทบาทต่อแผนพัฒนาโรงไฟฟ้าในอนาคต ประเทศไทยต้องเผชิญความท้าทายในการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล: ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ [25] การเพิ่มสัดส่วนพลังงานหมุนเวียน ต้องอาศัยการลงทุนสูงและระบบ

โครงสร้างพื้นฐานทันสมัย เช่น Smart Grid เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) ระบบกักเก็บพลังงาน และการพัฒนาพลังงานไฮโดรเจน เป็นพลังงานทางเลือก [26]

9.1.3. ปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบจากโรงไฟฟ้า

ผลกระทบจากโรงไฟฟ้าบางประเภท เช่น โรงไฟฟ้าชีวมวล โรงไฟฟ้าพลังงานขยะ ที่ถูกต่อต้านจากชุมชนที่อยู่ใกล้เคียง จึงมีการใช้นาเทคโนโลยีถ่านหินสะอาด [27] การศึกษารถยนต์ไฟฟ้า [28] เพื่อลดปัญหาเรื่องมลภาวะ และการคำนึงถึงปัญหามลภาวะ ฝุ่นจากการเผาไม้ ในการใช้เชื้อเพลิงธรรมชาติ [29] รวมทั้งจำเป็นต้องอาศัยกฎหมายสิ่งแวดล้อม มาควบคุมดูแล และรายงานผลกระทบสิ่งแวดล้อม (EIA) นอกจากนี้มีการวิจัยการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การอนุรักษ์พลังงาน การสร้างจิตสำนึกตระหนักรู้เรื่องพลังงาน ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศวิทยา [30] เพื่อการรักษาโลก รักษาพลังงาน และรักประเทศไทย

9.2. แนวโน้มในอนาคต

9.2.1. พลังงานหมุนเวียนเติบโตอย่างรวดเร็ว มีต้นทุนลดลงต่อเนื่อง และทดแทนโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่บางส่วน รวมถึงการส่งเสริมเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น โซลาร์ลอยน้ำ (Solar Floating) และพลังงานคลื่น (Wave Power)

9.2.2. การใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Systems) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนขนาดใหญ่ จะมีบทบาทมากขึ้น ในการแก้ปัญหาความไม่เสถียรของพลังงานหมุนเวียน รัฐบาลเริ่มมีแผนส่งเสริมการพัฒนาระบบกักเก็บไฟฟ้าในระดับครัวเรือนและระดับสาธารณะ และบริหารจัดการพลังงานอย่างเหมาะสม

9.2.3. การกระจายการผลิตไฟฟ้า (Decentralized Energy) ผู้ใช้ไฟฟ้ากลายเป็นผู้ผลิต (Prosumer) จากแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคา ทำให้ต้องมีระบบบริหารจัดการใหม่ เช่น Net Meter หรือ Peer-to-Peer Trading

9.2.4. ดิจิทัลและ AI กับระบบไฟฟ้า การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) Internet of Things (IoT) และ Big Data เพื่อบริหารจัดการพลังงาน การคาดการณ์การใช้ไฟฟ้า ปรับโหลด และตอบสนองความต้องการแบบเรียลไทม์

9.2.5. การรวมภูมิภาคและการค้าพลังงานไฟฟ้า (Regional Integration) ประเทศไทย อาจมีบทบาทเป็นศูนย์กลางพลังงานของอาเซียน (ASEAN Power Grid) ด้วยการเชื่อมต่อกับลาว มาเลเซีย พม่า และกัมพูชา

10. สรุปและข้อเสนอแนะ

ประเทศไทยให้ความสำคัญกับนโยบายพลังงาน ที่เป็นรากฐานของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม พลังงานในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้า (Electricity) เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่เป็นหัวใจสำคัญของการผลิต การบริการ การขนส่ง และภาคครัวเรือน ประเทศไทยได้มีการขยายโครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับเมืองและชนบท จำเป็นต้องอาศัยทั้งแหล่งพลังงาน (Energy Sources) บุคลากรที่มีองค์ความรู้ ความสามารถ เทคโนโลยีและนวัตกรรม ในการกำหนดเป้าหมายระยะยาว แนวโน้มในอนาคต ตามความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3-5 ต่อปี ด้วยรูปแบบพลังงานไฟฟ้า คือ พลังงานสำเร็จรูป เป็นรูปแบบพลังงานพร้อมใช้ จึงนิยมเปลี่ยนรูปแบบพลังงานต่าง ๆ เป็นพลังงานไฟฟ้า แต่จากวิกฤตการณ์ไฟฟ้าดับพร้อม ๆ กันหลายประเทศในยุโรป ในปี พ.ศ. 2568 นี้ ทำให้ชาวโลกเริ่มตระหนักถึงการใช้พลังงานในรูปแบบไฟฟ้ามากขึ้น และด้วยพลังงานเป็นเรื่องเกี่ยวข้องกับ 4 E คือ พลังงาน (Energy) สิ่งแวดล้อม (Environment) ระบบนิเวศวิทยา (Ecology) และเศรษฐศาสตร์ (Economics) รวมทั้งปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green House Effect) และปัญหาภาวะโลกร้อน (Global Warming) รวมถึงความมั่นคงพลังงาน ที่ควบคู่กับความมั่นคงด้านอาหาร คือ ความมั่นคงประเทศ จึงกล่าวได้ว่า พลังงานมีความสำคัญมาก ทั้งในระดับนโยบายประเทศและระดับโลก จึงควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ให้ทั่วถึงและรอบด้าน ทั้งนโยบายและการเมือง เพื่อกำหนดยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ และทิศทางการพัฒนาให้ถูกทิศทาง แบบบูรณาการที่เชื่อมโยงกับอารยประเทศ ก้าวสู่เศรษฐกิจสีเขียว (BCG Economy) ในการพัฒนาประเทศไทยอย่างยั่งยืน

11. บรรณานุกรม

- [1]. J. Hirunlabh, "Overview of Renewable Energies for Future Development in Thailand", *RERIC International Energy Journal*, 19(2), 1997, pp. 89-101.
- [2]. จงจิตร หิรัญลาภ, "จากฟากฟ้า สู่อารน้ำใส ได้ร่มพระบารมี ตอนที่ 2: น้ำของพ่อหลวงมาจากป่าของแม่หลวง", *สยามเศรษฐกิจ*, ปีที่ 27, ฉบับที่ 404, กุมภาพันธ์ 2559, เลขหน้า 17.
- [3]. จงจิตร หิรัญลาภ, "พระอัจฉริยภาพทางด้านพลังงานทดแทน." ใน *วารสารครบรอบ 5 ปี ชมรมศิษย์เก่าเทคโนโลยีพระจอมเกล้า 3 สถาบัน 2554*, เลขหน้า 34-38.
- [4]. จงจิตร หิรัญลาภ, "รักษโลก รักษาพลังงาน รักในหลวง รักประเทศไทย ตอน: รักในหลวง: พระบิดาแห่งพลังงานไทย." *สยามเศรษฐกิจ*, ปีที่ 23, ฉบับที่ 367, ธันวาคม 2555, เลขหน้า 9.
- [5]. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (2568, พฤษภาคม, 10). ประวัติกิจการไฟฟ้าไทย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.egat.co.th/home/history-thai-electricity/>
- [6]. การไฟฟ้าภูมิภาค. (2568, พฤษภาคม, 10). รวมประวัติความเป็นมา, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.pea.co.th/about-pea/history-detail#nav-tab-84>
- [7]. การไฟฟ้านครหลวง. (2568, พฤษภาคม, 10). การไฟฟ้าในประเทศไทย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.mea.or.th/about-mea/background/history>
- [8]. กระทรวงพลังงาน. (2568, พฤษภาคม, 9). สถิติและข้อมูลพลังงาน, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.dede.go.th/articles?id=174&menu_id=1
- [9]. สำนักงานสถิติแห่งชาติ กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม. (2568, พฤษภาคม, 9). รายงานการใช้พลังงานในครัวเรือนไทย ปี 2568, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.nso.go.th/nsoweb/storage/survey_detail/2025/20250529151158_88186.pdf
- [10]. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2568, พฤษภาคม, 9). "แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (PDP 2018-2037)", *วารสารแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย กระทรวงพลังงาน ฉบับปรับปรุงที่ 1*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.eppo.go.th/images/Information_service/public_relations/PDP2018/PDP2018Rev1.pdf
- [11]. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2568, พฤษภาคม, 9). "แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย และแผนบริหารจัดการก๊าซธรรมชาติ (PDP 2024 & Gas Plan 2024)", *วารสารนโยบายพลังงาน กระทรวงพลังงาน ฉบับที่ 133*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.eppo.go.th/images/Information_service/journalissue/ISSUE133.pdf
- [12]. United Nations Climate Change (UNFCCC Int). (2025, November, 11). The Paris Agreement, [Online], Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [13]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 11). รายงานการศึกษา การนำเชื้อเพลิงไฮโดรเจนมาเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อการพาณิชย์ สำหรับภาคขนส่ง ภาคการผลิตไฟฟ้าภาคอุตสาหกรรม และภาคการเกษตร, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3586915.PDF>
- [14]. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน. (2568, พฤษภาคม, 11). สรุปสถานการณ์การใช้พลังงานปี 2566 และแนวโน้มการใช้พลังงานปี 2567, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.eppo.go.th/index.php/en/component/k2/item/20369-news-180367>

- [15]. สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2568, พฤษภาคม, 11). แผนแม่บทรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พ.ศ. 2558–2593, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.dcce.go.th/datacenter/3353/>
- [16]. จงจิตร หิรัญลาม, *กระบวนการพลังงานรังสีอาทิตย์ในรูปความร้อน*. สำนักพิมพ์ ดวงกมล, กรุงเทพฯ, 2520.
- [17]. มาริ เคดารี, จอร์จ เคดารี, และจงจิตร หิรัญลาม, “ทิศทางการพัฒนาไฮโดรเจน : พลังงานทางเลือก สำหรับประเทศไทย”, *วารสารสร้างสรรค์วิจัยสถาบันตยกรรมและการออกแบบ*, 1(1), 2567, เลขหน้า 185-188.
- [18]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 11). รายงานการพิจารณาศึกษา เรื่อง แนวทางการแก้ไขปัญหาน้ำมันปาล์มดิบเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3584366.PDF>
- [19]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 11). รายงานการศึกษาประเมินความคุ้มค่าการใช้พลังงานผลิตไฟฟ้าบนหลังคาอาคารและที่อยู่อาศัย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3556753.PDF>
- [20]. C. Suphahitanukool, I. Hunsacharoonroj, P. Usapein, J. Khedari, J. Waewsak, and J. Hirunlabh, “An Evaluation of Economic Potential Solar Photovoltaic Farm in Thailand: Case Study of Polycrystalline Silicon and Amorphous Silicon Thin Film”, *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(4), 2018, pp. 33-41.
- [21]. J. Ratanachotinun, N. Kasayapan, J. Hirunlabh, S. Visitsak, S., and J. Khedari, “A Design and Assessment of Solar Chimney of Bioclimatic House Wall and Roof for Construction in the Housing Market of Thailand”, *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(6), 2016, pp. 694–709.
- [22]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 9). รายงานการพิจารณาศึกษา เรื่อง หลักการและเงื่อนไขการให้หน่วยงานของรัฐเป็นผู้ร่วมลงทุน (State Participation), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3584191.PDF>
- [23]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 10). รายงานการพิจารณาศึกษา เรื่อง การแก้ไขปัญหาโครงสร้างราคาพลังงาน (น้ำมันเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงชีวภาพ และก๊าซปิโตรเลียมเหลว), [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3585472.PDF>
- [24]. N. Assanee, J. Hirunlabh, and J. Khedari. “A Transitional Model Toward Self Sufficient Clean Energy in Thailand Based on an Institution Economic Energy Though Denmark’s Model”. *Proceedings of The 3rd International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture*. 14-16 March 2012. Bangkok. Thailand. pp. 2-8. 2012.
- [25]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภานิติบัญญัติแห่งชาติ. (2568, พฤษภาคม, 9). รายงานการพิจารณาศึกษา เรื่อง ทิศทางการใช้พลังงานฟอสซิลของไทยในอนาคต กรณีถ่านหิน, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3575576.PDF>
- [26]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน วุฒิสภา. (2568, พฤษภาคม, 9). รายงานการศึกษาทางด้านเทคนิคและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมและภาคขนส่งของประเทศไทย, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.senate.go.th/v2/files/commissionreport/3674500.PDF>
- [27]. จงจิตร หิรัญลาม และอำพน ชูประทุม, “ทิศทางการส่งเสริมพลังงานถ่านหินสะอาดในประเทศไทย”, *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 29(2), 2562, เลขหน้า 1-10.
- [28]. คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. (2568, พฤษภาคม, 10). รายงานการพิจารณาศึกษา เรื่อง ยานยนต์ไฟฟ้า, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://prt.parliament.go.th/items/6a52d250-ffd3-48a0-829f-22ee53e21c30>

- [29]. Khedari, M., Villot, A., Sippula, O. et al., "A comprehensive bibliometric analysis of research on health and environmental impacts of particle emissions from wood combustion in residential heating", *Environmental Science and Pollution Research*, 32(1), 2025, pp. 17897–17915.
- [30]. B. Shoram, J. Hirunlabh, N. Kasayapanand, M. Amornkitbamrung, S. Teekasap, and J. Khedari, "Critical analysis of Thailand's past energy policies towards the development of a new energy policy", *Journal of Energy Efficiency*, 11(1), 2018, pp. 713-732.

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 หรือที่มาของปัญหาที่นำไปสู่การศึกษาวัดคุณสมบัติ 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 กรณีที่เป็นตารางให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่...” และมีคำอธิบายไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูป ให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า “รูปที่...”

ภาคผนวก (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง (References): บทความทุกฉบับจะต้องมีการอ้างอิงเอกสารในบทความโดยเอกสารอ้างอิงระบบ Vancouver ดังตัวอย่างต่อไปนี้

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

[วารสาร] ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อของวารสาร. 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

2025

