

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

ISSN 3027-6519 (Print) ISSN 3027-6527 (Online)



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 15 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2568
Vol.15 No.3 September-December 2025

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

Kasem Bundit Engineering Journal (KBEJ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา ผลงานวิชาการ ตลอดจนองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ของอาจารย์ นักวิชาการอิสระ และวิศวกรทั่วไป และเป็นสื่อกลางระหว่างมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตกับสังคมภายนอกในการเผยแพร่ความรู้ต่างๆ ด้านวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เป็นฐานความรู้จะนำไปสู่การพัฒนาด้านวิศวกรรมต่อไป โดยมีกำหนดตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

วัตถุประสงค์

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตจะเน้นเป็นบทความวิจัย (Research Article) หรืออาจจะเป็นบทความวิชาการ (Academic Article) ได้ เช่น บทความปริทัศน์ (Review Article) บทความทางเทคนิค (Technical Article) บทความเชิงปฏิบัติในวิชาชีพ (Professional Practice) เป็นต้น หรือในบางครั้งจะเป็นบทความรับเชิญ (Invited Article) หรือบทความอื่นๆ (Other Article) ด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของกองบรรณาธิการ โดยทุกบทความควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นบทความวิจัยหรือบทความทางวิชาการ ในลักษณะที่จะนำไปสู่ความก้าวหน้าทางวิชาการและวิชาชีพ
- เป็นบทความที่ไม่เคยได้รับการตีพิมพ์มาก่อนทั้งภายในประเทศหรือต่างประเทศ
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีมีพลังในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- การยอมรับการตีพิมพ์หรือปฏิเสธการตีพิมพ์บทความเป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการจะไม่รับผิดชอบในเนื้อหาหรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง ความถูกต้องของเนื้อหา การใช้ภาษาและรูปแบบการเขียนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียน

การส่งบทความ

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์

ต้นฉบับบทความส่งมาที่ E-Mail: engkasemjournal@kbu.ac.th หรือ ผู้เขียนสามารถส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

หากมีปัญหาในการส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System โปรดติดต่อกองบรรณาธิการ ที่ 02-320-2777 ต่อ 1211

ลิขสิทธิ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต ห้ามนำข้อความทั้งหมดไปตีพิมพ์ซ้ำ ยกเว้นได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิตแล้ว หากบทความที่ได้รับการตีพิมพ์นั้นเป็นบทความที่จะเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นหรือมีความไม่ถูกต้องในเนื้อหาของบทความ ผู้เขียนบทความนั้นต้องเป็นผู้รับผิดชอบ

กำหนดตีพิมพ์

ปีละ 3 ฉบับ ออกเป็นราย 4 เดือน (ประจำเดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม)

จัดพิมพ์โดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

คณะที่ปรึกษา:

ดร.วัลลภ สุวรรณดี	อธิการบดี มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.สุวัฒน์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายบริหาร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.เสนีย์ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายวางแผนและพัฒนา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ดร.อริศ สุวรรณดี	รองอธิการบดีฝ่ายทรัพยากรบุคคล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ประสาร มาลากุล ณ อยุธยา	รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อิงอร ตันพันธ์	ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

บรรณาธิการ:

รศ.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------	--

รองบรรณาธิการ:

ผศ.อนุชิต เจริญ	รองคณบดีฝ่ายวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
-----------------	---

ผู้ช่วยบรรณาธิการ:

อ.อุบลรัตน์ วาริชวัฒนะ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
------------------------	---

กองบรรณาธิการ:

ศ.ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.โจเซฟ เคตารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghamati	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.จิรณัฐ เสี่ยงมศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเฉย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม	หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรรัฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.วศิน มหัตนรินทร์กุล	วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.จิรวัฒน์ ปลั่งไหม	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ชัยพล ผ่องพลีศาล	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.บัญชา บุรพัฒน์ศิริ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ปิยพัชร เพ็ชรจันทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัย
เกษมบัณฑิต

อ.สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร

คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช

บทบรรณาธิการ

ในช่วงไตรมาสสุดท้ายของปี พ.ศ. 2568 งานวิจัยทางวิศวกรรมไทยยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง ท่ามกลางกระแสการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีระดับโลก โดยเฉพาะด้านพลังงานสะอาด วิศวกรรมยานยนต์อัตโนมัติ และโครงสร้างพื้นฐานอัจฉริยะ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับการขับเคลื่อนนโยบาย “อุตสาหกรรม 5.0” และเป้าหมาย Net Zero Carbon ประเทศไทยได้เร่งส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีจากภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมให้สามารถนำองค์ความรู้ไปใช้จริง ส่งผลให้งานวิจัยทางวิศวกรรมในช่วงปลายปีนี้มีทิศทางที่มุ่งเน้นผลลัพธ์ที่จับต้องได้ และมีผลกระทบเชิงบวกในเชิงระบบ วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตฉบับนี้ ยังคงดำรงบทบาทในการสนับสนุนการเผยแพร่ผลงานวิจัยคุณภาพสูงของนักวิชาการและนักวิจัยไทย กองบรรณาธิการมุ่งมั่นในการพัฒนาให้วารสารมีความเป็นสากล มีความโปร่งใสในกระบวนการพิจารณา และรักษามาตรฐานวิชาการอย่างเข้มงวด ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวิศวกรรม และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่เสียสละเวลาในการกลั่นกรองผลงานทางวิชาการ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนนวัตกรรมวิศวกรรมของประเทศสู่เวทีสากลในอนาคต

ในโอกาสส่งท้ายปีเก่าและต้อนรับปีใหม่ พุทธศักราช 2569 กองบรรณาธิการขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนและผลักดันวารสารนี้ให้เติบโตและก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง พร้อมขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก โปรดดลบันดาลให้ทุกท่านมีสุขภาพพลานามัยแข็งแรง มีพลังใจและความสำเร็จในทุกด้าน และสร้างสรรค์ผลงานวิจัยและวิชาการ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป

รองศาสตราจารย์ วิทยุ แสงสินกสิกิจ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการ กรณีศึกษาสถานีบรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้ม
OPERATIONAL RISK ANALYSIS: CASE STUDY OF A LIQUEFIED PETROLEUM
GAS (LPG) FILLING AND TRANSPORTATION STATION

1

รัชฎาภรณ์ ภูห้อย และ สุพัฒตรา ศรีญาณลักษณ์

การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของหม้อแปลงระบบจำหน่าย
ASSESSMENT OF THE ECONOMIC ENGINEERING COSTS FOR DISTRIBUTION
TRANSFORMERS

18

ดิเรก เรืองสมุทร พงศกร คชาพงศ์กุล และ สมศักดิ์ สิริโปรภานนท์

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณลักษณะของน้ำในระบบ
ผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความเย็น

IMPACT OF TEMPERATURE ON DISSOLVED OXYGEN AND WATER
CHARACTERISTICS IN A BUBBLE GENERATION SYSTEM WITH COOLING
MECHANISM

34

กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์ คุณนธิ ตัวงผึ้ง ปรัชญาวุฒิ โกปັນ วิชาญศาสตร์ อาจโยธา และ
คณินิจ ประคำมินทร์

การจำแนกสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยแบบใช้ครั้งเดียว
CHARACTERIZATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS EMITTED FROM
SINGLE-USE HYGIENIC FACE MASKS

51

ทับทิม ขาดิสุวรรณ และ มณีรัตน์ องค์กรวรรณี

การจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ
แบบไม่มีไม้กั้น (M-FLOW) บนทางพิเศษศรีรัช

TOLL LANE CONFIGURATION FOR M-FLOW ELECTRONIC TOLL COLLECTION
SYSTEM ON THE SI-RAT EXPRESSWAY

73

นริศรา วิเศษทอง และ เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การพัฒนาจิ๊กเทมเพลตเพื่อลดระยะเวลาการติดตั้ง MIRROR และ LED

DEVELOPMENT OF A JIG TEMPLATE TO REDUCE INTALLTION TIME FOR
MIRROR AND LED INSTALLATION PROCESSES

96

ศุภลักษณ์ สุวรรณ และ รัตติกาล บำรุงนา

การวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการ กรณีศึกษาสถานีบรรจุและขนส่ง
ก๊าซหุงต้ม

**OPERATIONAL RISK ANALYSIS: CASE STUDY OF A LIQUEFIED
PETROLEUM GAS (LPG) FILLING AND TRANSPORTATION STATION**

รัชฎากรณ์ ปูห์อัย¹ และ สุพัตรา ศรีญาณลักษณะ^{2*}

¹อาจารย์, สาขาวิชาอุตสาหกรรมโลจิสติกส์และซัพพลายเชนระหว่างประเทศ คณะบริหารธุรกิจ
มหาวิทยาลัยเกริก เลขที่ 3 ซ.รามอินทรา 1 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220,
ratchadakorn.poo@krirk.ac.th

^{2*}อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2410/2 ถ.พหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900, suphattra.sr@spu.ac.th

Ratchadakorn Poohoi¹, Suphattra Sriyanalugsana^{2*}

¹Lecturer, Department of International Logistics and Supply Chain Industry,
Faculty of Business Administration, Krirk University, 3 Ram Inthra Rd, Anusawari,
Bang Khen, Bangkok 10220, Thailand, ratchadakorn.poo@krirk.ac.th

^{2*}Lecturer, Department of Industrial Engineering and Management,
School of Engineering, Sripatum University, 2410/2 Phahonyothin Rd, Sena Nikhom,
Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand, suphattra.sr@spu.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงของสถานีการบรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้มของบริษัท
กรณีศึกษา จังหวัดระยอง โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและ
ผลกระทบ โดยเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิการไหลของกระบวนการ พบว่า
จุดที่มีความเสี่ยงในการปฏิบัติงานและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ โดยเน้นไป
ที่กระบวนการหลัก คือ การบรรจุก๊าซ การขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) และการจัดเก็บถัง ประเมิน
ความรุนแรงของข้อบกพร่อง โอกาสในการเกิดความบกพร่อง และการตรวจจับข้อบกพร่อง เพื่อ
คำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงพบว่าความเสี่ยงโดยรวม
ลดลงอย่างมากจากการใช้มาตรการป้องกัน สามารถลดความเสี่ยงการรั่วไหลระหว่างบรรจุใน

กระบวนการการบรรจุก๊าซลง 75% ด้วยมาตรการตรวจสอบซีล วาล์วที่เข้มงวด ลดความเสี่ยงในด้านวาล์วบรรจุก๊าซปิดไม่สนิทลง 76% ด้วยการเปลี่ยนวาล์วที่มีคุณภาพสูง ตรวจสอบอุปกรณ์ก่อนการใช้งานทุกครั้ง ลดความเสี่ยงการบรรจุเกินพิกัดลง 78% ด้วยการตรวจสอบและสอบเทียบเซ็นเซอร์แรงดันทุก 6 เดือน สามารถลดความเสี่ยงถึงก๊าซตกหล่นหรือพลิกคว่ำจากการขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) ถึง 67% และการรั่วไหลจากวาล์วจากการขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) ถึง 76% ลดความเสี่ยงของการวางถังซ้อนกันไม่ถูกต้องลง 75% ลดการรั่วไหลของก๊าซในพื้นที่จัดเก็บลง 76% และลดความเสี่ยงของไฟไหม้ลง 67%

คำสำคัญ: การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ, ค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง, สถานีบรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้ม

ABSTRACT

This research aims to assess risks at a liquefied petroleum gas (LPG) filling and transportation station in Rayong Province using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). A process flow chart was used to identify critical failure points across three main processes: LPG filling, transportation (including warehouse storage), and gas tank storage. Risks were evaluated using Severity, Occurrence, and Detection to calculate the Risk Priority Number (RPN). Results showed a significant risk reduction after implementing preventive and corrective measures. The risk of leakage during the gas filling process was reduced by 75% with strict valve seal inspection measures. The risk of gas filling valves not closing properly was reduced by 76% by replacing high-quality valves and inspecting equipment before each use. The risk of overfilling was reduced by 78% by checking and calibrating pressure sensors every 6 months. Cylinder drop risk during transportation was reduced by 67%, and valve leakage by 76%. Improper stacking risks decreased by 75% using standard racking. Gas leakage in storage was reduced by 76%, and fire hazard risk was lowered by 66.7% with automatic suppression systems and emergency training.

KEYWORDS: Failure Mode and Effect Analysis, Risk Priority Number, Liquefied Petroleum Gas filling and transportation station

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ก๊าซหุงต้ม (LPG) เป็นพลังงานที่มีความสำคัญในภาคครัวเรือน อุตสาหกรรม และธุรกิจบริการ กระบวนการบรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้มจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและ

ความปลอดภัยในการจัดจำหน่าย อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมีความเสี่ยงที่อาจนำไปสู่อุบัติเหตุและความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้ การบริหารจัดการความเสี่ยงในสถานประกอบการและขนส่งก๊าซหุงต้มจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากผู้ประกอบการได้มองเห็นปัญหา ข้อบกพร่อง หรือความเสี่ยงต่าง ๆ ในการดำเนินการ แต่ยังไม่ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ รวมทั้งการหาแนวทางในการป้องกันหรือแก้ไขอย่างจริงจัง เทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์และประเมินความเสี่ยงในกระบวนการอุตสาหกรรม [1,2] ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงเพื่อกำหนดค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง (Risk Priority Number: RPN) ที่เกิดจากผลลัพธ์ของค่าความรุนแรงของข้อบกพร่อง (Severity) โอกาสในการเกิดความบกพร่อง (Occurrence) และการตรวจจับข้อบกพร่อง (Detection)

ปัจจุบันสถานประกอบการและขนส่งก๊าซหุงต้มกรณีศึกษา จังหวัดระยอง มีความเสี่ยงของกระบวนการการบรรจุก๊าซ รูปแบบความล้มเหลวด้านการรั่วไหลระหว่างบรรจุมีค่า RPN เท่ากับ 216 รูปแบบความล้มเหลวด้านวาล์วบรรจุก๊าซปิดไม่สนิทมีค่า RPN เท่ากับ 175 และรูปแบบความล้มเหลวด้านการบรรจุเกินพิกัดมีค่า RPN เท่ากับ 180 ถัดมาความเสี่ยงของกระบวนการขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) รูปแบบความล้มเหลวด้านถังก๊าซตกหล่นหรือพลิกคว่ำมีค่า RPN เท่ากับ 120 รูปแบบความล้มเหลวด้านการรั่วไหลจากวาล์วมีค่า RPN เท่ากับ 200 และความเสี่ยงของกระบวนการการจัดเก็บถัง รูปแบบความล้มเหลวด้านถังก๊าซวางซ้อนกันไม่ถูกต้องมีค่า RPN เท่ากับ 192 รูปแบบความล้มเหลวด้านการรั่วไหลของก๊าซในพื้นที่จัดเก็บมีค่า RPN เท่ากับ 225 และรูปแบบความล้มเหลวด้านไฟไหม้ในพื้นที่จัดเก็บมีค่า RPN เท่ากับ 120 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการที่อาจเกิดขึ้นในสถานประกอบการและขนส่งก๊าซหุงต้มกรณีศึกษา จังหวัดระยอง เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรง เนื่องจากก๊าซหุงต้มเป็นสารไวไฟอาจเกิดการระเบิดหรือเพลิงไหม้ได้ง่ายหากมีการรั่วไหล การวิเคราะห์ความเสี่ยงช่วยระบุจุดอ่อนและช่องโหว่ที่อาจนำไปสู่อุบัติเหตุ เพื่อให้สามารถกำหนดมาตรการป้องกันได้ทันเวลาที่ ด้วยการใช้เทคนิค FMEA ในการวิเคราะห์ปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญ ผลลัพธ์จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานการดำเนินงานของสถานประกอบการและขนส่งก๊าซหุงต้มได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA)

การวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) ถูกพัฒนาโดยกองทัพสหรัฐอเมริกา ในช่วงทศวรรษที่ 1940 และต่อมาได้นำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์โดย Ford Motor Company ในช่วงทศวรรษที่ 1960 ปัจจุบันมาตรฐานการดำเนินงานของ FMEA ได้กลายมาเป็นข้อกำหนดพื้นฐานของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ผู้ผลิตรถยนต์ทุกค่าย รวมถึงผู้ผลิตชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ต้องปฏิบัติตามภายใต้ระบบคุณภาพ TS-16949 [3]

FMEA เป็นเทคนิคหรือกระบวนการเชิงป้องกันอย่างเป็นระบบที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์กิจกรรมโครงสร้างในการออกแบบของผลิตภัณฑ์รวมถึงกระบวนการผลิต จะมุ่งเน้นที่การชี้ให้เห็นถึงคุณลักษณะของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น (Potential Failure Mode) อันเนื่องมาจากการออกแบบ การผลิตหรือการบริการ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลกระทบของความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Effects Analysis) และสุดท้ายเพื่อการนำไปสู่การหาวิธีป้องกันการเกิดความเสียหายที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (Problems Prevention) เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบ ดังนั้นจึงต้องดำเนินการก่อน หลังตามความรุนแรงของผลกระทบของข้อบกพร่องที่จะเกิดขึ้นด้วย [4-6]

2.2 ค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง (Risk Priority Number: RPN)

การจัดลำดับความสำคัญของความล้มเหลว เพื่อนำลำดับความสำคัญไปใช้ในการจัดลำดับความเร่งด่วนในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป พร้อมทำการเลือกปัญหาที่มีความสำคัญจากค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่องสูงที่สุด โดยสามารถระบุระดับคะแนน จากระดับคะแนนในการประเมิน คือ 1-10 [7,8] จาก 3 ปัจจัยหลัก คือ

1) ความรุนแรงของข้อบกพร่อง (Severity: S) โดยระดับคะแนนพิจารณาจากผลกระทบของความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องนั้น ๆ ซึ่งผลต่อผลิตภัณฑ์ พนักงาน เครื่องจักรและผู้ป่วย คะแนนการประเมินสามารถ แสดงได้ในตารางที่ 1 [9]

2) โอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence: O) โดยความเป็นไปได้ในการเกิดขึ้นของข้อบกพร่องมีคะแนนแสดงอันดับในเชิงสัมพัทธ์มากกว่าเชิงสัมบูรณ์ เชิงการป้องกันหรือควบคุมสาเหตุ กลไก ของลักษณะข้อบกพร่องผ่านการเปลี่ยนแปลงกระบวนการออกแบบ เป็นแนวทางเดียวเท่านั้น การลดคะแนนของโอกาสเกิดขึ้นนี้ เกณฑ์การให้คะแนนสำหรับโอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง ดังตารางที่ 2 [10]

ตารางที่ 1 เกณฑ์การประเมินความรุนแรงที่เกิดจากข้อบกพร่อง

ลำดับ (S)	ความรุนแรงของผลกระทบ	ผลกระทบ
10	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า และมีผลกระทบรุนแรงต่อผลิตภัณฑ์ พนักงาน เครื่องจักรและผู้ป่วย (มีโอกาเสียชีวิต)	อันตรายร้ายแรงโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า
9	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นโดยมีการเตือนล่วงหน้า และอาจมีผลกระทบรุนแรงต่อผลิตภัณฑ์ พนักงาน เครื่องจักรและผู้ป่วย (มีโอกาเสียชีวิต)	อันตรายร้ายแรงโดยมีการเตือนล่วงหน้า
8	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า และมีผลกระทบรุนแรงต่อผลิตภัณฑ์ พนักงาน เครื่องจักรและผู้ป่วย (ไม่ถึงขั้นเสียชีวิต)	อันตรายสูงมากโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า
7	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นโดยมีการเตือนล่วงหน้า และมีผลกระทบรุนแรงต่อผลิตภัณฑ์ พนักงาน เครื่องจักรและผู้ป่วย (ไม่ถึงขั้นเสียชีวิต)	อันตรายสูงมากโดยมีการเตือนล่วงหน้า
6	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นโดยผู้รักษาไม่สามารถรู้สึกได้แต่มีผลกระทบต่ออาการป่วยของคนไข้เล็กน้อย	ปานกลาง
5	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นมีผลกระทบเล็กน้อยต่อผู้ป่วย	ต่ำ
4	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นมีผลกระทบต่อการรักษาทำให้การรักษาใช้เวลานานขึ้น	ต่ำมาก
3	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นทำให้ผู้รักษาสังเกตเห็นขณะรักษาแต่ไม่ส่งผลต่อผู้ป่วย	เล็กน้อย
2	ความล้มเหลวที่มีโอกาสเกิดขึ้นทำให้ผู้รักษาสังเกตเห็นก่อนเริ่มการรักษาแต่ไม่ส่งผลต่อผู้ป่วย	เล็กน้อยมาก
1	ไม่มีผลกระทบที่ลูกค้าหรือผู้รักษาสังเกตเห็น	ไม่มีเลย

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินโอกาสของการเกิดข้อบกพร่อง

ลำดับ (O)	อัตราส่วนข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้น / จำนวนวันทำงานทั้งหมด	ความน่าจะเป็นในการเกิด
10	$O \leq 1: 2$	สูงมาก
9	$O \leq 1: 3$	สูงมาก
8	$O \leq 1: 8$	สูง
7	$O \leq 1: 20$	สูง
6	$O \leq 1: 80$	ปานกลาง
5	$O \leq 1: 400$	ปานกลาง
4	$O \leq 1: 2000$	ปานกลาง
3	$O \leq 1: 15000$	ต่ำ
2	$O \leq 1: 150000$	ต่ำมาก
1	$O \leq 1: 1500000$	แทบจะไม่เกิด

3) การตรวจจับข้อบกพร่อง (Detection: D) เป็นความสามารถในการตรวจจับและป้องกันไม่ให้เกิดความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องนั้น ๆ การตรวจจับที่ดีที่สุดที่สรุปไว้ในช่วงการควบคุมการเกิดขึ้นอีกครั้งเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าจะแน่นอนยังมีความเหมาะสมอยู่ เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจจับข้อบกพร่อง ดังตารางที่ 3 [11]

ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจจับข้อบกพร่อง

ลำดับ (D)	โอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาด	โอกาสในการตรวจจับ
10	การควบคุมการออกแบบไม่สามารถตรวจจับโอกาสที่จะเป็นสาเหตุหรือกลไกการเกิดความผิดพลาด (หรือไม่มีการควบคุมการออกแบบเลย)	ไม่สามารถตรวจจับได้อย่างแน่นอน
9	มีโอกาสนในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ต่ำที่สุด	มีโอกาสนในการตรวจจับได้ในระดับที่ต่ำที่สุด
8	มีโอกาสนในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ต่ำมาก	มีโอกาสนในการตรวจจับได้ในระดับต่ำมาก

ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินความเป็นไปได้ในการตรวจจับข้อบกพร่อง (ต่อ)

ลำดับ (D)	โอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาด	โอกาสในการตรวจจับ
7	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ต่ำ	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับต่ำ
6	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ค่อนข้างต่ำ	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับค่อนข้างต่ำ
5	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ปานกลาง	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับปานกลาง
4	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ค่อนข้างสูง	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับที่ค่อนข้างสูง
3	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้สูง	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับที่สูง
2	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้สูงมาก	มีโอกาสในการตรวจจับได้ในระดับที่สูงมาก
1	มีโอกาสในการตรวจจับพบเจอสเหตุหรือข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้แน่นอน	ตรวจจับได้แน่นอน

ค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง เกิดจากผลคูณความรุนแรงของข้อบกพร่อง (Severity: S) โอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence: O) และการตรวจจับข้อบกพร่อง (Detection: D) เพื่อใช้ในการจัดลำดับความสำคัญในการแก้ไขปัญหา ดังสมการที่ (1)

$$RPN = (S) \times (O) \times (D) \quad (1)$$

ค่า RPN ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 ถึง 1,000 ค่า RPN ในแต่ละสาเหตุของข้อบกพร่องควรมีการจัดลำดับคะแนนจากค่าสูงสุดมาสู่ค่าต่ำสุด บางครั้งอาจใช้แผนผังพาเรโตมาแสดงผลได้ และควรกำหนดเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขหรือปรับปรุงข้อบกพร่อง อย่างไรก็ตามถึงแม้ค่า RPN จะยังไม่เกินเกณฑ์ของค่าความเสี่ยงที่กำหนดไว้แต่หากพบค่าโอกาสในการเกิดและการตรวจจับมีค่าคะแนนสูงควรจะมีการแก้ไขปรับปรุงตามความเหมาะสมเพื่อหาทางลดโอกาสในการเกิดและเพิ่มโอกาสการตรวจจับ [12]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Niyomrath et al [1] ได้วิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบของเครื่องจักรที่มีต่อกระบวนการผลิตหินเจียร ทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพและประสิทธิผลของเครื่องจักรเพื่อการผลิตหินเจียรของบริษัท มิตรชัยไกรนั้ดิง เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ด้วยการค้นหาปัญหาและสาเหตุของการหยุดการทำงานของเครื่องบีบอัดตามปัจจัยการผลิต 5 ด้าน (4M1E) จากนั้นหาค่าความเสี่ยงของประเด็นความบกพร่องที่มาจากปัจจัยด้านเครื่องจักรโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ

Athikulrat et al [13] ได้ศึกษาเพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตเสาไฟฟ้า โดยประยุกต์รูปแบบความล้มเหลวและการวิเคราะห์ผลกระทบ เพื่อคำนวณค่าความเสี่ยงซึ่งนำสำหรับคัดเลือกรูปแบบความล้มเหลวเพื่อดำเนินการแก้ไขปรับปรุง

Lapjitra [14] ได้ศึกษาการใช้เครื่องมือ FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ในการจัดการความเสี่ยงของระบบยาแผนกผู้ป่วยใน โรงพยาบาลสนม จังหวัดสุรินทร์ โดยการศึกษาเป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Action research) โดยทีมสหสาขาวิชาชีพ รวม 10 คน ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับระบบยาผู้ป่วยในของโรงพยาบาลสนม ใช้การจัดการความเสี่ยงเชิงรุกตามขั้นตอนของ FMEA

Pedsawang [15] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในกระบวนการผลิตกรณีศึกษา บริษัทผลิตอุปกรณ์การแพทย์ โดยรวบรวมข้อมูลและศึกษากระบวนการผลิต จากนั้นทำการชี้บ่งอันตรายเพื่อประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของกระบวนการทั้งหมด 3 กระบวนการ คือ กระบวนการผลิตส่วนงานอลูมิเนียม ส่วนงานยาง และส่วนงานเจล จากการศึกษาพบว่ากระบวนการผลิตส่วนงานยางมีอัตราความเสี่ยงสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 45.12 จากกระบวนการผลิตทั้งหมด และหลังจากใช้แผนบริหารจัดการความเสี่ยงจาก 37 รายการสามารถควบคุมได้ 21 รายการ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเทคนิค FMEA มาใช้เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงระดับปฏิบัติการที่อาจเกิดขึ้นในสถานับรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้ม โดยขั้นตอนในการศึกษาประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Flow Process Chart) 2) ศึกษาค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่อง (RPN) โดยการกำหนดระดับของความรุนแรงของข้อบกพร่อง (S) พิจารณาโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (O) และพิจารณาความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่อง (D) 3) วิเคราะห์ปัญหา สาเหตุของปัญหา รูปแบบของความเสียหายหรือสาเหตุที่จะนำไปสู่ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น โดยใช้เทคนิค FMEA 4) ปรับปรุงและดำเนินการแก้ไขมาตรฐานการดำเนินงาน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การศึกษาแผนภูมิการไหลของกระบวนการ

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนและเวลาในแต่ละขั้นตอนของการบรรจุก๊าซหุงต้มในถังก๊าซขนาด 15 กิโลกรัม โดยมีการระบุถึงกิจกรรมที่ต้องทำในแต่ละขั้นตอนดังนี้ 1) ตั้งเครื่องบรรจุตามน้ำหนักที่ต้องการ 2) นำถังก๊าซหุงต้มจากคลังเก็บถังก๊าซเปล่า 3) ใส่เครื่องบรรจุถังก๊าซ 4) ปลดเซฟตี้วาล์ว 5) กดปุ่มบรรจุก๊าซ 6) รอเครื่องจักรบรรจุก๊าซ 7) นำเครื่องบรรจุออก 8) ตรวจสอบน้ำหนักถังก๊าซ 9) นำถังก๊าซที่บรรจุเรียบร้อยแล้วเก็บเข้าคลัง และ 10) เก็บถังก๊าซที่บรรจุเรียบร้อยแล้ว หลังจากการรวบรวมความเห็นจากหัวหน้างานและผู้ปฏิบัติงาน จุดที่มีความเสี่ยงในการปฏิบัติงานและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการโดยเน้นไปที่กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ คือ การบรรจุก๊าซ (ในกระบวนการขั้นตอนที่ 5 กดปุ่มบรรจุก๊าซ) การขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) (ในกระบวนการขั้นตอนที่ 9 นำถังก๊าซที่บรรจุเรียบร้อยแล้ว

แล้วเก็บเข้าคลัง) และการจัดเก็บถัง (ในกระบวนการขั้นตอนที่ 10 เก็บถังก๊าซที่บรรจุเรียบร้อยแล้ว) เนื่องจากกระบวนการหลักดังกล่าวมีความเสี่ยงที่จะเกิดการระเบิดได้และมีผลกระทบที่ร้ายแรงเมื่อเกิดอุบัติเหตุ ดังแสดงในรูปที่ 2

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ									
Flow Process Chart									
แผนภูมิหมายเลข 1 แผ่นที่ 1					สรุปผล				
(ผลิตภัณฑ์) / วัสดุ / พนักงาน ถังก๊าซขนาด 15 กิโลกรัม					Activity	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง	ลดลง	
					ปฏิบัติงาน ○	5			
กิจกรรม : การบรรจุก๊าซหุงต้ม					เคลื่อนย้าย ➡	2			
					ล่าช้า □	1			
					ตรวจสอบ □	1			
					เก็บ ▽	1			
วิธีทำงาน : ปัจจุบัน / ปรับปรุง					ระยะทาง	14			
สถานที่ : โรงงานบรรจุก๊าซหุงต้ม พนักงาน เสวก ญัญ									

รูปที่ 2 ขั้นตอนการอัดบรรจุก๊าซหุงต้ม

3.2 การใช้เทคนิค FMEA ในการวิเคราะห์

การใช้เทคนิค FMEA ในการวิเคราะห์จุดที่มีความเสี่ยงในการปฏิบัติงานและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ โดยเริ่มจากการประเมินหาค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่องในปัจจุบันกระบวนการหลัก คือ การบรรจุก๊าซ, การขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) และการจัดเก็บถัง ทำการวิเคราะห์สาเหตุด้วยหลักการ 4M (Man, Machine, Material, Method) ตามกระบวนการจากการระดมสมองและทำการจัดเรียงลำดับ เพื่อให้มั่นใจว่าการวิเคราะห์ความเสี่ยงครอบคลุมทุกมิติที่เป็นไปได้ ลดโอกาสในการมองข้ามสาเหตุสำคัญ มีความเป็นระบบในการระบุและวิเคราะห์ความเสี่ยงให้เป็นไปตามขั้นตอนที่ชัดเจน จากนั้นนำมาคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงของข้อบกพร่องจากสมการที่ (1) โดยพิจารณาจากกระบวนการหลัก คือ การบรรจุก๊าซ การขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) และการจัดเก็บถัง

จากสมการที่ (1) กำหนดกระบวนการที่ต้องทำการปรับปรุงเพื่อดำเนินการปฏิบัติการแก้ไขเพื่อลดค่า RPN ให้ลดลง จากการร่วมกันกำหนดเกณฑ์ค่า RPN โดยผู้บริหาร ผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัย และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง มีการคำนึงถึงปัจจัยนโยบายและเป้าหมายความปลอดภัยขององค์กร โดยมีเกณฑ์การพิจารณาดังนี้ กระบวนการที่มีค่า RPN สูงกว่า 200 มีความเสี่ยงสูง ต้องดำเนินการแก้ไขทันที ค่า RPN เท่ากับ 150-199 มีความเสี่ยงปานกลาง ควรปรับปรุงภายในระยะเวลาที่เหมาะสม และค่า RPN น้อยกว่า 150 มีความเสี่ยงต่ำ สามารถเฝ้าระวังได้ แต่ไม่เร่งด่วน

3.3 กำหนดมาตรการและดำเนินการปรับปรุง

กำหนดมาตรการและดำเนินการปรับปรุงตามสาเหตุของความล้มเหลวหรือข้อบกพร่องแต่ละประเภท จากการคำนวณค่า RPN เพื่อบ่งชี้และเสนอแนวทางการปฏิบัติแก้ไขปัญหอย่างเป็นระบบ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความเสี่ยงในการปฏิบัติงาน การกำหนดให้ทำการประเมินผลก่อนและหลัง จะทำการประเมินเมื่อมีการทบทวนและอัปเดตกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญหรือเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มั่นใจว่า FMEA ยังคงมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพ เช่น มีการเปลี่ยนแปลงการออกแบบ เงื่อนไขในการทำงาน วัสดุอุปกรณ์หรือกระบวนการ กฎระเบียบหรือมาตรฐานใหม่ หรือมีการระบุความเสี่ยงใหม่ๆ เป็นต้น รูปแบบความล้มเหลวที่เกิดขึ้นจะพิจารณามาตรการป้องกัน/แก้ไข ในรูปแบบการป้องกันเชิงรุก และการป้องกันเชิงโครงสร้าง/ระยะยาว ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวและผลกระทบของความล้มเหลวในสถานประกอบการและชุมชนส่งก๊าซหุงต้ม

รายการ	กระบวนการ (PROCESS)	รูปแบบความล้มเหลว (FAILURE MODE)	ผลกระทบ (EFFECT)	สาเหตุของความล้มเหลว (CAUSE OF FAILURE)	สถานะปัจจุบัน				มาตรการป้องกัน / แก้ไข	ผลการแก้ไข				เปอร์เซ็นต์ลดความเสี่ยง
					SEV	OCC	DET	RPN		SEV	OCC	DET	RPN	
1	การบรรจุก๊าซ	รั่วไหลระหว่างบรรจุ	เสี่ยงต่อการระเบิด	ซีลหัวถังเสียหาย	9	6	4	216	ตรวจสอบซีลและวาล์วก่อนบรรจุ, เปลี่ยนซีลมาตรฐานสูง	9	3	2	54	75%
		วาล์วบรรจุก๊าซปิดไม่สนิท	ก๊าซรั่วไหล, สิ้นเปลืองทรัพยากร	ความล้าของอุปกรณ์ หรือ วาล์วชำรุด	7	5	5	175	เปลี่ยนวาล์วที่มีคุณภาพสูงขึ้น, ตรวจสอบอุปกรณ์ก่อนการใช้งาน	7	3	2	42	76%
		การบรรจุเกินพิกัด	ถึงอาจระเบิด ทำให้เกิดอัคคีภัย	เซ็นเซอร์ควบคุมแรงดันผิดพลาด	10	3	6	180	ตรวจสอบและสอบเทียบเซ็นเซอร์แรงดันทุก 6 เดือน	10	2	2	40	78%

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวและผลกระทบของความล้มเหลวในสถานีบริการและขนส่งก๊าซหุงต้ม (ต่อ)

รายการ	กระบวนการ (PROCESS)	รูปแบบความล้มเหลว (FAILURE MODE)	ผลกระทบ (EFFECT)	สาเหตุของความล้มเหลว (CAUSE OF FAILURE)	สถานะปัจจุบัน				มาตรการป้องกัน / แก้ไข	ผลการแก้ไข				เปอร์เซ็นต์ลดความเสี่ยง
					SEV	OCC	DET	RPN		SEV	OCC	DET	RPN	
2	การขนส่ง (เก็บเข้าคลัง)	ถึงก๊าซตกหล่นหรือพลิกคว่ำ	ก๊าซรั่วไหล เสี่ยงต่ออุบัติเหตุ	การจัดวางถังไม่มั่นคงหรือเคลื่อนย้ายแบบไม่ปลอดภัย	10	4	3	120	ใช้อุปกรณ์ล็อกถังมาตรฐานและพนักงานเรื่องความปลอดภัย	10	2	2	40	67%
		การรั่วไหลจากวาล์ว	ก๊าซรั่วไหล, อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม	วาล์วปิดไม่สนิทหรือเกิดการสึกหรอ	8	5	5	200	ตรวจสอบความแน่นของวาล์ว เคลื่อนย้าย, เปลี่ยนวาล์วคุณภาพสูง	8	3	2	48	76%

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์รูปแบบความล้มเหลวและผลกระทบของความล้มเหลวในสถานีบรรจุและขนส่งก๊าซหุงต้ม (ต่อ)

รายการ	กระบวนการ (PROCESS)	รูปแบบความล้มเหลว (FAILURE MODE)	ผลกระทบ (EFFECT)	สาเหตุของความล้มเหลว (CAUSE OF FAILURE)	สถานะปัจจุบัน				มาตรการป้องกัน / แก้ไข	ผลการแก้ไข				เปอร์เซ็นต์ลดความเสี่ยง
					SEV	OCC	DET	RPN		SEV	OCC	DET	RPN	
3	การจัดเก็บถัง	ถังก๊าซวางซ้อนกันไม่ถูกต้อง	อุบัติเหตุ, ความเสียหายของถัง	พื้นที่จัดเก็บไม่เป็นระเบียบ หรือขาดมาตรฐานการจัดวาง	8	6	4	192	ใช้ชั้นวางมาตรฐาน, ผูกอบรมพนักงาน	8	3	2	48	75%
		การรั่วไหลของก๊าซในพื้นที่จัดเก็บ	อันตรายต่อบุคลากร และสิ่งแวดล้อม	ถังชำรุด, วาล์วรั่ว	9	5	5	225	ตรวจสอบถังก๊าซก่อนใช้งาน, จัดเก็บ, ติดตั้งระบบตรวจจับสนิท	9	3	2	54	76%
		ไฟไหม้ในพื้นที่จัดเก็บ	เสี่ยงต่อการระเบิดและความเสียหายสูง	ไม่มีมาตรการป้องกัน อัคคีภัยที่เพียงพอ	10	4	3	120	ติดตั้งระบบดับเพลิงอัตโนมัติ, ผูกซ้อมแผนฉุกเฉิน	10	2	2	40	67%

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

การใช้เทคนิค FMEA ในการวิเคราะห์จุดที่มีความเสี่ยงในการปฏิบัติงานและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการพบว่า ความเสี่ยงโดยรวมลดลงอย่างมากจากการใช้มาตรการป้องกันในกระบวนการการบรรจุก๊าซสามารถลดความเสี่ยงการรั่วไหลระหว่างบรรจุลง 75% ด้วยมาตรการตรวจสอบซีล วาล์วที่เข้มงวด เริ่มจากการตรวจสอบร่องรอยความเสียหายทางกายภาพด้วยสายตา และตรวจสอบการรั่วไหลด้วยการทดสอบด้วยฟองสบู่ ลดความเสี่ยงในด้านวาล์วบรรจุก๊าซปิดไม่สนิทลง 76% ด้วยการเปลี่ยนวาล์วที่มีคุณภาพสูง ตรวจสอบอุปกรณ์ก่อนการใช้งานทุกครั้ง ลดความเสี่ยงการบรรจุเกินพิกัดลง 78% ด้วยการตรวจสอบและสอบเทียบเซ็นเซอร์แรงดันทุก 6 เดือน ตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของบริษัท ในกระบวนการการขนส่ง (เก็บเข้าคลัง) สามารถลดความเสี่ยงถึงก๊าซตกหล่นหรือพลิกคว่ำถึง 67% และการรั่วไหลจากวาล์วลง 76% ในกระบวนการการจัดเก็บถึงสามารถลดความเสี่ยงของการวางถังซ้อนกันไม่ถูกต้องลง 75% โดยใช้ชั้นวางมาตรฐาน ลดการรั่วไหลของก๊าซในพื้นที่จัดเก็บลง 76% โดยตรวจสอบถังก๊าซก่อนจัดเก็บ ติดตั้งระบบตรวจจับก๊าซ และลดความเสี่ยงของไฟไหม้ลง 67% โดยติดตั้งติดตั้งระบบดับเพลิงอัตโนมัติ ฝึกซ้อมแผนฉุกเฉิน การตรวจสอบและบำรุงรักษาอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอช่วยลดปัญหาความล่าช้าของวาล์ว อย่างไรก็ตาม หากต้องการลดความล้มเหลวแต่ละประเภทให้ลดลง สามารถนำระบบ Predictive Maintenance มาใช้เพื่อลดปัญหาการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ การใช้ AI หรือ Machine Learning ช่วยตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของระบบบรรจุและขนส่ง

References

- [1] Niyomrath R, Muangmeesri B, Siritongthaworn S, Korbuakaew S, Kaewsaiha P, Prapanapapome P. Application of failure mode and effect analysis (FMEA) on machine maintenance for grinding stone production. Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University Journal 2024;6(3):335-53. (In Thai)
- [2] Sharma KD, Srivastava S. Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review. Journal of Advance Research in Aeronautics and Space Science 2018; 5(1&2):1-17.
- [3] Super Engineer. FMEA history. [Internet]. 2024 [cited 2025 Aug 3]. Available from: <https://www.superengineer.net/blog/fmea-history>.
- [4] Liu Y, Kong Z, Zhang Q. Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China. Ecotoxicology and Environmental Safety 2018; 164:325-30. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.08.028.

- [5] Talabgaew S. Application of failure mode and effects analysis (FMEA) for enhancing customer satisfaction. *Journal of Technical Education Development* 2008; 21(68):24-29. (In Thai)
- [6] Techajumlernsuk B. Application of failure mode and effects analysis (FMEA) to enhance the Medication system in hospitals [internet]. Samut Prakan: Faculty of Pharmaceutical Science, Huachiew Chalermprakiet University; 2019 [cited 2025 Aug 3] Available from: https://ccpe.pharmacycouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=615. (In Thai)
- [7] Hosseinpoor S, Dadashi T, Mohammadi A. Comprehensive analysis of hospital solid waste levels and HSE risks using FMEA technique: A case study in northwest Iran. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2024;9:100646. doi: 10.1016/j.cscee.2024.100646.
- [8] Ploypanichcharoen K. Failure mode and effect analysis. Bangkok: TPA Publishing; 2008. (In Thai)
- [9] ElLithya MH, Alsamanib O, Salahc H, Opiniond FB, Abdelghani LS. Challenges experienced during pharmacy automation and robotics implementation in JCI accredited hospital in the Arabian Gulf area: FMEA analysis-qualitative approach. *Saudi Pharmaceutical Journal* 2023;31:101725. doi: 10.1016/j.jsps.2023.101725.
- [10] Dadashi T, Hosseinpoor S, Mohammadi A. A comprehensive protocol for evaluating health, safety, and environmental risks of hospital solid waste through FMEA technique. *MethodsX* 2024;12:102760. doi: 10.1016/j.mex.2024.102760.
- [11] Minguito G, Banluta J. Risk management in humanitarian supply chain based on FMEA and grey relational analysis. *Socio-Economic Planning Sciences* 2023; 87:101551. doi: 10.1016/j.seps.2023.101551.
- [12] Inhun K. Prioritization of failure modes by using fuzzy analytic hierarchy process (FAHP): a case study of electronics parts/components manufacturing process [thesis]. Pathum Thani: Thammasat University; 2015. (In Thai)
- [13] Athikulrat K, Jangruxsakul S, Plychumpol J. Application of failure mode and effects analysis to reduce wastes power pole production process. *Ladkrabang Engineering Journal* 2021;38(3):63-76. (In Thai)

- [14] Lapjitra P. Use of FMEA (failure mode and effects analysis) to manage the risks of medication system in the inpatient department of Sanom hospital, Surin province. Science and Technology Northern Journal 2022; 3(4): 117-128. (In Thai)
- [15] Pedsawang P. Risk analysis of safety in the production process: a case study of medical equipment company [Thesis]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2019. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร. รัชฎาภรณ์ กู้ห้อย อาจารย์ประจำ สาขาวิชาอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ และซัพพลายเชนระหว่างประเทศ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกริก เลขที่ 3 ซ.รามอินทรา 1 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220 โทรศัพท์: 02-552-3500 ต่อ 215, 02-970-5820
Email: ratchadakorn.poo@krirk.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุปัทธรา ศรีญาณลักษณ์ ผู้ช่วยคณบดี ฝ่ายวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม 2410/2 ถนนพหลโยธิน แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 โทรศัพท์ (662) 558 6888 ต่อ 2159
E-mail: suphattra.sr@spu.ac.th

Article History:

Received: June 10, 2025

Revised: September 22, 2025

Accepted: October 1, 2025

การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของหม้อแปลงระบบจำหน่าย

ASSESSMENT OF THE ECONOMIC ENGINEERING COSTS FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS

ดิเรก เรืองสมุทร¹ พงศกร คชาพงศ์กุล² และ สมศักดิ์ สิริโปรธานนท์³*

¹นักศึกษาระดับปริญญาเอก, วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑล สาย 5 ต.ศาลายา

อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170, direk.roe@rmutr.ac.th

²อาจารย์, วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ถนนพุทธมณฑล สาย 5 ต.ศาลายา

อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170, pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

³อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160, somsaks@sau.ac.th

Direk Roengsamut¹, Pongsakorn Kachapongkun² and Somsak Siriporananon³*

¹Ph.D. Student, Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Phutthamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phutthamonthon District, Nakhon Pathom 73170, Thailand, direk.roe@rmutr.ac.th

²Lecturer, Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, Rajamangala

University of Technology Rattanakosin, 96 Phutthamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phutthamonthon District, Nakhon Pathom 73170, Thailand, pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

³Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia

University, 19/1 Phetchakasem Road, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand,

somsaks@sau.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของหม้อแปลงระบบจำหน่าย ขนาด 1,000 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V โดยใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการประเมินต้นทุนของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อให้เหมาะสมกับโหลดที่ใช้งาน และมีความถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำ โดยนำผลการทดสอบพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายโรงงาน อัตราดอกเบี้ย อัตราค่าไฟฟ้า

อายุการใช้งาน และต้นทุนสิ่งแวดล้อมของพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อทำการประเมินต้นทุนของหม้อแปลงมาเปรียบเทียบกับต้นทุนให้เหมาะสมกับโครงการ หรือกิจการอุตสาหกรรม หรือผู้ประกอบการ จะได้เลือกใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายที่คุ้มค่า และมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: ประเมินต้นทุน, หม้อแปลงไฟฟ้า, พลังงานสูญเสียหม้อแปลง

ABSTRACT

This research presents an engineering economic cost evaluation of a 1,000 kVA 3-phase 50 Hz 22 kV-400/230 V distribution transformer. A computer is used to assist in evaluating the cost of the distribution transformer to ensure it is suitable for the load usage, with accuracy, speed, and precision. The evaluation incorporates the transformer loss test results from the factory, interest rates, electricity tariffs, service life, and the environmental cost of energy losses in the transformer. These factors are used to assess and compare the transformer costs to determine the most appropriate option for a project, industrial operation, or business. This allows users to select the most cost-effective and efficient distribution transformer.

KEYWORDS: assessing the costs, transformer, transformer power loss

1. บทนำ

ในยุคสมัยที่เทคโนโลยี และอุตสาหกรรมเติบโตอย่างรวดเร็ว การใช้พลังงานไฟฟ้าได้กลายเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานของโรงงานอุตสาหกรรม การจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย หนึ่งในองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมคือ “หม้อแปลงไฟฟ้า” หม้อแปลงไฟฟ้าไม่ได้เป็นเพียงแค่อุปกรณ์ที่แปลงแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการรักษาความเสถียรของระบบไฟฟ้าในโรงงานอีกด้วย

สำหรับหม้อแปลงที่มีประสิทธิภาพสูง การสูญเสียพลังงานต่ำ ผู้ผลิตหม้อแปลงต้องใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ ซึ่งทำให้ต้นทุนการลงทุนสูงขึ้น การประเมินต้นทุนที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญจากบทความวิจัย Loss Evaluation and Total Ownership Cost of Power Transformers [1] เป็นการประเมินต้นทุนการเป็นเจ้าของ (TOC) ของหม้อแปลงไฟฟ้า จากต้นทุนการสูญเสียพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้า และคาดการณ์ราคาพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียพลังงานของหม้อแปลงไฟฟ้าในอนาคต และจากบทความ Optimized Economic Loading of Distribution Transformers Using Minimum Energy Loss Computing [2] เป็นการหาโหลดที่เหมาะสม ลดค่าการสูญเสียพลังงานให้

น้อยที่สุด โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเชิงเศรษฐกิจของหม้อแปลงไฟฟ้า กับค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นใน เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง และจากบทความ Distribution transformer cost evaluation methodology incorporating environmental cost [3] เป็นการประเมินการประเมินต้นทุนการเป็นเจ้าของ (TOC) ของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม และจากบทความ Economic Evaluation of Transformer Selection in Electrical Power Systems [4] เป็นการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้วิธีการประเมินต้นทุนรวมของการครอบครอง (TOC) สำหรับการเลือกหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ด้วยสภาพแวดล้อมที่มีการเปิดเสรีและการแข่งขันทางการตลาดชี้ให้เห็นว่าการลงทุนในหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพต่ำ อาจส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายพลังงานที่สูงขึ้นในระยะยาว และจากบทความ Life Cycle Cost Estimation and Analysis of Transformers Based on Failure Rate [5] เป็นการประเมินต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost: LCC) ของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยรวมค่าบำรุงรักษาจากภายนอก ค่าแรงงาน และค่าดำเนินการ

จากบทความที่ผ่านมา เป็นการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ โดยใช้วิธีการประเมินต้นทุนรวมของการครอบครอง (TOC) การคาดการณ์ราคาพลังงาน การลดค่าการสูญเสียพลังงานให้น้อยลง และ ค่าบำรุงรักษา ยังไม่ได้รับการนำต้นทุนทางวิศวกรรมมาคำนวณ และยังไม่มีการนำผลการทดสอบพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายโดยตรงจากโรงงานผู้ผลิตมาพิจารณา

ในบทความนี้ได้เสนอวิธีการประเมินต้นทุนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยคำนึงถึงต้นทุนทางวิศวกรรมของหม้อแปลงจำหน่ายที่รวมต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับโหลดที่ใช้งาน โดยนำผลการทดสอบพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายจากโรงงานผู้ผลิต อัตราดอกเบี้ย อัตราค่าไฟฟ้า อายุการใช้งาน ต้นทุนสิ่งแวดล้อมของพลังงานสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อนำมาเป็นต้นทุนของโครงการ หรือกิจการอุตสาหกรรม หรือผู้ประกอบการ และสามารถทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลกระทบกับราคาต้นทุนของหม้อแปลง จะได้เลือกใช้งานหม้อแปลงจำหน่ายที่คุ้มค่า และมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ต้องคำนึงถึงค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง ค่าต้นทุนหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นหลักที่จะสะท้อนถึงค่าราคาหม้อแปลงไฟฟ้า ต้นทุนสิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพของหม้อแปลง โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- 2.1 ทดสอบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลง
- 2.2 คำนวณค่าเงินต้นปัจจุบัน
- 2.3 คำนวณค่าราคาของหม้อแปลงไฟฟ้า
- 2.4 คำนวณต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม
- 2.5 คำนวณประสิทธิภาพของหม้อแปลง

2.1 ทดสอบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง

2.1.1 กำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง (Power Losses)

ค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง เป็นค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก(Core losses) และค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper losses) ดังสมการที่ (1) [6-8]

$$P_T = P_{Core} + P_{CU} \quad (1)$$

โดยที่ P_T คือ กำลังสูญเสียรวมในตัวหม้อแปลง (W), P_{Core} คือ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (W) และ P_{CU} คือ กำลังสูญเสียในขดลวดทองแดง (W)

2.1.2 กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses)

การทดสอบเปิดวงจร ดังรูปที่ 1 เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในแกนเหล็ก โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดแรงดันต่ำ (Low Voltage winding) และเปิดวงจรด้านขดลวดแรงดันสูง (High Voltage winding) ค่าสูญเสียในแกนเหล็กเกิดจากความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) และความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน (eddy-current loss) และค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแกนเหล็กจะมีค่าคงที่ในทุก ๆ สภาวะของภาวะทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2) [6, 7]

$$P_{Core} = P_H + P_E \quad (2)$$

โดยที่ P_{Core} คือ ความสูญเสียในแกนเหล็ก (W), P_H คือ ความสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (W) และ P_E คือ ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (W)

ความสูญเสียฮิสเทอรีซิส (hysteresis loss) ดังสมการที่ (3) [9]

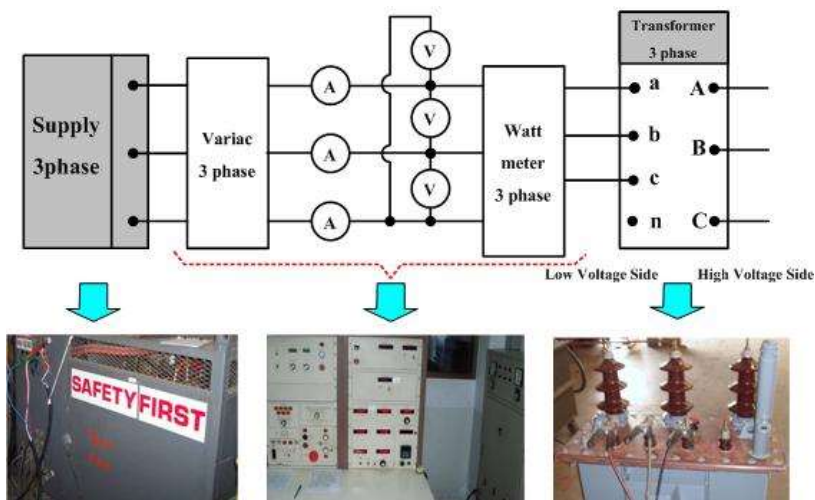
$$P_H = K_s \cdot B^{1.6} \cdot f \quad (3)$$

โดยที่ K_s คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุที่ผสมในแกนเหล็ก, B คือความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T) และ f คือ ความถี่ (Hz)

ความสูญเสียจากกระแสไหลวน (eddy-current loss) ดังสมการที่ (4) [9]

$$P_E = K_e \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

โดยที่ K_e คือ ค่าคงที่กระแสไหลวน, d คือ ความหนาของแกนเหล็กกลาไมเนต (mm), B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (T) และ f คือ ความถี่ (Hz)



รูปที่ 1 การทดสอบเปิดวงจร

2.1.3 การสูญเสียจากขดลวดทองแดง (Copper losses)

การทดสอบลัดวงจร ดังรูปที่ 2 โดยการลัดวงจรขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดด้านแรงดันสูง เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง โดยลัดวงจรทางด้านแรงต่ำ (Low Voltage side) และจ่ายแรงดันทางด้านแรงสูง (High Voltage side) ให้ได้ตามพิกัดกระแสด้านแรงสูงหาได้ดังสมการที่ (5) [9, 10]

$$P_{CU} = 3(I_{HV}^2 \cdot R_{HV} + I_{LV}^2 \cdot R_{LV}) \quad (5)$$

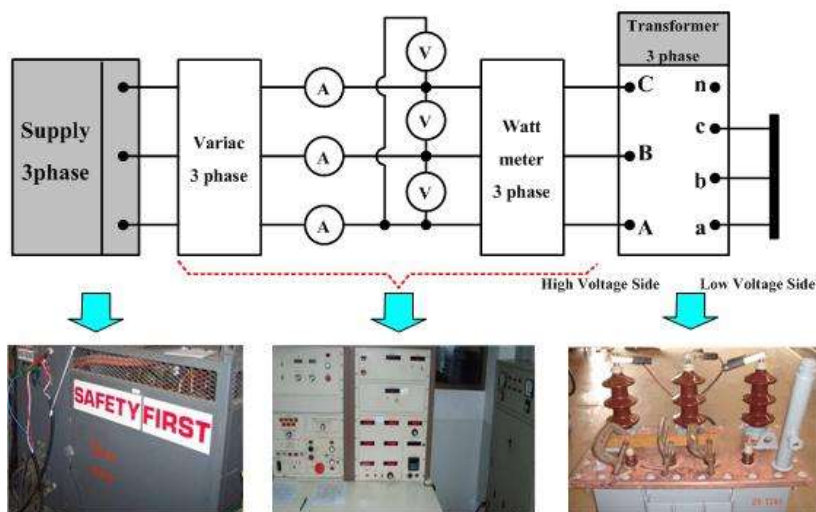
โดยที่ R_{HV} คือความต้านทานขดลวดแรงสูง, I_{HV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงสูง, R_{LV} คือ ความต้านทานขดลวดแรงต่ำ และ I_{LV} คือ กระแสทางด้านขดลวดแรงต่ำ

2.2 ค่าเงินต้นปัจจุบัน

การตัดสินใจในปัญหาวิศวกรรมบางชนิดต้องอาศัยการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ คือ การตัดสินใจเลือกโครงการหรือเครื่องจักรที่เหมาะสมที่สุดนับเป็นพื้นฐานที่ดีในการที่จะดำเนินกิจการนั้น ๆ ต่อไปอย่างราบรื่น วิธีหนึ่งในการเปรียบเทียบคือการเทียบเท่าเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายที่ประเมินไว้ในแต่ละโครงการหรือเครื่องจักร คือการคำนวณต้นทุนหรือผลตอบแทนในรูปมูลค่าปัจจุบัน ซึ่งก็คือค่าเงินต้นปัจจุบัน (Present-Worth: PW) [11] คือ ค่าตัวเลขที่ใช้ในการแปลงเงินที่ต้องจ่ายหรือจะได้รับในอนาคต (เช่น รายปี) ให้กลายเป็น มูลค่าเทียบเท่าในปัจจุบัน โดยคำนึงถึงอัตราดอกเบี้ยและระยะเวลา เพราะ มูลค่าของเงินเปลี่ยนไปตามเวลา ค่า PW ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบทางเลือกในการลงทุน และประเมินความคุ้มค่าของโครงการ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6)

$$PW = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (6)$$

กำหนดให้ PW = ค่าเงินต้นปัจจุบัน n, i = อัตราดอกเบี้ย และ n = ระยะเวลา (จำนวนงวด)



รูปที่ 2 การทดสอบลัดวงจร

2.3 ค่าราคาของหม้อแปลง

ในการที่จะพิจารณาดำเนินการของหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้หม้อแปลงจำหน่ายให้เหมาะสมกับโหลดที่ใช้งาน พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าราคาของหม้อแปลง (Cost to Own Transformer; COT) [6,12-15] ตามสมการที่ (7)

$$COT = C + PW \left[C \frac{FC}{100} + K_c L_c + K_w L_w \right] \quad (7)$$

โดยที่ C คือ ราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง

FC คือ ค่าเสื่อมราคา

I คือ อัตราดอกเบี้ย (%)

N คือ ช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลง (ปี)

PW คือ ค่าเงินต้นปัจจุบัน (Present-Worth)

L_c คือ ค่าความสูญเสียขณะไม่มีโหลด (kW)

L_w คือ ค่าความสูญเสียขณะมีโหลด (kW)

และกำหนดให้ K_c และ K_w คือค่าคงที่ในการวิเคราะห์ค่าราคาหม้อแปลง ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$K_c = C_d + T_c C_e \quad (8)$$

$$K_w = D^2 (C_d + T_w C_e) \quad (9)$$

โดยที่ T_c คือ จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายพลังงาน

T_w คือ จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายโหลดคงที่

C_e คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาทต่อหน่วย)

C_d คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาทต่อกิโลวัตต์ต่อปี)

D คือ อัตราโหลดที่จ่ายต่อโหลดพิกัด

2.4 ต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม

การผลิตไฟฟ้าจะมีปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เกิดขึ้นซึ่งจะขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่ใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าใช้พลังงานฟอสซิลจะมีปัญหาสิ่งแวดล้อมมากกว่าพลังงานหมุนเวียน ดังนั้นการใช้และการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าก็เป็นส่วนหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่มาตรฐาน

ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการใช้พลังงานไฟฟ้า (จากระบบจำหน่ายการไฟฟ้า) อยู่ที่ 0.4857 kgCO₂-e /kWh [16] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$\text{ปริมาณก๊าซเรือนกระจก} = 0.4857 \times \text{Load Losses} \times \text{จำนวนชั่วโมงต่อปีที่หม้อแปลงจ่ายโหลด} \quad (10)$$

2.5 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า

ประสิทธิภาพ (η) ของหม้อแปลงไฟฟ้าคือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ส่งออกต่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้า คำนวณได้จากสมการที่ (11)

$$\% \text{ ประสิทธิภาพ } (\eta) = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{กำลังสูญเสียในหม้อแปลง}} \times 100 \quad (11)$$

3. ขั้นตอนการทดสอบหม้อแปลงจำหน่าย

3.1 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

หรือเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่มีโหลด (no load loss) ตามมาตรฐาน IEC 60076 หรือ มอก. 384-2543 สามารถต่อวงจรตามรูปที่ 1 โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขดลวดแรงดันต่ำ (Low Voltage winding) และเปิดวงจรด้านขดลวดแรงดันสูง (High Voltage winding) จากนั้นปรับแรงดันไปที่พิกัดเท่ากับ 400V (โดยไม่สนใจค่ากระแสที่เกิดขึ้น) แล้วทำการอ่านค่าวัตต์มิเตอร์ ค่าที่ได้จะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก ซึ่งจะมีค่าคงที่ในทุก ๆ สภาวะของโหลด

3.2 การทดสอบเพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

หรืออาจเรียกว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะมีโหลด (load loss) ตามมาตรฐาน IEC 60076 หรือ มอก. 384-2543 ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลในขดลวดของหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดตามรูปที่ 2 โดยการลัดวงจรขดลวดทางด้านแรงดันต่ำ และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าขดลวดด้านแรงดันสูง จากนั้นปรับให้ได้ค่ากระแสที่ตามพิกัด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (12)

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \quad (12)$$

โดยที่ I = กระแสที่ไหลในขดลวด (A), S = กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (VA) และ V = แรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (V)

โดยขนาด 1,000 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V มีค่าพิกัดกระแสเท่ากับ 26.24 A (โดยไม่สนใจค่าแรงดันที่เกิดขึ้น) แล้วทำการอ่านค่า วัดต์มิเตอร์ ค่าที่ได้จะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดง

4. ผลการทดลองและการคำนวณ

4.1 ผลการทดลอง

ได้นำหม้อแปลงขนาด 1,000 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V มาทำการทดสอบค่ากำลังสูญเสียทางไฟฟ้าในหม้อแปลง เป็นค่ากำลังสูญเสียรวมในหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core losses) และค่าความสูญเสียในขดลวดทองแดง (Copper losses) โดยคุณสมบัติของหม้อแปลงมีค่าต่างๆดังตารางที่ 1 และทำการทดลองหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่าย โดยการป้อนกระแส (HV.Current) ที่ได้จากการคำนวณสมการที่ (12) ตั้งแต่โหลด 0% จนถึง 100% ตามตารางที่ 1 แล้วทำการวัดกำลังสูญเสียของหม้อแปลง (Load losses) ค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 2

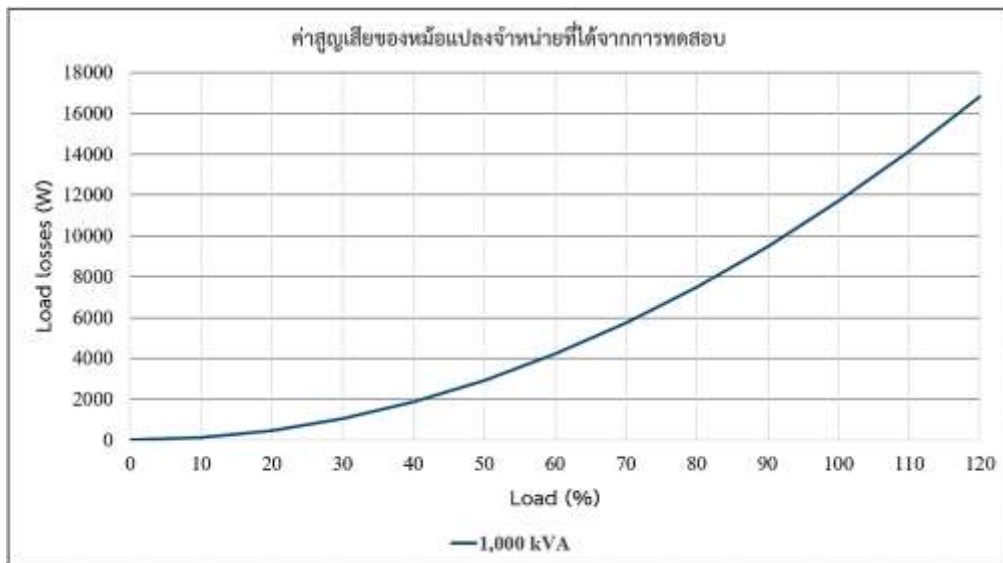
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1,000 kVA ที่ใช้ในการทดสอบ

Capacity (kVA)	1,000
High Volt (V)	22,000
Low Volt (V)	400/230
HV. Current (A)	26.24
LV. Current (A)	1,443.42
No load losses (W)	1,251.90
Load losses (W)	11,690.40
Total losses (W)	12,942.30
Short cct. Imp (%)	6.00
% Reg (%)	1.35
Efficiency (%)	98.72

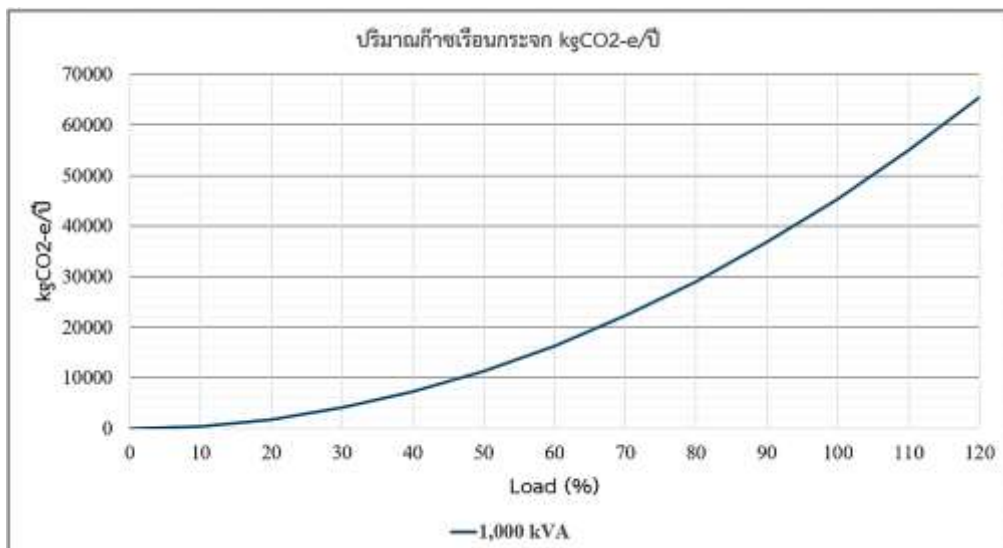
ตารางที่ 2 ค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1,000 kVA ที่ได้จากการทดสอบ

Load (%)	HV. Current (A)	Load losses (W)
0	0.00	0.00
10	2.62	116.90
20	5.25	467.60
30	7.87	1,052.10
40	10.50	1,870.40
50	13.12	2,922.50
60	15.74	4,208.40
70	18.37	5,728.10
80	20.99	7,481.60
90	23.62	9,468.90
100	26.24	11,690.00
110	28.86	14,144.90
120	31.49	16,833.60

จากตารางที่ 2 ผลที่เกิดจากการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในหม้อแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ภาระโหลดสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังสูญเสียกับเปอร์เซ็นต์ของโหลดที่ป้อนได้ดังรูปที่ 3 และเมื่อนำมาพิจารณาในส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของการใช้พลังงานไฟฟ้า (จากระบบจำหน่ายการไฟฟ้า) อยู่ที่ $0.4857 \text{ kCO}_2\text{-e /kWh}$ ต่อปี สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกับเปอร์เซ็นต์โหลดได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ค่าสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1,000 kVA ที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4 การปล่อยคาร์บอนได้ออกไซด์จากการสูญเสียของหม้อแปลงจำหน่ายขนาด 1,000 kVA

4.2 ผลการคำนวณ

จากหม้อแปลงขนาด 1,000 kVA 3 ph 50 Hz 22 kV-400/230 V มาทำการวิเคราะห์ในสถานะโหลดคงที่ ในช่วงอายุการใช้งาน 15 ปี มีอัตราดอกเบี้ย 6% และ 8% (อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารไทยต้นปี 2568 อยู่ในช่วง 6%-8% [17]) และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์มีดังนี้

- 1) $C = 421,800$ บาท
- 2) $FC = 5\%$
- 3) $I = 6\%$ และ 8%
- 4) ช่วงอายุการใช้งานของหม้อแปลง 15 ปี
- 5) $PW = 9.712$ (อัตราดอกเบี้ย 6%) และ 8.559 (อัตราดอกเบี้ย 8%)
- 6) $L_c = 1.252$ kW
- 7) $L_w = 11.690$ kW
- 8) $T_c = 8,760$ ชั่วโมง
- 9) $T_w = 8,000$ ชั่วโมง
- 10) $C_e = 4.15$ (บาท/หน่วย), (พ.ศ.2568)
- 11) $C_d = (196.26 \text{ บาท/หน่วย/เดือน อัตราปกติ}) \times 12 = 2,355.12$ บาท/หน่วย/ปี
- 12) $D = 1,000$ kVA (สมมติให้หม้อแปลงจ่ายโหลดคงที่ 8,000 ชั่วโมง)

4.2.1 การคำนวณค่า K_c และ K_w

ค่าราคาของหม้อแปลง 1,000 kVA สามารถหาได้ดังนี้

$$D_{1,000} = 1,000/1,000 = 1.0$$

จากสมการ $K_c = C_d + T_c C_e$

จะได้ $K_{c1,000} = 2,355.12 + (8,760 \times 4.15)$
 $= 38,709.12$

จากสมการ $K_w = D^2 (C_d + T_w C_e)$

จะได้ $K_{w1,000} = 1^2 [2,355.12 + (8,000 \times 4.15)]$
 $= 35,555.12$

4.2.1.1 กรณีอัตราดอกเบี้ย 6%

ค่าราคาหม้อแปลง 1,000kVA สามารถหาได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$\begin{aligned} COT &= C + PW [C (FC/100) + K_c L_c + K_w L_w] \\ &= 421,800 + 9.712 [421,800 \times (5/100) + 38,709.12 \times 1.252 + 35,555.12 \times 11.690] \\ &= 5,133,998.08 \text{ บาท} \end{aligned}$$

4.2.1.2 กรณีอัตราดอกเบี้ย 8%

ค่าราคาหม้อแปลง 1,000 kVA สามารถหาได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{COT} &= C + PW [C (FC/100) + K_c L_c + K_w L_w] \\ &= 421,800 + 8.559 [421,800 \times (5/100) + 38,709.12 \times 1.252 + 35,555.12 \times 11.690] \\ &= 4,574,568.35 \text{ บาท} \end{aligned}$$

4.3 ประสิทธิภาพของหม้อแปลง

ประสิทธิภาพจากสมการที่ (11) ขนาดหม้อแปลง 1,000 kVA เมื่อจ่ายโหลดที่พิกัด สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{ ประสิทธิภาพ } (\eta) &= \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{กำลังสูญเสียในหม้อแปลง}} \times 100 \\ &= [1,000 / (1,000 + 12.942)] \times 100 \\ &= 98.72\% \end{aligned}$$

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบราคาหม้อแปลง 1,000 kVA (COT) ที่อัตราดอกเบี้ย 6%, 8 %

COT ที่อัตราดอกเบี้ย 6% (บาท)	COT ที่อัตราดอกเบี้ย 8% (บาท)	ประสิทธิภาพหม้อแปลง (%)
5,135,451.66	4,574,568.35	98.72%

5. สรุป

จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่ทำให้ต้นทุนเปลี่ยนแปลงก็คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า ค่าราคาเริ่มต้นของหม้อแปลง และค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่มีผลต่อต้นทุนด้านสิ่งแวดล้อม และตัวแปรสำคัญที่ทำให้ต้นทุนเปลี่ยนแปลงก็คือ ค่าเงินต้นปัจจุบัน จากการคำนวณค่าเงินต้นปัจจุบันจะลดลงเมื่ออัตราดอกเบี้ยที่สูง (จากตารางที่ 3) เป็นผลให้ราคาของหม้อแปลงมีค่าลดลง

ข้อสังเกตหากมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะต้องเพิ่มขนาดของหม้อแปลงขึ้น การคงหม้อแปลงเดิมไว้และเพิ่มหม้อแปลงใหม่ ให้ได้ขนาดที่ต้องการ หรือการเปลี่ยนหม้อแปลงใหม่ ในกรณีนี้ต้องมีการคำนวณและพิจารณาจุดคุ้มทุนต่อไป แนวทางการออกแบบควรเผื่อขนาดของหม้อแปลงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ Voltage Regulation ลดลงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) โดยใช้ค่าพิกัดกระแสจากสมการที่ (12) จะทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบจำหน่ายมี

เสถียรภาพมากยิ่งขึ้น มีอายุการใช้งานยาวนานมากขึ้น และสามารถลดต้นทุนการเปลี่ยนหม้อแปลงไฟฟ้าในกรณีที่มีโหลดเพิ่มขึ้นในอนาคต

References

- [1] Charalambos CA, Milidonis A, Lazari A, Nikolaidis AI. Loss evaluation and total ownership cost of power transformers— part I: a comprehensive method. IEEE Transactions on Power Delivery 2013;28(3):1872-80.
- [2] Agha A, Attar H, Luhach AK. Optimized economic loading of distribution transformers using minimum energy loss computing. Mathematical Problems in Engineering 2021;(1): 8081212. doi: 10.1155/2021/8081212.
- [3] Georgilakis PS, Amoiralis EI. Distribution transformer cost evaluation methodology incorporating environmental cost. IET Generation, Transmission & Distribution 2010;4(7):861-72.
- [4] Amoiralis EI, Tsili Ma, Kladas AG. Economic evaluation of transformer selection in electrical power systems. Proceedings of the XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010; 2010 Sep 6-8; Rome, Italy.
- [5] Zhao X, Gui F, Chen H, Fan L, Pan P. Life cycle cost estimation and analysis of transformers based on failure rate. Applied Sciences 2024;14:1210. doi: 10.3390/app14031210.
- [6] Suechoey B. Design, installation and operation of distribution transformers. 8th ed. Bangkok: Saroj Printing; 2021. (In Thai)
- [7] Simsiri A, Suechoey B. Application labview program for testing of distribution transformer. Kasem Bundit Engineering Journal 2017;7(1):63-77. (In Thai)
- [8] Siriporananon S, Suechoey B, Pringsakul N. Performance testing of transformers used in distribution systems. Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018); 2018 May 9-11; Vientiane, Laos. p. 196-201.
- [9] Suechoey S, Siriporananon S, Pringsakul N, Thongrak A. Implementation of load cycle simulation for studies of loss energy and lifetime of oil-immersed transformers. Proceedings of the 10th International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018); 2018 May 9-11; Vientiane, Laos. p. 202-7.

- [10] Siriporananon S, Suechoey B. Power losses analysis in a three-phase distribution transformer using artificial neural networks. The ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications 2020;18(2):130-6.
- [11] White JA, Cas KE, Pratt DB. Principles of engineering economic analysis. 6th ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons; 2012.
- [12] Provincial Electricity Authority. Review of Electricity Tariff Rates According to the 2015 Tariff Criteria, Category 4 [Internet]. 2018 [cited 2025 Aug 22]. Available from: <https://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER16/DRAWER091/GENERAL/DATA000/00000207.PDF>. (In Thai)
- [13] Ngamwitroj S. What is depreciation? [Internet]. 2024 [cited 2025 Aug 22]. Available from: <https://www.mitrade.com/th/insights/learn/basics/what-is-depreciation>. (In Thai)
- [14] Sithiprom P. Analysis of transformer sizing appropriate to load demand [Thesis]. Bangkok, Thailand: Southeast Asia University; 2019 (In Thai)
- [15] Provincial Electricity Authority Thailand (PEA). Three-phase transformer for 22 kV and 33 kV distribution systems with ability to withstand short circuit. Specification No. RTRN035/2558; Bangkok Thailand: Provincial Electricity Authority Thailand; 2015. (In Thai)
- [16] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). Emission factor from electricity generation/consumption for greenhouse gas mitigation projects and activities [internet]. 2023 [cited 2025 May 15], Available from: https://tver.tgo.or.th/database/Uploads/Document/22305c19-46da-4334-89de-7db7a2856153.pdf?utm_source=chatgpt.com. (In Thai)
- [17] Kasikornbank. Interest Rate on General Lending [Internet]. 2025 [cited 2025 Aug 22]. Available from: <https://www.kasikornbank.com/th/rate/pages/lending.aspx>. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายดิเรก เริงสมุทร นักศึกษาปริญญาเอก วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ E-mail: direk.roe@rmutr.ac.th



ผศ.ดร.พงศกร คชาพงศ์กุล ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยผู้อำนวยการ
วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ E-mail: pongsakorn.Kerd@ rmutr.ac.th



ผศ.ดร.สมศักดิ์ สิริโปราณานนท์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการ
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ E-mail: somsaks@sau.ac.th

Article History:

Received: June 12, 2025

Revised: October 8, 2025

Accepted: October 9, 2025

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณลักษณะ
ของน้ำในระบบผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความเย็น

**IMPACT OF TEMPERATURE ON DISSOLVED OXYGEN AND WATER
CHARACTERISTICS IN A BUBBLE GENERATION SYSTEM WITH
COOLING MECHANISM**

กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์¹ คุณนิธิ ด้วงผึ้ง² ปรัชญาวุฒิ โทปัน³ วิษณุศาสตร์ อาจโยธา⁴
และ คณินิจ ประคำมินทร์⁵

^{1,2}อาจารย์, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถนนศรีจันทร์ อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000,
¹kittikun.pi@rmuti.ac.th, ²khunnithi.do@rmuti.ac.th

^{3,4,5}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
150 ถนนศรีจันทร์ อำเภอเมืองขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40000,

³prutchayawoot.th@rmuti.ac.th, ⁴vitsanusat.at@rmuti.ac.th, ⁵khanuengnij.pr@rmuti.ac.th

Kittikun Pituprompan¹, Khunnithi Doungpueng², Prutchayawoot Thopan³,
Vitsanusat Atyotha⁴ and Khanuengnij Prakhammin⁵

^{1,2}Lecturer, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, 150 Srichan Road, KhonKaen 40000, Thailand,
¹kittikun.pi@rmuti.ac.th, ²khunnithi.do@rmuti.ac.th

^{3,4,5}Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, 150 Srichan Road, KhonKaen 40000, Thailand,

³prutchayawoot.th@rmuti.ac.th, ⁴vitsanusat.at@rmuti.ac.th, ⁵khanuengnij.pr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณลักษณะของน้ำในระบบผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความเย็น โดยใช้อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 21 °C, 23 °C และ 25 °C และระยะเวลาการเก็บรักษา 3 ช่วงเวลา ภายในระยะ 2 สัปดาห์ ตัวแปรตามที่ได้ศึกษาได้แก่ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง ผลการวิจัยพบว่า ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีแนวโน้มลดลงอย่างมี

นัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 21 °C มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงสุด 11.6 mg/L และที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าต่ำสุด 10.5 mg/L ขณะที่ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าการนำไฟฟ้า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำสูงสุด 91.7 mg/L และค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด 184.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ความเป็นกรด-ด่างมีค่าตั้งแต่ 7.4-7.9 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่ามากกว่าระดับอุณหภูมิต่ำ การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way ANOVA แสดงให้อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง ขณะที่ปัจจัยระยะเวลาเก็บรักษามีผลต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและค่าความเป็นกรด-ด่างเพียงบางส่วน และไม่พบปฏิสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาสรุปได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของน้ำ โดยทำให้ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง ขณะที่ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและปรับปรุงระบบบำบัดน้ำ รวมถึงการจัดการคุณภาพน้ำสำหรับการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อุณหภูมิ, ระยะเวลาเก็บรักษา, ออกซิเจนละลายในน้ำ, ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the impact of temperature on dissolved oxygen and water characteristics in a bubble generation system with cooling mechanism. Experiments were conducted under three temperature conditions (21 °C, 23 °C, and 25 °C) and three storage periods over two weeks. The investigated parameters included dissolved oxygen (DO), total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), and pH. The findings indicated that DO exhibited a significant decreasing trend with increasing temperature, with the highest value recorded at 21 °C (11.6 mg/L) and the lowest at 25 °C (10.5 mg/L). In contrast, TDS and EC showed significant increasing trends as temperature rose, reaching maximum values of 91.7 mg/L and 184.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively, at 25 °C. The pH ranged between 7.4 and 7.9, reflecting a tendency toward higher pH values at elevated temperatures. Two-way ANOVA confirmed that temperature exerted significant effects on DO, TDS, EC, and pH, whereas storage duration partially influenced DO and pH. No significant interaction effect between temperature and storage duration was observed. Overall, the results highlight temperature as a critical determinant of water quality characteristics, reducing DO while increasing TDS,

EC, and pH. These insights provide useful implications for optimizing water treatment system design and enhancing water quality management in agricultural applications.

KEYWORDS: Temperature, Storage duration, Dissolved oxygen, Total dissolved solids

1. บทนำ

ชีวิตมีความเกี่ยวข้องอย่างลึกซึ้งกับน้ำ ซึ่งน้ำมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและการดำรงสุขภาพโดยรวมของพืช โดยทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายสำหรับธาตุอาหาร ตลอดจนส่งเสริมกระบวนการทางชีวเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในพืช การได้รับน้ำในปริมาณที่ไม่เพียงพอส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของพืช ลดคุณภาพของผลผลิต และอาจนำไปสู่การลดลงของมูลค่าทางเศรษฐกิจในที่สุด บทความส่วนถัดไปจะกล่าวถึงบทบาทเชิงสรีรวิทยาของน้ำในพืชอย่างละเอียด พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากภาวะขาดแคลนน้ำอย่างเป็นระบบ [1] มีการประยุกต์ใช้ฟองอากาศขนาดเล็ก ฟองอากาศมีระยะเวลาการลอยตัวอยู่ในของเหลวที่ยาวนานและมีศักย์ไฟฟ้าแฝง (Zeta Potential) สูงที่ผิวสัมผัส ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บแก๊สและการถ่ายเทมวล วิธีการสร้างฟองเหล่านี้รวมถึงการเกิดโพรงไอน้ำแบบไฮดรอลิก (Hydraulic Cavitation) และแบบอิเล็กโทรเคมี (Electrochemical Cavitation) [2]

การเติมฟองอากาศลงในน้ำเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม เช่น ระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำและการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากฟองอากาศที่มีขนาดเล็กมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงกว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซกับของเหลวสูงกว่า ซึ่งช่วยให้การละลายออกซิเจนในน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ส่งผลให้ช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำและพืช และปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบเพาะเลี้ยง สนับสนุนกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสีย ช่วยฟื้นฟูแหล่งน้ำธรรมชาติ ลดปัญหาน้ำเน่าเสีย และควบคุมการเจริญเติบโตของสาหร่าย สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เพื่อรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ รวมถึงในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการเพาะเลี้ยงเซลล์ [3]

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณลักษณะของน้ำในระบบผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความเย็น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของอุณหภูมิของน้ำที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำ ซึ่งสามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำ หรือแม้กระทั่งการปรับปรุงคุณภาพของแหล่งน้ำธรรมชาติในเชิงระบบได้ในอนาคต นอกจากนี้เครื่องจักรกลที่ถูกออกแบบยังเน้นในเรื่องความปลอดภัยในการใช้งาน (Safety Design) และความสะดวกในการเคลื่อนย้าย (Mobility Design) โดยโครงสร้าง

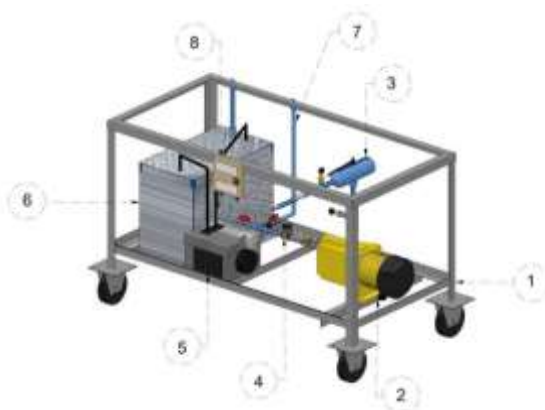
จะเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทนแรงดันสูงและทนต่อการกัดกร่อนพร้อมกับระบบควบคุมแรงดันอากาศที่มีความเสถียร เพื่อลดความเสี่ยงในการใช้งาน

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมอุปกรณ์และวัตถุดิบสำหรับการวิจัย

คณะผู้จัดทำได้ใช้ต้นแบบเครื่องผลิตฟองอากาศในน้ำด้วยการลดอุณหภูมิของน้ำที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นต้นแบบเครื่องที่เน้นในเรื่องความปลอดภัยในการทำงานเป็นอันดับแรกและมีความถูกต้องเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ได้พิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ คุณสมบัติการละลายของก๊าซออกซิเจนในน้ำ และหลักการทำงานของเครื่องผลิตออกซิเจน รวมถึงการใช้เทคนิคการลดอุณหภูมิของน้ำในการเพิ่มประสิทธิภาพการละลายออกซิเจน ส่วนประกอบของเครื่อง 8 ส่วน ดังรูปที่ 1 หมายเลขที่ 1 โครงสร้างของเครื่อง หมายเลขที่ 2 ชุดปั๊มกำเนิดฟองอากาศขนาด 1 HP หมายเลขที่ 3 กระบอกอัดแรงดันช่วยในการอัดอนุภาคน้ำด้วยแรงดันของน้ำ หมายเลขที่ 4 ท่อทางเข้าน้ำที่มีฟองอากาศ หมายเลขที่ 5 เครื่องลดอุณหภูมิ น้ำ หมายเลขที่ 6 ถังน้ำขนาด 100 ลิตร ใช้ในการเก็บน้ำที่ผ่านกระบวนการลดอุณหภูมิ หมายเลขที่ 7 ท่อสำหรับล้างปั๊ม หมายเลขที่ 8 ชุดตู้ควบคุม ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง โดยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจะตรวจจับอุณหภูมิของน้ำในระบบ เมื่ออุณหภูมิของน้ำลดลงจนถึงค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งให้โซลินอยด์วาล์วเปิดเพื่อให้น้ำไหลผ่านเข้าไปในเครื่องผลิตฟองอากาศ

การเตรียมอุปกรณ์และวัตถุดิบสำหรับการทดลอง ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องและความปลอดภัยของการทดลอง ในที่นี้ได้เตรียมเครื่องมือวัดคุณภาพของน้ำประกอบด้วย Multiparameter Meter รุ่น HANNA รุ่น HI 9829 ดังรูปที่ 2 (ก) EUTECH CyberScan CON 11 Conductivity/TDS/°C Meter ดังรูปที่ 2 (ข) และ Testo 835-T2 Infrared Thermometer ดังรูปที่ 2 (ค)



รูปที่ 1 เครื่องผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความร้อน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2 เครื่องมือวัดคุณภาพของน้ำ

2.2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สถิติที่ใช้ในการเปรียบเทียบอุณหภูมิและระยะเวลาต่อคุณสมบัติของน้ำ ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) โดยมีตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิในการผลิตฟองอากาศ จำนวนระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำ 3 ช่วงเวลา และมีตัวแปรตามคือ คุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen: DO), ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (Total Dissolved Solids: TDS), ค่าน้ำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC), และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตัวแปรควบคุมในการทดลองได้แก่ ถึงภาชนะในการเก็บรักษาน้ำแบบปิด และห้องที่อุณหภูมิปกติ

2.3 ขอบเขตของการวิจัยและข้อจำกัด

การวิจัยนี้ใช้เครื่องกำเนิดฟองอากาศที่สร้างโดยเฉพาะ ทดลองในถังน้ำประปาปิดขนาด 100 ลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 20-26 °C เพื่อศึกษาคุณสมบัติ น้ำ ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าน้ำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง ช่วงระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำหลังจากการผลิตฟองอากาศ คือ 2 สัปดาห์ พิจารณาอุณหภูมิ (Temperature: Temp) 3 ช่วงคือ 21, 23 และ 25 °C โดยวิเคราะห์ด้วยแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design: RCBD) โดยกำหนดให้บล็อกคือระยะเวลา (Week) และการทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วย Tukey (Tukey's Honestly Significant Difference หรือ Tukey's HSD) ผลลัพธ์สามารถอ้างอิงได้เฉพาะช่วงอุณหภูมิที่กำหนดและน้ำประปาเท่านั้น ไม่ครอบคลุมแหล่งน้ำธรรมชาติหรือสภาวะแวดล้อมอื่น อีกทั้งการติดตามผลเป็นระยะสั้น ไม่สะท้อนผลระยะยาว ดังนั้นการสรุปผลถูกจำกัดอยู่ในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการทดลองเท่านั้น โดยใช้โปรแกรม JAMOV เวอร์ชัน 2.6 (<https://www.jamovi.org>) ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้

2.4 สมมติฐานงานวิจัย

อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำต่อค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าน้ำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง แตกต่างกัน

3. ผลการวิจัย

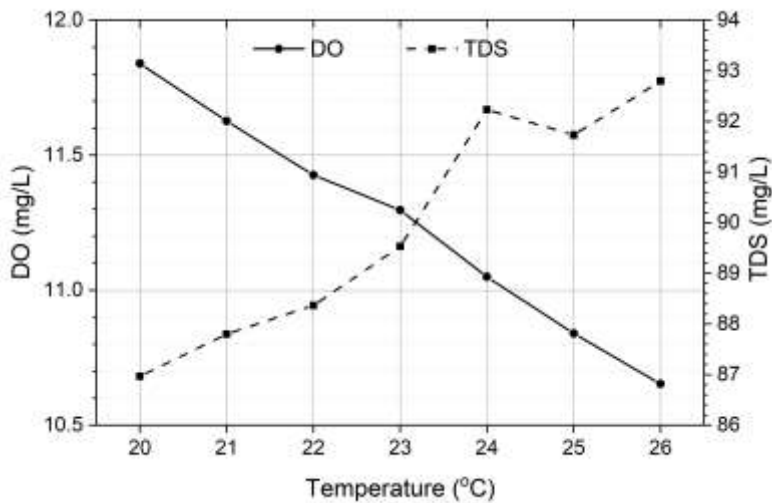
3.1 ผลการเปรียบเทียบในการทดลอง

ในการทดลองคณะวิจัยได้เลือกใช้น้ำประปาในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เขตขอนแก่น โดยทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ผ่านกระบวนการกรองและเลือกน้ำที่เหมาะสมในการทดลอง ได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 1 น้ำกรองมีคุณภาพทางเคมีที่เหมาะสมมากกว่า การใช้ งานในระบบที่ต้องการน้ำสะอาด เนื่องจากมีค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าการนำไฟฟ้า ต่ำกว่าน้ำที่ไม่ผ่านกระบวนการกรอง [4]

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของน้ำที่ใช้ในการทดลอง

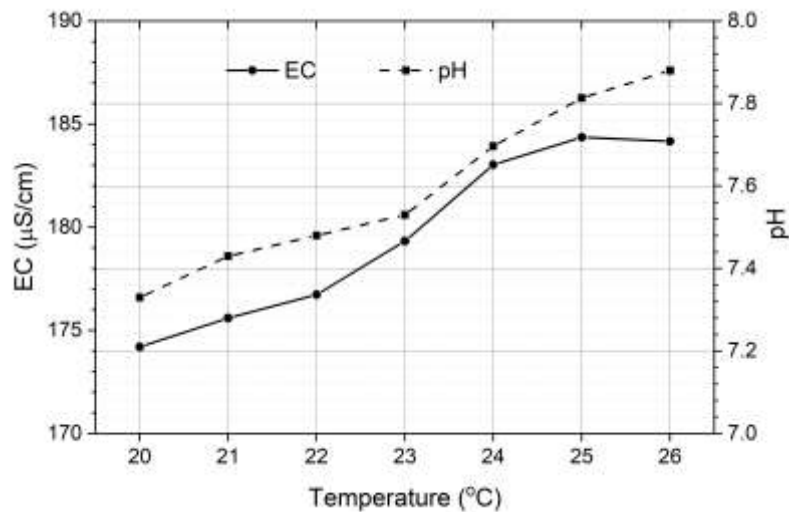
ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	น้ำประปา	น้ำประปาผ่านกระบวนการกรอง
ออกซิเจนละลายในน้ำ (DO)	ml/L	6.27	8.22
ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (TDS)	ml/L	96.97	85.88
การนำไฟฟ้า (EC)	$\mu\text{S/cm}$	194.82	171.48
ความเป็นกรด - ด่าง (pH)		7.69	7.87

ในการลดอุณหภูมิของน้ำใช้ถึงพักน้ำขนาด 100 ลิตร สำหรับการหมักเหียนน้ำในกระบวนการทำน้ำเย็นของเครื่องลดอุณหภูมิ ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 10 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำลดลงถึงอุณหภูมิที่กำหนด 7 ระดับ จาก 20 ถึง 26 °C โดยลดลงทีละ 1 °C จากนั้นทำการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของน้ำ และประเมินคุณสมบัติของน้ำเมื่อระยะเวลาผ่านไป 3 ช่วงเวลา ซึ่งข้อมูลที่ต้องเก็บมีดังนี้ วัดค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าน้ำไฟฟ้า ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิของน้ำ



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำกับค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO) และค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (TDS)

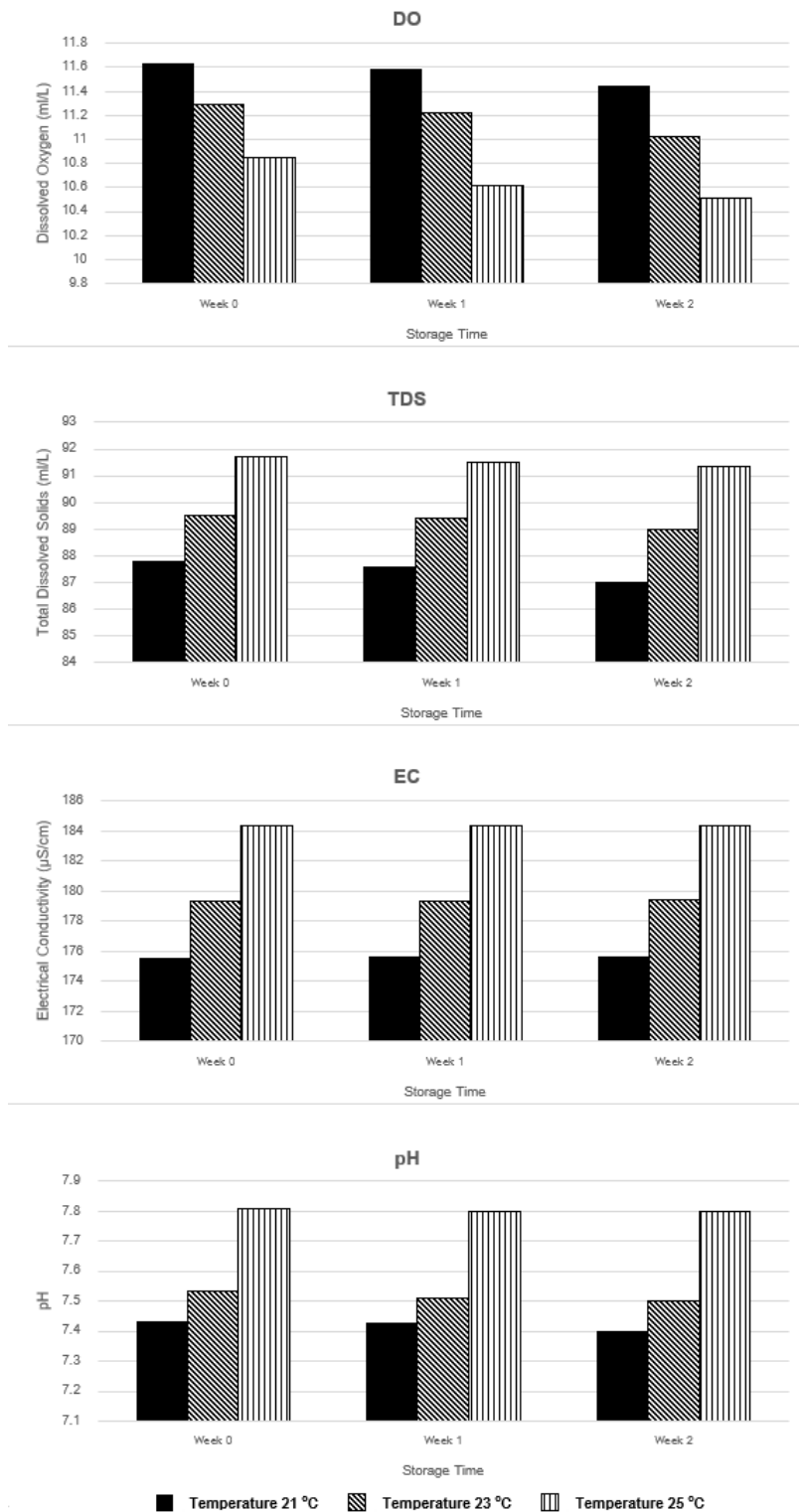
1) จากการศึกษาการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดสอบซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำ จากรูปที่ 3 เมื่อผลของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำแสดงดังเส้นกราฟแบบทึบ และปริมาณของแข็งละลายในน้ำแสดงดังเส้นกราฟแบบประ ความเข้มข้นของค่าออกซิเจนละลายในน้ำที่อุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ลดลงอย่างชัดเจน [5] ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ลดลงจาก 11.84 mg/L ที่อุณหภูมิ 20°C เหลือเพียง 10.67 mg/L ที่ 26°C แสดงถึงความสามารถในการละลายออกซิเจนของน้ำที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมฟองอากาศในระบบด้วยวิธีดังกล่าวเมื่อเทียบกับ Fondriest Environmental [6] ได้รายงานว่ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสะอาดที่อุณหภูมิ 20 °C และ 26 °C มีค่าเท่ากับ 9.8 mg/L และ 8.4 mg/L ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการรายงานของ Fondriest Environmental [6] พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มขึ้น 20.8% และ 27.0% ที่อุณหภูมิ 20 °C และ 26 °C ตามลำดับเมื่อมีฟองอากาศอยู่ในน้ำ ขณะเดียวกัน ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 86.9 mg/L เป็น 92.8 mg/L ในช่วงอุณหภูมิ 20-26 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มของอุณหภูมิอาจส่งผลต่อการละลายของแร่ธาตุหรือสารละลายในน้ำ



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำกับค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

2) จากการศึกษาในรูปที่ 4 สามารถวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของน้ำในด้านค่าการนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเชิงพฤติกรรมของค่าอย่างชัดเจน ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ที่ 184.3 $\mu\text{S/cm}$ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นการแปรผันโดยตรงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ [7] และค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 26 °C อยู่ที่ 7.9

ค่าพารามิเตอร์ทั้งค่าการนำไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-ด่าง แสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ 25 °C มีเพียงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าการนำไฟฟ้ามีการชะลอตัว ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดขอบเขตอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่ต้องการควบคุมคุณภาพน้ำ เช่น การปลูกพืชในระบบน้ำหมุนเวียน หรือการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบควบคุม



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบอุณหภูมิและคุณสมบัติของน้ำกับระยะเวลาการเก็บรักษา

3) จากการศึกษาในรูปที่ 5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติน้ำภายใต้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและระยะเวลาเก็บรักษา พบว่าค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยน้ำที่อุณหภูมิ 21 °C มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำสูงสุด อยู่ที่ 11.6 mg/L ในระยะที่เริ่มเก็บรักษาน้ำขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำต่ำที่สุด อยู่ที่ 10.5 mg/L ในระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำสัปดาห์ที่ 2 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาเก็บรักษาในระยะเวลา 2 สัปดาห์ ค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกระดับอุณหภูมิ

สำหรับค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุดในระยะที่เริ่มเก็บรักษาน้ำ อยู่ที่ 91.7 mg/L และ 184.374 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ ขณะที่อุณหภูมิ 21 °C มีค่าต่ำที่สุดในระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำสัปดาห์ที่ 2 อยู่ที่ 87.01 mg/L และ 175.63 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ตามลำดับ พบว่าในแต่ละสัปดาห์การเก็บรักษาน้ำทำให้ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าการนำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยคงค่าที่สูงในกลุ่มอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและการละลายของสารละลายในน้ำ

ค่าความเป็นกรด-ด่างพบว่าอุณหภูมิต่ำกว่ามีค่าค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า โดยน้ำที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่า pH สูงกว่าที่ 21 °C และ 23 °C อย่างชัดเจน ในระยะที่เริ่มเก็บรักษาค่าสูงสุดอยู่ที่ 7.8 และเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาสัปดาห์ที่ 2 มีค่าต่ำอยู่ที่ 7.4 เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาในช่วงสัปดาห์เริ่มต้นถึงสัปดาห์ที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย [8]

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อคุณสมบัติน้ำ โดยเฉพาะปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำซึ่งลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ในขณะที่ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ การนำไฟฟ้า และความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนผลของระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำ 2 สัปดาห์มีผลกระทบต่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำอย่างชัดเจน [9] แต่ส่งผลต่อปริมาณของแข็งละลายในน้ำ การนำไฟฟ้า และความเป็นกรด-ด่าง เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีการละลายก๊าซในน้ำที่พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายออกซิเจนจะลดลง ในขณะที่การละลายของสารแข็งและการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ [10]

3.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของงานวิจัย

การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของน้ำจากตารางที่ 2-5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แบบสองปัจจัย (Two-way ANOVA) ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % โดยพิจารณา ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาน้ำต่อคุณสมบัติ 4 ด้าน ได้แก่ ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่านำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง

โดยแต่ละตารางแสดงค่า SS (Sum of Squares), DF (Degrees of Freedom), MS (Mean Square), F (F-ratio) และ Sig. (ระดับนัยสำคัญ)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาหน้าต่อค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO)

Source	SS (Type III)	DF	MS	F	Sig.
Temp	12.192	2	6.096	14.285	<0.001
Week	1.017	2	0.508	1.191	0.309
Temp * Week	0.115	4	0.029	0.067	0.992
Error	34.567	81	0.427		

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาหน้าต่อค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (TDS)

Source	SS (Type III)	DF	MS	F	Sig.
Temp	248.025	2	124.013	30.282	<0.001
Week	5.322	2	2.661	0.650	0.525
Temp * Week	0.589	4	0.147	0.036	0.997
Error	331.719	81	4.095		

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเพื่อศึกษาผลของ อุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาหน้าต่อค่านำไฟฟ้า (EC)

Source	SS (Type III)	DF	MS	F	Sig.
Temp	1157.688	2	578.844	63.485	<0.001
Week	0.016	2	0.008	0.001	0.999
Temp * Week	0.016	4	0.004	0.000	1.000
Error	738.544	81	9.118		

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาหน้าต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Source	SS (Type III)	DF	MS	F	Sig.
Temp	2.382	2	1.191	682.818	<0.000
Week	0.008	2	0.004	2.282	<0.109
Temp * Week	0.003	4	0.001	0.423	0.792
Error	0.141	81	0.002		

จากการศึกษาตารางที่ 2-5 พบว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดลองส่งผลต่อคุณสมบัติของน้ำทั้ง 4 ประกอบด้วย ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่านำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยพารามิเตอร์ ความเป็นกรด-ด่าง การนำไฟฟ้า และปริมาณของแข็งละลายในน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าลดลง ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ทดลองและระยะเวลาการเก็บรักษาหน้าไม่มีผลกระทบอย่างเด่นชัดในงานทดลองในครั้งนี้ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นต้องพิจารณาปัจจัยอุณหภูมิตัวแปรแต่ละตัวตามอุณหภูมิ โดยการใช้การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey ดังตารางที่ 6-9 [11]

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey เพื่อหาความแตกต่างระหว่างระดับอุณหภูมิการเก็บรักษาหน้ากับค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ (DO)

Post Hoc Comparisons – Temp

Comparison							
Temp	-	Temp	Mean Difference	SE	df	t	P _{Tukey}
21	-	23	0.38	0.17	81.00	2.23	0.071
	-	25	0.90	0.17	81.00	5.32	<0.001
23	-	25	0.52	0.17	81.00	3.09	0.008

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey เพื่อหาความแตกต่างระหว่างระดับอุณหภูมิการเก็บรักษาน้ำกับค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ (TDS)

Comparison			Mean Difference	SE	df	t	p _{tukey}
Temp	-	Temp					
21	-	23	-1.85	0.52	81.00	-3.54	0.002
	-	25	-4.06	0.52	81.00	-7.77	<0.001
23	-	25	-2.21	0.52	81.00	-4.23	<0.001

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey เพื่อหาความแตกต่างระหว่างระดับอุณหภูมิการเก็บรักษาน้ำกับการเก็บรักษาน้ำต่อค่านำไฟฟ้า (EC)

Comparison			Mean Difference	SE	df	t	p _{tukey}
Temp	-	Temp					
21	-	23	-3.74	0.78	81.00	-4.79	<0.001
	-	25	-8.75	0.78	81.00	-11.23	<0.001
23	-	25	-5.02	0.78	81.00	-6.44	<0.001

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey เพื่อหาความแตกต่างระหว่างระดับอุณหภูมิการเก็บรักษาน้ำกับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

Comparison			Mean Difference	SE	df	t	p _{tukey}
Temp	-	Temp					
21	-	23	-0.10	0.01	81.00	-8.81	<0.001
	-	25	-0.38	0.01	81.00	-35.49	<0.001
23	-	25	-0.29	0.01	81.00	-26.68	<0.001

จากการเปรียบเทียบเชิงซ้อนในตารางที่ 6-9 พบว่าตัวแปรคุณภาพน้ำที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามระดับอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 21 °C, 23 °C และ 25 °C โดยค่าออกซิเจนละลายในน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิ 21 °C ให้ค่าออกซิเจนละลายในน้ำสูงที่สุด และ 25 °C ให้ค่าน้อยที่สุด แสดงถึงผลกระทบของอุณหภูมิที่ทำให้การละลายออกซิเจนในน้ำลดลง ค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำและค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

อุณหภูมิ โดยค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 25 °C สูงที่สุด และต่ำที่สุดที่ 21 °C ค่านำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สะท้อนถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าของน้ำที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและปริมาณของแข็งละลาย

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณออกซิเจนละลายน้ำและคุณลักษณะของน้ำในระบบผลิตฟองอากาศด้วยกลไกการทำความเย็น โดยพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญของคุณสมบัติหลัก 4 ด้าน ประกอบด้วย ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ความนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง

คณะผู้จัดใช้เครื่องผลิตฟองอากาศในน้ำด้วยกลไกการทำความเย็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการละลายออกซิเจน การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อค่าปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน [11] เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 11.84 mg/L ที่ 20 °C เหลือเพียง 10.67 mg/L ที่ 26 °C ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำเพิ่มขึ้นจากประมาณ 86.9 mg/L เป็น 92.8 mg/L ในช่วงอุณหภูมิ 20-26 °C ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มของอุณหภูมิอาจมีผลต่อการละลายของแร่ธาตุหรือสารละลายในน้ำในการศึกษาครั้งนี้ ค่าการนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยสูงสุดที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ที่ 184.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นการแปรผันโดยตรงกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างอุณหภูมิและค่าการนำไฟฟ้า อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนในน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำ เพิ่มขึ้นจากระดับ 7.35 ไปจนถึงค่าประมาณ 7.90 ที่อุณหภูมิ 26 °C แสดงถึงแนวโน้มที่น้ำมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Two-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำทั้ง 4 ด้านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระยะเวลาการเก็บรักษาไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อคุณสมบัติในทุกระยะเวลา ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาไม่มีผลกระทบอย่างชัดเจนในทุกกรณีสำหรับการวิจัยในครั้งนี้ โดยจากการวิจัยในครั้งนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ศึกษาพบแนวโน้มที่เกิดขึ้นคือ ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าปริมาณของแข็งละลายในน้ำ ค่าความนำไฟฟ้า และค่าความเป็นกรด-ด่าง มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการอุตสาหกรรม และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น หน่วยงานต้นสังกัดของคณะผู้วิจัย สำหรับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

References

- [1] Mengel K, Kirkby EA, Kosegarten H, Appel T. Plant water relationships. In: Mengel K, Kirkby EA, Kosegarten H, Appel T, editors. Principles of plant nutrition. Dordrecht: Springer; 2001. p. 181-42.
- [2] Zhou Y, Han Z, He C, Feng Q, Wang K, Wang Y, et al. Long-term stability of different kinds of gas nanobubbles in deionized and salt water. Materials 2021;14:1808. doi: 10.3390/ma14071808.
- [3] Stefanescu MF, Sima NV, Boltinescu MM, Petrosel M, Constantin M. Design and construction of an installation for testing bubble generators used for water aeration. Asian Journal of Applied Science and Technology 2020;4(4):73-81.
- [4] Mohsin M, Safdar S, Asghar F, Jamal F. Assessment of drinking water quality and its impact on residents health in Bahawalpur city. International Journal of Humanities and Social Science 2013;3(15):114-28.
- [5] Eheart JW, Park H. Effects of temperature variation on critical stream dissolved oxygen. Water Resources Research 1989;25(2):145–51. doi: 10.1029/WR025i002p00145.
- [6] Fondriest Environmental, Inc. Dissolved oxygen [internet]. 2013 [cited 2025 Sep 17]. Available from: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>.
- [7] Hayashi M. Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. Environmental Monitoring and Assessment 2004;96:119-28. doi: 10.1023/B:EMAS.0000031719.83065.68.
- [8] Zha Y, Cao B, Ni L, Huang Y. Effects of boiling and storage on water quality of tap water, spring water, and bottled water. Water 2025;17(9):1330. doi: 10.3390/w17091330.
- [9] Yavuz VS. Impact of temperature and flow rate on oxygen dynamics and water quality in major Turkish rivers. Scientific Reports 2025;15:22830. doi: 10.1038/s41598-025-06433-8.

- [10] Adjovu GE, Stephen H, Ahmad S. A machine learning approach for the estimation of total dissolved solids concentration in Lake Mead using electrical conductivity and temperature. Water 2023;15(13):2439. doi: 10.3390/w15132439.
- [11] Febiyanto F. Effects of temperature and aeration on the dissolved oxygen (DO) values in freshwater using simple water bath reactor: a brief report. Walisongo Journal of Chemistry 2020;3(1):25–30. doi: 10.21580/wjc.v3i1.6108.

ประวัติผู้เขียนบทความ



กิตติคุณ ปิตุพรหมพันธุ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์
อุตสาหกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์
ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น E-Mail: Kittikun.pi@rmuti.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: เทคโนโลยีด้านการเกษตร, ระบบน้ำเพื่อการเกษตร, การ
อบแห้งผลผลิตทางการเกษตร, เทคโนโลยีน้ำไมโคร/นาโน



คุณนิธิ ดั่งผึ้ง อาจารย์ประจำสาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม
เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.
เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น E-Mail: khunnithi.do@rmuti.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบน้ำเพื่อการเกษตร, เครื่องจักรกลเกษตร, เทคโนโลยี
ด้านการเกษตร,



ปรัชญาวุฒิ โถบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต
ขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น
E-Mail: prutchayawoot.th@rmuti.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ : เทคโนโลยีน้ำไมโคร/นาโน, ฟิสิกส์ประยุกต์, วัสดุนาโน



วิษณุศาสตร์ ออจโยธา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขต
ขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น
E-Mail: vitsanusat.at@rmuti.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: กัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม, เทคโนโลยีนิวเคลียร์,
ธรณีฟิสิกส์ และอนามัยสิ่งแวดล้อม



คณินิจ ประคำมินทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาสถิติประยุกต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขต
ขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมืองขอนแก่น จ.ขอนแก่น
E-Mail: khanuengnij.pr@rmuti.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: สถิติประยุกต์

Article History:

Received: July 13, 2025

Revised: November 12, 2025

Accepted: November 14, 2025

การจำแนกสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยแบบใช้ครั้งเดียว
CHARACTERIZATION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS EMITTED
FROM SINGLE-USE HYGIENIC FACE MASKS

ทับทิม ชาทิสุวรรณ^{1*} และ มณีรัตน์ องค์กรวรรณี²

¹อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

150 ถนนศรีจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000, thabtim.ch@rmu.ac.th

²อาจารย์, วิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพฯ

อาคารนวมินทร์ 1 198 ซอยสามเสน 13 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต

กรุงเทพฯ 10300, maneerat.ong@nmu.ac.th

Thabtim Chatsuvan^{1*} and Maneerat Ongwande²

¹Lecturer, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen

Campus, 150 Srichan Road, KhonKaen 40000, Thailand, thabtim.ch@rmu.ac.th

²Lecturer, Institute of Metropolitan Development Navamindradhiraj University,

Navamindra 1 Building, 198 Samsen Soi 13 Samsen Road, Wachira Phayaban,

Dusit, Bangkok 10300, Thailand, maneerat.ong@nmu.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันหน้ากากอนามัยเป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่นิยมใช้สำหรับป้องกันการติดเชื้อโรคที่แพร่กระจายทางอากาศและฝุ่นละอองขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามหน้ากากอนามัยผลิตจากพอลิเมอร์ที่ปล่อยสารอินทรีย์ระเหยซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผู้สวมใส่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดเชิงปริมาณและคุณภาพของสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยแบบใช้ครั้งเดียวสำหรับใช้ทางการแพทย์และสำหรับใช้ทั่วไป อย่างละ 4 ผลิตภัณฑ์ ทำการทดลองโดยนำชิ้นส่วนตัวอย่างหน้ากากขนาด 1 x 5 ตร.ซม. ใส่ในขวดแก้วเก็บตัวอย่างขนาด 20 มล. ปิดฝาให้แน่นสนิท เขย่าตัวอย่างที่อุณหภูมิ 30 °ซ. เป็นเวลา 24 ชม. ซักตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกแทรกชันและวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการทดลองตรวจพบสารในกลุ่มแอลเคนเป็นหลักซึ่งมาจากวัตถุดิบของเส้นใยพอลิโพรพิลีน และยังพบสารในกลุ่มคีโตน อะโรมาติก และแอลกอฮอล์ ซึ่งอาจถูกเติมลงไปในกระบวนการผลิตหน้ากากอนามัย อัตราการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวม เท่ากับ 0.015-0.137 มก./ตร.ม. ต่อชม. จากผลการ

วิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น พบว่า จำนวนวันและชนิดของหน้ากากอนามัยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p -value > 0.05) ต่อปริมาณสารอินทรีย์ระเหยรวมที่ปลดปล่อยออกมาจากหน้ากากอนามัย สำหรับแนวทางลดสารอินทรีย์ระเหยด้วยการให้หน้ากากผึ่งลมเป็นเวลา 3 วัน โดยประมาณ สามารถลดอัตราการปล่อยลงได้ 2-5 เท่า นอกจากนี้การกำหนดมาตรฐานการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยที่กำหนดในท้องตลาดจัดเป็นมาตรการควบคุมสินค้าที่ช่วยสร้างความปลอดภัยให้กับผู้บริโภค

คำสำคัญ: สารอินทรีย์ระเหย, หน้ากากอนามัย, เทคนิค SPME-GCMS

ABSTRACT

Nowadays hygiene face masks, personal protective equipment, are widely used for protection against airborne transmission diseases and particulate matter. However, hygiene face masks made of polymer can emit volatile organic compounds (VOCs) which is harmful to wearers. This study aimed to measure VOCs quantitatively and qualitatively from four brands of single-use medical face masks and four brands of non-medical face masks. Each face mask was tested by cutting into a 1 x 5 cm² piece, placing it into a 20 mL glass sample vial, and sealing it tightly. The sample was then shaken at 30 °C for 24 hours. In-vial VOCs were sampled using solid-phase microextraction (SPME) with a DVB/CAR/PDMS fiber for 3 minutes, then analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Results show alkanes were major emitted compounds from all tested face masks due to their production of using polypropylene fibers. Additionally, ketone, aromatic, and alcohol compounds were detected, which are presumed to be additives in the manufacturing process. The total VOC emission rates were 0.03-0.14 µg/m²h⁻¹. The statistical analysis using the linear regression method indicated that the number of days and type of face mask had no statistically significant effect (p -value > 0.05) on the quantity of TVOC emitted from the face masks. A simple method of air-drying face masks for 3 days was found to reduce TVOC by two to five times. Furthermore, VOC emission standards for single-use face masks are thought to assist protecting consumers.

KEYWORDS: volatile organic compounds, face masks, SPME-GCMS technique

1. บทนำ

ปัจจุบันโรคโควิด-19 (coronavirus disease 2019; COVID-19) ในประเทศไทยปรับเป็นโรคติดต่อที่ต้องเฝ้าระวังตาม พ.ร.บ.โรคติดต่อ พ.ศ. 2558 จากการรายงานของกองระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค, ประเทศไทย รายงานว่า ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2568 - 4 มิถุนายน 2568 พบผู้ป่วยสะสมจำนวน 333,844 คน เสียชีวิตสะสม 73 คน และคาดว่าพบผู้ป่วยรายใหม่อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการแพร่ระบาดของโรคมีความสัมพันธ์กับกิจกรรมหรือการรวมกลุ่มของคนจำนวนมาก ส่วนการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ (influenza) รายงานว่า ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2568 - 24 พฤษภาคม 2568 พบผู้ป่วยสะสม จำนวน 343,285 คน เสียชีวิต จำนวน 47 คน และมีอัตราการป่วย 528.85 ต่อประชากรแสนคน ซึ่งอัตราการป่วยยังคงสูงกว่าค่ามัธยฐานของ 5 ปี ย้อนหลัง [1,2] รวมถึงปัญหาด้านมลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (particulate matters; PM) ที่ยังคงเป็นปัญหาและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากการรายงานของ บีบีซีนิวส์ ในปี พ.ศ. 2566 พบว่าคนไทยกว่า 10.5 ล้านคนป่วยด้วยโรคที่เชื่อมโยงกับมลพิษทางอากาศ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อปี พ.ศ. 2565 ร้อยละ 116 และ ในช่วง 9 สัปดาห์แรกของปี พ.ศ. 2567 พบผู้ป่วยด้วยโรคที่เกี่ยวข้องกับมลพิษทางอากาศแล้ว 1.6 ล้านคน เพิ่มขึ้นจากช่วงเวลาเดียวกันเมื่อปี พ.ศ. 2566 อยู่ที่ 1.3 ล้านคน [3] จากการรายงานของสภาวะอากาศโลกฉบับที่ 5 (state of global air - SoGA) พบว่า มลพิษทางอากาศกำลังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และได้กลายเป็นปัจจัยเสี่ยงอันดับที่สองต่อการเสียชีวิตของประชากรทั่วโลก โดยเฉพาะกลุ่มเปราะบาง [4]

จากสถานการณ์ดังกล่าวเป็นผลให้คนไทยหันมาใช้หน้ากากอนามัยเพิ่มขึ้น หน้ากากอนามัยที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นหน้ากากที่มีลักษณะ 3 ชั้น รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ประกอบไปด้วยชั้นนอกและชั้นในถูกเคลือบด้วยสารที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลวได้ มีรูปร่างต่างๆ เช่น แบบจีบ (pleated) แบบถุง (pouch) หรือแบบปากเป็ด (duck-bill) ขนาด 15-25 ไมครอน ชั้นกลางเป็นแผ่นกรอง (filter media) ทำหน้าที่กรองอนุภาคขนาดเล็กหรือแบคทีเรีย ผลิตจากเส้นใยพลาสติกที่ไม่ผ่านการทอ (nonwovens) ขนาด 4-5 ไมครอน วัสดุที่ใช้สำหรับผลิตหน้ากากอนามัยโดยส่วนใหญ่เป็นพอลิโพรพิลีน (polypropylene; PP) หรือบางครั้งอาจมีการใช้พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิสไตรีน (polystyrene) หรือ เซลลูลอส [5]

ในกระบวนการผลิตหน้ากากอนามัยมีขั้นตอนการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น กาว สเปรย์ กาว (foam glue spray) หรือโฟมกาว (foam glue adhesive) เพื่อช่วยยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน การเติมสารย้อมสี การเติมสารแต่งกลิ่น และการเพิ่มสารทนไฟ [6] สารเคมีที่ถูกเติมลงไป ในกระบวนการผลิตอาจจะเหยออกมาขณะที่สวมใส่ และส่งผลกระทบต่อผู้สวมใส่ได้ เช่น หายใจลำบาก อาการแสบจมูก แสบคอ อาการเวียนศีรษะ เป็นต้น นอกจากนี้สารเคมีที่ปลดปล่อยออกมานั้นอาจเป็นเหตุทำให้ผู้ที่สวมใส่มีอาการระคายเคืองผิว ผดผื่น แดง คัน หรืออาจก่อให้เกิดสิ่วร่วมด้วย [7-9] งานวิจัยของ Scheid et al [10] พบว่า การสวมใส่หน้ากากอนามัยมีผลกระทบต่อ

ทางสรีระวิทยา (physiological) เช่น หายใจลำบาก อาการปวดศีรษะ ความรู้สึกกระคายเคืองบริเวณ ใบหู หรือบริเวณที่สัมผัสกับหน้ากากอนามัย เป็นต้น และผลกระทบทางจิตวิทยา (psychological) เช่น รู้สึกไม่พอใจ หรือต่อต้านการสวมใส่หน้ากากอนามัย เป็นต้น งานวิจัยของ Park et al [11] และ Park et al [12] พบว่า การสวมหน้ากากอนามัยมีผลทำให้เกิดรอยแดง (redness) เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญบริเวณที่สวมใส่ โดยเฉพาะบริเวณหน้าผากและแก้ม ความชุ่มชื้นของผิว (hydration) บริเวณที่สวมใส่ลดลง และมีการสูญเสียน้ำจากผิว (trans-epidermal water loss) เพิ่มขึ้น ขนาดของรูขุมขน (skin pore area) มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับบริเวณที่ไม่สัมผัสหน้ากากอนามัย และจากการวิจัยของ Szepietowski et al [13] พบว่า ร้อยละ 20 ของ ผู้ตอบแบบสอบถามที่สวมหน้ากากอนามัย มีอาการคันจากการสวมใส่หน้ากากอนามัย โดยอาการ คันมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่สวมใส่หน้ากากอนามัย โดยเฉพาะเมื่อสวมใส่หน้ากากอนามัย ติดต่อกันนานกว่า 5 ชั่วโมง มีผลทำให้อาการคันเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

จากการวิจัยที่ผ่านมา พบว่ายังไม่มีการศึกษาตรวจสอบอิทธิพลระยะเหຍจากหน้าากอนามัย ที่อาจมีผลทำให้เกิดอาการระคายเคืองผิว ผดผื่น แดง คัน หรือการเกิดสิ่ว ของผู้ที่สวมใส่ ดังนั้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อวัดสารอินทรีย์ระยะเหຍจากหน้าากอนามัยที่จำหน่ายในท้องตลาด โดย ทำการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระยะเหຍในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) พร้อมทั้งหาแนวทางอย่างง่ายในการลดปริมาณสารอินทรีย์ระยะเหຍจากหน้าากอนามัยก่อน การสวมใส่

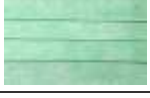
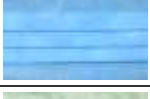
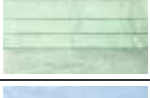
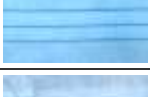
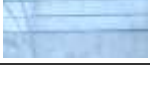
2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 หน้าากอนามัยสำหรับทดสอบ

หน้าากอนามัยที่ผู้วิจัยเลือกทดสอบเป็นหน้าากอนามัยแบบใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (disposable face mask) แบบจีบ (pleated) มีลักษณะ 3 ชั้น ซึ่งเป็นประเภทที่นิยมใช้มากที่สุด [14] จำนวน 8 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ (1) หน้าากอนามัยสำหรับใช้ทางการแพทย์ (medical mask) จำนวน 4 ผลิตภัณฑ์ และ (2) หน้าากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไป (non-medical mask) จำนวน 4 ผลิตภัณฑ์ หน้าากอนามัยทางการแพทย์ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในสถานพยาบาล เช่น โรงพยาบาล คลินิก หรือห้องผ่าตัด โดยได้รับการรับรองมาตรฐานการออกแบบ เช่น ASTM F2100 (american society for testing and materials) หรือ EN 14683 (มาตรฐานยุโรป) ลักษณะของ หน้าากมีโครงสร้างหลายชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นกรองที่สามารถป้องกันเชื้อโรค ละอองฝอย และ ของเหลวจากสารคัดหลั่ง ประสิทธิภาพในการกรองแบคทีเรีย (bacterial filtration efficiency; BFE) สูงกว่าร้อยละ 95 ซึ่งเหมาะสมสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ในการป้องกันการแพร่กระจายของ เชื้อโรค ส่วนหน้าากอนามัยทั่วไปถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น การป้องกัน

ฝุ่นละออง หรือเพื่อลดการแพร่กระจายของละอองฝอยจากการพุด ไอ หรือจาม หน้ากากประเภทนี้ไม่มีมาตรฐานการออกแบบที่ชัดเจน วัสดุที่ใช้ในการผลิตอาจเป็นผ้า วัสดุสังเคราะห์ หรือกระดาษ เป็นต้น ประสิทธิภาพในการกรองเชื้อโรคอาจต่ำกว่าหน้ากากทางการแพทย์ [5,15,16] หน้ากากอนามัยทั้ง 8 ผลิตภัณฑ์ ผู้วิจัยเลือกตัวอย่างแบบตามสะดวก (convenient sampling) เนื่องจากง่ายและสะดวกในการเลือกตัวอย่างได้อย่างรวดเร็ว และตัวอย่างหน้ากากอนามัยที่หลากหลาย หน้ากากอนามัยสำหรับทดสอบผู้วิจัยได้จากร้านสะดวกซื้อ และร้านขายยาทั่วไปในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และจังหวัดมหาสารคาม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชนิดของหน้ากากอนามัยสำหรับทดสอบ

ประเภท	สี	ผลิตภัณฑ์	วัน/ เดือน/ ปี ผลิต	วัน/ เดือน/ปี หมดอายุ	เลขที่ครั้งที่ผลิต	จำนวนวัน [†]	ภาพประกอบ
หน้ากาก อนามัย สำหรับใช้ ทาง การแพทย์	ฟ้า	M1	13-12- 2020	13-12- 2023	201202	47 วัน	
	เขียว	M2	13-12- 2020	13-12- 2023	201202	47 วัน	
	เขียว	M3	11-12- 2020	11-12- 2023	201201	49 วัน	
	ฟ้า	M4	01-08- 2020	01-08- 2023	-	181 วัน	
หน้ากาก อนามัย สำหรับใช้ ทั่วไป	เขียว	N1	20-07- 2020	20-07- 2023	-	193 วัน	
	ฟ้า	N2	28-10- 2020	28-10- 2023	F2010170007G	93 วัน	
	ฟ้า	N3	20-07- 2020	20-07- 2023	-	193 วัน	
	ฟ้า	N4	25-12- 2020	25-12- 2023	-	35 วัน	

หมายเหตุ: † หมายถึง ระยะเวลาตั้งแต่ผลิตจนถึงวันทดสอบ

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่ (1) ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัย เพื่อระบุชนิดและปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมา โดยผู้วิจัยเลือกทดสอบหน้ากากอนามัยทั้ง 8 ผลิตภัณฑ์ (2) ตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยที่ผ่านการฝึกลม 3 วัน โดยประมาณ เพื่อศึกษาแนวทางในการลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยก่อนนำไปใช้งาน โดยผู้วิจัยเลือกตัวอย่างหน้ากากอนามัยจากการทดลองที่ 1 ที่ปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยสูงที่สุด และ (3) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณสารอินทรีย์ระเหยรวมที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัยแต่ละผลิตภัณฑ์

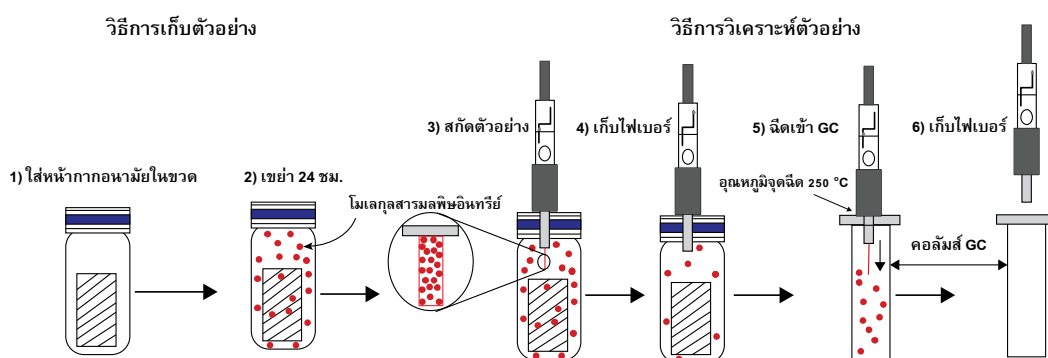
หน้ากากอนามัยสำหรับทดสอบถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ หน้ากากอนามัย หมายถึง หน้ากากอนามัยที่ยังไม่ถูกเปิดใช้งาน หน้ากากอนามัยไม่ฝึกลม หมายถึง หน้ากากอนามัยที่ถูกบรรจุภายในถุงซิปล็อกเป็นระยะเวลา 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ หน้ากากอนามัยฝึกลม หมายถึง หน้ากากอนามัยที่ถูกบรรจุภายในถุงซิปล็อกเป็นเวลา 28 วัน และถูกนำออกมาฝึกลมเป็นเวลา 3 วัน โดยประมาณ หมายถึง หน้ากากอนามัยถูกเก็บรักษาในถุงซิปล็อกเป็นเวลา 28 วัน เนื่องจากอยู่ในช่วงรอใช้งานของเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ระเหย

หน้ากากอนามัยที่ใช้ในการทดลองจะห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminum foil) และเก็บในถุงซิปล็อก (zip lock bag) สองชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับหน้ากากอนามัย โดยเก็บที่อุณหภูมิ 28 ± 0.8 °ซ. และความชื้นร้อยละ 61 ± 1.1 ในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (TODAY'S INSTRUMENTS, Taipei) ก่อนนำไปทดสอบ การทดสอบอุณหภูมิในการทดสอบควบคุมที่ 30 °ซ. เพื่อจำลองสภาพแวดล้อมของประเทศไทย

2.2.1 การทดลองที่ 1 การวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัย

การทดสอบอ้างอิงตามการวิจัยของ Chatsuvan et al [17] ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง เริ่มทดสอบโดยตัดหน้ากากอนามัย ขนาด 1×5 ตร.ซม. ใส่ในขวดแก้วเก็บตัวอย่างขนาด 20 มล. ปิดฝาให้แน่นสนิท เขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °ซ. เป็นระยะเวลา 24 ชม. เพื่อให้หน้ากากอนามัยปล่อยสารอินทรีย์ระเหยสู่อากาศภายในขวดเก็บตัวอย่างจนถึงสภาวะสมดุล (equilibrium) ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเขย่า (shaking incubator) (Miulab, China) จากนั้นเริ่มเก็บตัวอย่างสารอินทรีย์ระเหยภายในขวดเก็บตัวอย่างด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกแทรกชัน (solid-phase microextraction; SPME) ไฟเบอร์ชนิด DVB/CAR/PDMS (Bellefonte, PA, USA) เป็นเวลา 3 นาที ไฟเบอร์มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยในกลุ่มที่ไม่มีขั้ว (apolar) และกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยที่มีขั้วสองขั้ว (bipolar) [18,19] จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-

แมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography-mass spectrometry; GCMS) (Shimadzu, Japan) โดยอุณหภูมิจุดฉีดของเครื่อง 250 °ซ. ระยะเวลาการสารถอินทรีย์ระเหยจากไฟเบอร์ 3 นาที ใช้คอลัมน์ชนิด Rtx®5-MS, อุณหภูมิคอลัมน์ 40-60 °ซ. (อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 °ซ./นาที) และ 60-80 °ซ./นาที (อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 °ซ./นาที) เป็นเวลา 21 นาที, โหมดสแกน 40-500 amu ปรึบเทียบค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยรวม (total volatile organic compound; TVOC) กับสารมาตรฐานโทลูอินที่ความเข้มข้น 0-400 มก./ลบ.ม. [17] การทดสอบนี้เป็นการทดสอบครั้งเดียว (single test) ผู้วิจัยไม่ได้ทำซ้ำ เพื่อให้สามารถเลือกตัวอย่างจากผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายและครอบคลุมหน้าากอนามัยที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยด้วยเทคนิค SPME-GCMS

2.2.2 การทดลองที่ 2 การวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยที่ผ่านการฝังลม 3 วัน

การตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยที่ผ่านการฝังลมภายในอาคาร 3 วัน โดยประมาณ ตัดหน้ากากอนามัย ขนาด 1 x 5 ตร.ซม. จำนวนอย่างละ 2 ชิ้น โดยชิ้นแรกถูกนำไปใส่ในขวดแก้วเก็บตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยโดยทันที ส่วนชิ้นที่สองถูกนำไปฝังลมภายในอาคาร (บริเวณทางเดินด้านนอกของศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม) ดังรูปที่ 2 โดยแขวนบนราวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเข็มกลัดซ่อนปลายเป็นเวลา 3 วัน โดยประมาณ จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาสารอินทรีย์ระเหย โดยใช้เทคนิค SPME-GCMS เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 หมายเหตุ สถานที่ฝังลมของหน้ากากอนามัยเป็นที่โล่ง ลมโกรกจากด้านนอกอาคารเข้าสู่ด้านในอาคารตลอดเวลา ซึ่งเหมาะสำหรับการจำลองสถานการณ์จริงสำหรับฝังหน้ากากอนามัยภายในอาคาร



รูปที่ 2 ลักษณะการฝังลมของหน้ากากอนามัย

2.2.3 การคำนวณอัตราการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวม (TVOC emission)

สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการปลดปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัยในหน่วยต่อพื้นที่ต่อชม. ดังสมการ (1)

$$E = (C_{\text{mask}} - C_{\text{blank}}) * V / A \quad (1)$$

โดยที่ E = อัตราการปลดปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัย (มก./ตร.ม.ต่อชม.)

C_{mask} = ความเข้มข้น TVOC ภายในชุดที่ใส่หน้ากากอนามัย (มก./ลบ.ม.)

C_{blank} = ความเข้มข้น TVOC ภายในชุดควบคุมที่ไม่ใส่หน้ากากอนามัย (มก./ลบ.ม.)

V = ปริมาตรอากาศภายในชุดตัวอย่าง (ลบ.ม.)

A = พื้นที่หน้ากากอนามัย 2 ด้าน (ตร.ม.)

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณ TVOC ที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัยแต่ละผลิตภัณฑ์ (y) โดยกำหนดตัวแปรอิสระ (independent variable) 2 ตัวแปร คือ จำนวนวัน (x_1) และชนิดของหน้ากากอนามัย (x_2)

2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (functional groups)

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของหน้ากากอนามัยด้วยเครื่องฟูเรียรทรานฟอร์มอินฟราเรด (fourier transform infrared spectrometer; FTIR) แบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) ชนิด Universal (UATR) ติดตั้งด้วยผลึกผสม KRS 5-เพอร์ (Perkin Elmer, USA) โดยทำการวัดในช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากหน้ากากอนามัย หน้ากากอนามัยสำหรับวิเคราะห์ผู้วิจัยเลือกใช้หน้ากาก

อนามัยทางการแพทย์ผลิตภัณฑ์ M1 เป็นตัวแทนทดสอบ เนื่องจากหน้ากากอนามัยโดยทั่วไปผลิตจากวัสดุพอลิโพรพิลีนเป็นหลัก [5]

3. ผลการทดลอง

3.1 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัย

ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากหน้ากากอนามัย พบว่า สารส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มแอลเคน (alkane) เช่น สาร 2,4-dimethylheptane, 2,4-dimethyl-1-heptene, 4-methyloctane, 2,5,5-trimethylheptane, 3,3-dimethyloctane, 3,7-dimethyl-1-octene และสารอินทรีย์ระเหยที่พบในปริมาณสูง ได้แก่ สาร 2,5,5-trimethylheptane, 3,3-dimethyloctane, 2,4-dimethyl-1-heptene, 2,4-dimethylheptane, 2,2,4,6,-pentamethyl heptane, 3,7-dimethyl decane, dodecane, hexadecane สารที่ระเหยออกมาจากหน้ากากอนามัยมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์กลุ่มฟังก์ชันที่พื้นผิวของหน้ากาก ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด ที่ช่วงดูดกลืนรังสีอินฟราเรด 400-4000 cm^{-1} พบแถบสเปกตรัมดูดกลืนรังสีในช่วง 2800-3000 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของสารในกลุ่มแอลเคน (อภิปรายในหัวข้อ 3.5)

ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัย

No.	PubChem CID	สารอินทรีย์ระเหย	หน้ากากอนามัยใช้ทางการแพทย์				หน้ากากอนามัยใช้ทั่วไป			
			M1	M2	M3	M4	N1	N2	N3	N4
alkene										
1	21085	3,7-dimethyl-1-octene	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
alkanes										
2	11512	4-methylheptane			✓				✓	
3	35768	2,6,11-trimethyldodecane						✓		
4	14045	2,3,5-trimethylhexane			✓	✓			✓	
5	519423	5-methyldodecane		✓						
6	16656	2,4-dimethylheptane			✓	✓		✓	✓	✓
7	519254	4,5-diethyloctane			✓					✓

ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัย (ต่อ)

No.	PubChem CID	สารอินทรีย์ระเหย	หน้ากากอนามัยใช้ ทางการแพทย์				หน้ากากอนามัยใช้ ทั่วไป			
			M1	M2	M3	M4	N1	N2	N3	N4
8	11511	2,4-dimethylhexane			✓				✓	
9	94213	5-methylundecane			✓					
10	28468	3,7-dimethyldecane				✓	✓		✓	✓
11	537765	2,3,6,7-tetramethyloctane						✓		
12	16665	4-methyloctane		✓	✓	✓		✓	✓	✓
13	18591	2-methyloctane					✓			
14	545936	5-(2-methylpropyl) nonane				✓				✓
15	22202	3-methylnonane							✓	
16	519389	4,7-dimethylundecane			✓					
17	26058	2,2,4,6,6-pentamethylheptane				✓			✓	
18	28459	2,2-dimethyldecane					✓			✓
19	14257	undecane				✓			✓	
20	14478	2,5,5-trimethylheptane	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
21	138117	3,3-dimethyloctane	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
22	17835	4-methyldecane				✓				
23	182333	2,2,4,4-tetramethyloctane				✓			✓	
24	8182	dodecane	✓							
25	86539	3,6-dimethylundecane								✓
26	8186	1-undecan							✓	
27	11006	hexadecane		✓						
aromatic										
28	1140	toluene							✓	✓

ตารางที่ 2 ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยจากหน้ากากอนามัย (ต่อ)

No.	PubChem CID	สารอินทรีย์ระเหย	หน้ากากอนามัยใช้ ทางการแพทย์				หน้ากากอนามัยใช้ ทั่วไป			
			M1	M2	M3	M4	N1	N2	N3	N4
alcohols										
29	98034	tetrahydro-2,5-dimethyl- 2H-pyranmethanol		✓	✓				✓	✓
30	86776	2-methyl-1-decanol						✓		
31	7720	2-ethylhexanol						✓		✓
ketone										
32	7909	methyl isobutyl ketone								✓
33	31261	acetylacetone								✓
34	94317	4-methyl-2-heptanone		✓						
sulfuric										
35	65111	decyl methyl sulfoxide						✓	✓	
carboxylic acids										
36	11048796	methoxy phenyl oxime		✓	✓			✓		
terpene										
37	440917	d-limonene						✓		

หมายเหตุ: ✓ หมายถึง ตรวจพบสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัย

สารที่พบเหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตพลาสติก อุตสาหกรรมแปรรูปยางและกระดาษ เป็นต้น [20] ดังนั้นมีความเป็นไปได้ว่า สารกลุ่มนี้อาจถูกเติมในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymer) เนื่องจากหน้ากากอนามัยส่วนใหญ่ผลิตจากการหลอมเม็ดพลาสติกที่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นพอลิโพรพิลีน [5] นอกจากนี้ยังตรวจพบสาร acetyl acetone, toluene และ 2-ethylhexanol ปลดปล่อยจากหน้ากากผลิตภัณฑ์ N4 สารทั้ง 3 ชนิดนี้อยู่ในกลุ่มคีโตน กลุ่มอะโรมาติก และกลุ่มแอลกอฮอล์ ซึ่งสารในกลุ่มเหล่านี้มักถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการทางอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น สารเติมแต่งน้ำมันหล่อลื่น ทำสี สีเคลือบเงา เรซิน หมึกสีย้อมยา และสารเคมีอื่น ๆ เป็นต้น [21,22] จึงมี

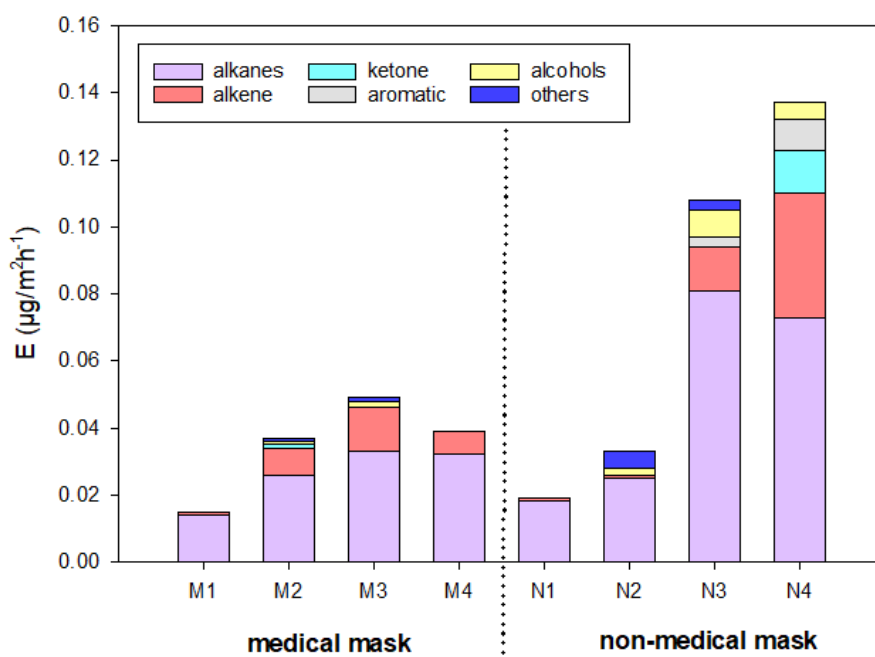
ความเป็นไปได้ว่าสารทั้ง 3 ชนิดนี้อาจมาจากการเติมแต่งสีของหน้ากากอนามัย งานวิจัยของ Cabanes et al [20] ตรวจพบสารในกลุ่มแอลเคน แอลคีน อะโรมาติก แอกอฮอล์ คีโตน และสารประกอบกลุ่มอื่น ๆ จากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน และงานวิจัยของ Ren et al [23] ตรวจพบสารในกลุ่มแอลเคน แอลคีน แอลไคน์ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารอินทรีย์ระเหยในกลุ่มอื่น ๆ จากอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก

สารเหล่านี้เมื่อสูดดมเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน อาจมีผลต่อระบบทางเดินหายใจ ระคายเคืองจมูก เจ็บคอ วิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ เป็นต้น [24] นอกจากนี้สารอินทรีย์ระเหยเหล่านี้อาจเป็นเหตุให้ผู้สวมใส่มีอาการอาการระคายเคืองผิว ผดผื่น แดง คัน หรืออาจก่อให้เกิดสิว [7-13]

3.2 อัตราการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวมจากหน้ากากอนามัย

รูปที่ 3 แสดงอัตราการปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัย หน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทางการแพทย์ ทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์ มีอัตราการปล่อย TVOC อยู่ในช่วง 0.015-0.048 มก./ตร.ม.ต่อชม. และหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไปทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์ มีค่าอยู่ในช่วง 0.019-0.137 มก./ตร.ม.ต่อชม. จากการจะเห็นได้ว่าหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไปผลิตภัณฑ์ N4 มีการปล่อยปริมาณ TVOC สูงกว่าหน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์อื่น 1-9 เท่า เนื่องจากการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยในกลุ่มแอลเคน แอลคีน คีโตน และกลุ่มสารอะโรมาติก ออกมาสูงกว่าหน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์อื่น ในขณะที่บางผลิตภัณฑ์ปลดปล่อยเฉพาะสารในกลุ่มแอลเคน ทั้งนี้ปริมาณ TVOC ที่ปลดปล่อยออกมาจากหน้ากากอนามัยแต่ละผลิตภัณฑ์ อาจขึ้นอยู่กับวัตถุดิบการผลิตของหน้ากากอนามัยแต่ละผลิตภัณฑ์ เช่น ชนิดของสารเคมีหรือพลาสติกจากการสังเคราะห์เส้นใยพอลิโพรพิลีน สารเคมีที่เติมลงไปในการบวนการผลิตขึ้นรูปหน้ากากอนามัยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของหน้ากากอนามัย เช่น การย้อมสี การเพิ่มกลิ่น และการเพิ่มสารทนไฟ เป็นต้น งานวิจัยของ Ren et al [23] ตรวจพบสารอินทรีย์ระเหยในกลุ่มแอลเคน แอลคีน แอลไคน์ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารอินทรีย์ระเหยในกลุ่มอื่น ๆ จากอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก งานวิจัยของ Chatsuvan et al [17] ตรวจวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยจากผ้าที่มาจากเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพใด ๆ พบว่า ผ้าสีขาวมีอัตราการปล่อยน้อยกว่าผ้าที่ผ่านการย้อมสีด้วยวิธีทางเคมี 1.9 เท่า

พิจารณาตารางที่ 3 พบว่า อัตราการปลดปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ และหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับวัสดุประเภทไม้เคลือบผิวที่ผ่านการทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 3 และ 28 วัน และมีค่าต่ำกว่าวัสดุประเภทผ้าบางชนิดประมาณ 10^1 - 10^2 เท่า รวมถึงเส้นใยบางชนิดประมาณ 10^3 - 10^4 เท่า หน้ากากอนามัยเป็นวัสดุที่สัมผัสกับบริเวณใบหน้า จมูก และปาก สารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจึงอาจเข้าสู่ร่างกายและก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้สวมใส่ได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการใช้งานเป็นเวลานาน



หมายเหตุ: others หมายถึง สารอินทรีย์ระเหยรวมของกลุ่ม sulfuric, carboxylic acids และ terpene

รูปที่ 3 อัตราการปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัย

ตารางที่ 3 อัตราการปลดปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัยและวัสดุประเภทต่าง ๆ

ประเภทวัสดุ	วัสดุทดสอบ	E (µg/m²h⁻¹)			
		0 วัน [†]	3 วัน	28 วัน	Ref.
พลาสติก	M1 – M4	0.015 – 0.048	-	-	
	N1 – N4	0.019 – 0.137			
ผ้า/สิ่งทอ	SU	4.80	-	-	[17]
	SN	0.70			
	SC	9.00			
	COT	3.20			
	POE	3.70			
	T/C	1.90			

ตารางที่ 3 อัตราการปลดปล่อย TVOC จากหน้ากากอนามัยและวัสดุประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

ประเภทวัสดุ	วัสดุทดสอบ	E ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}^{-1}$)			
		0 วัน [†]	3 วัน	28 วัน	Ref.
เส้นใย	cellulose flakes	-	11	ND	[25]
	wool	-	4	ND	
	hemp fibre	-	33	8	
	wood fibre/Wool	-	911	160	
	hemp lime mix (330 kg/m ³)	-	34	ND	
	hemp lime mix (275 kg/m ³)	-	28	ND	
	rigid wood fibre	-	14	9	
ไม้ดิบ ร้อยละ 100	expanded cork	-	50	16	[26]
ไม้กึ่งสังเคราะห์	particle board	-	70	19	
ไม้สังเคราะห์ ร้อยละ 100	ESP insulation	-	155	26	
ไม้เคลือบผิว	wood-plywood (teak oil)	-	0.25	0.15	[27]
	MDF (spray paint)	-	0.25	0.10	
	OBS (spray paint)	-	0.25	0.10	
	MDF (acrylic paint)	-	0.15	0.05	
	OBS (acrylic paint)	-	0.15	0.05	
	Wood-plywood (soft cover)	-	0.05	0.05	
	MDF (soft cover)	-	0.05	0.05	

หมายเหตุ: † = ตรวจวัดทันทีหลังเปิดบรรจุภัณฑ์

ND = Not detected

3.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่าการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) ซึ่งให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณ TVOC โดยมีค่า Adjusted R² เท่ากับ 0.017 นั้นหมายความว่ารูปแบบสมการถดถอยมีความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ต่ำ ซึ่งอาจเป็นผลจากจำนวนตัวอย่างที่น้อย

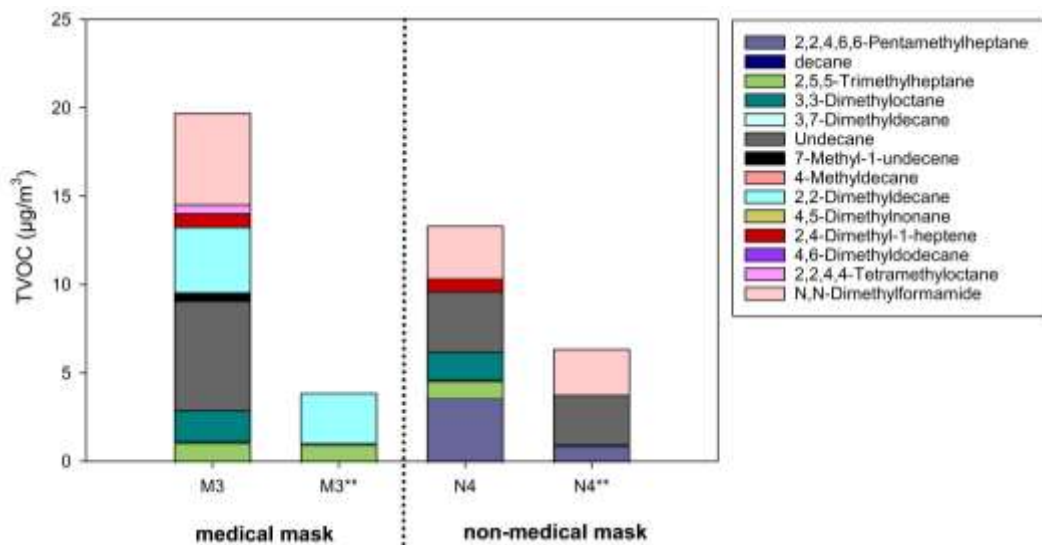
ตารางที่ 4 ค่าสถิติจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น

ตัวแปร	Unstandardized B	Standardized Coefficients Beta	p-value
Constant	58.071	-	0.160
จำนวนวัน (x_1)	-0.205	-0.280	0.515
ชนิดของหน้ากากอนามัย (x_2)	56.718	0.578	0.209
Adjusted $R^2 = 0.017$			

3.4 แนวทางการลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัย

รูปที่ 4 ปริมาณ TVOC จากหน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ M3 ตัวอย่างทดสอบหน้ากากอนามัยทางการแพทย์ และหน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ N4 ตัวอย่างทดสอบหน้ากากอนามัยใช้ทั่วไป กรณีที่ไม่ผ่านการฟุ้งดมพบความเข้มข้นในขวดแก้วของสาร TVOC เท่ากับ 20 และ 13 มกก./ลบ.ม. ตามลำดับ สารที่พบส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มแอลเคนที่มีอยู่เดิมในหน้ากากอนามัย (การทดลอง 1 ตารางที่ 2) เช่น สาร 2,5,5-trimethylheptane, 3,3-dimethyloctane, undecane เป็นต้น จากนั้นเมื่อนำหน้ากากอนามัยทั้งสองผลิตภัณฑ์ ไปฟุ้งดมเป็นเวลาต่อเนื่อง 3 วัน โดยประมาณ (หมายเหตุ สัญลักษณ์ดังรูปที่ 4 M3** และ N4**) พบว่า ความเข้มข้นของสาร TVOC ลดลง 5 เท่า และ 2 เท่า ตามลำดับ

พิจารณาตารางที่ 5 พบว่า หลังการฟุ้งดมปริมาณสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยมีแนวโน้มลดลง โดยหน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ M3 พบสารบางชนิด เช่น สาร 2,5,5-trimethylheptane และ 2,2-dimethyldecane มีค่าความเข้มข้นลดลงร้อยละ 9.43 และ 23.92 ตามลำดับ ขณะที่สารบางชนิด เช่น สาร 3,3-dimethyloctane, undecane และ 7-methyl-1-undecene ตรวจไม่พบหลังการฟุ้งดม สำหรับผลิตภัณฑ์ N4 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน โดยสาร 2,2,4,6,6-pentamethylheptane, undecane และ N,N-dimethylformamide มีปริมาณลดลงในช่วงร้อยละ 13.0-73.7 และมีสารบางชนิด เช่น สาร 2,5,5-trimethylheptane และ 3,3-dimethyloctane ตรวจไม่พบหลังการฟุ้งดม ทั้งนี้ ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมาแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารแต่ละชนิดที่อาจมีผลต่อการระเหย



รูปที่ 4 ปริมาณ TVOC ของหน้ากากผลิตภัณฑ์ M3 และ N4 กรณีไม่ผ่านการฟุ้งลม เทียบกับกรณีผ่านการฟุ้งลม M3** และ N4**

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นและร้อยละการลดลงของสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยก่อนและหลังการฟุ้งลม

สารอินทรีย์ระเหย	หน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ M3 (µg/m³)			หน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ N4 (µg/m³)		
	ไม่ฟุ้งลม	ฟุ้งลม	ร้อยละลดลง	ไม่ฟุ้งลม	ฟุ้งลม	ร้อยละลดลง
2,2,4,6,6-pentamethylheptane	ND	ND	0	3.66	0.96	73.7
2,5,5-trimethylheptane	1.11	1.00	9.43	0.95	0	100.0
3,3-dimethyloctane	1.75	0	100	1.55	0	100.0
undecane	6.20	0	100	3.44	2.77	19.5
7-methyl-1-undecene	0.47	0	100	ND	ND	0
2,2-dimethyldecane	3.72	2.83	23.92	ND	ND	0
2,4-dimethyl-1-heptene	0.77	0	100	0.72	0	100.0
2,2,4,4-tetramethyloctane	0.51	0	100	ND	ND	0
N,N-dimethylformamide	5.18	0	100	2.99	2.60	13.0

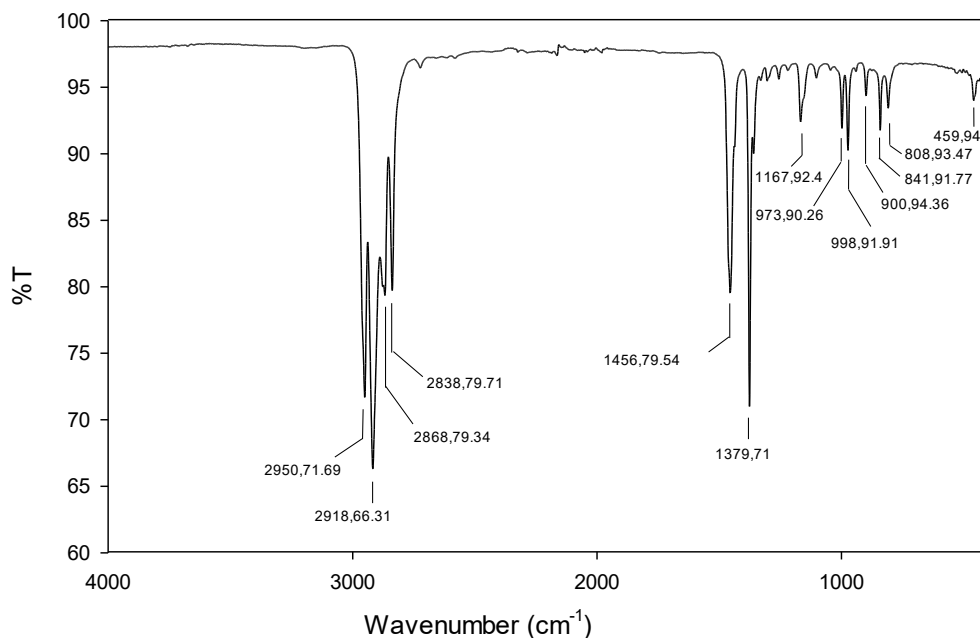
หมายเหตุ: ND = Not detected

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกล้างจากกระบวนการผลิตยังคงมีอยู่และระเหยออกมา ซึ่งปริมาณสารอินทรีย์ที่ระเหยออกมานั้นอาจส่งผลกระทบต่อผู้ที่สวมใส่หน้ากากอนามัย โดยเฉพาะผู้ที่สวมใส่หน้ากากอนามัยต่อเนื่องหลายชั่วโมง เพื่อดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น บุคลากรในสถานพยาบาล ได้แก่ โรงพยาบาล คลินิก หรือห้องผ่าตัด เป็นต้น อาจได้รับความเสี่ยงจากการสัมผัสสารเข้าสู่ร่างกายขณะดำเนินกิจกรรม สารเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานานอาจมีผลทำให้จมูก คอ และปอดเกิดการระคายเคือง มีอาการไอ หายใจมีเสียงหวีด หรือหายใจถี่รวมถึงสารเหล่านี้อาจเป็นต้นเหตุที่ทำให้ผู้เกิดอาการระคายเคืองผิวหนัง แดง คัน หรืออาจก่อให้เกิดสิว [7-13]

อย่างไรก็ดี สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2424-2562 ได้มีการกำหนดลักษณะทั่วไปของหน้ากากอนามัยว่าต้องไม่มีกลิ่นผิดปกติ การทดสอบให้ทำโดยตรวจพินิจ การกำหนดคุณลักษณะทางฟิสิกส์ ตามมาตรฐาน ASTM F2100 รวมถึงการกำหนดคุณลักษณะทางชีวภาพของหน้ากากอนามัยระดับ 3 คือหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทางการแพทย์ในศัลยกรรม แผลบาดเจ็บขนาดใหญ่ ว่าต้องไม่ระคายเคืองผิวหนัง และไม่เกิดการแพ้ทางผิวหนัง การทดสอบให้ปฏิบัติตาม มอก. 2395 เล่ม 10-2565 แต่ยังไม่มีการกำหนดระดับความเข้มข้นของปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่ปล่อยออกมาจากหน้ากากอนามัย ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยของผู้สวมใส่ อาจมีความจำเป็นต้องตรวจวัดหน้ากากอนามัยด้วยวิธีมาตรฐานทางห้องปฏิบัติการ ก่อนออกจำหน่าย หรือหาแนวทางเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่ปลดปล่อยออกมา

3.5 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของหน้ากากอนามัย

รูปที่ 5 สเปกตรัมดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรดของหน้ากากอนามัย ที่ช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด 400-4000 cm^{-1} ด้วยเครื่อง FT-IR จากกราฟพบช่วงดูดกลืนรังสีประมาณ 460-2950 cm^{-1} โดยพบช่วงดูดกลืนรังสี 2950, 2918, 2868 และ 2838 cm^{-1} ที่แสดงถึงพันธะ C-H ฟังก์ชันแอลเคนในกลุ่มแอลเคน (alkanes) ซึ่งมีความสอดคล้องกับชนิดของสารอินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมา งานวิจัยของ Fan et al [28] ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของเม็ดพลาสติกโพรพิลีน (polypropylene; PP) ด้วยเครื่อง FT-IR ที่ช่วงดูดกลืนรังสี 650-4000 cm^{-1} จากการทดลองพบช่วงดูดกลืนรังสี 2958, 2916, 2868, 2837, 1456 cm^{-1} และช่วง 841-998 cm^{-1} ที่แสดงถึงพันธะ C-H ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันแอลของหมู่แอลเคนบนพื้นผิวแผ่น PP



รูปที่ 5 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหน้ากากอนามัย ด้วยเครื่อง FT-IR

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการตรวจวัดสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัยสำหรับทางการแพทย์ และหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไป พบการปลดปล่อยสารในกลุ่มแอลเคนออกมาเป็นหลัก เนื่องจากสารในกลุ่มนี้ถูกนำมาใช้ในการผลิตเส้นใยพอลิโพรพิลีนสำหรับผลิตหน้ากากอนามัย นอกจากนี้ยังตรวจพบสารในกลุ่ม คีโตน อะโรมาติก และแอลกอฮอล์ จากหน้ากากอนามัยบางผลิตภัณฑ์ ซึ่งคาดว่ามาจากการเติมลงไปในช่วงขั้นตอนกระบวนการผลิต มีอัตราการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวมอยู่ในช่วง 0.015-0.137 มก./ตร.ม.ต่อชม. หน้ากากอนามัยผลิตภัณฑ์ N4 ซึ่งเป็นตัวอย่างหน้ากากอนามัยสำหรับใช้ทั่วไป ปลดปล่อยออกมาในปริมาณสูงกว่าผลิตภัณฑ์อื่น 1-9 เท่า พิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยรวมจากหน้ากากอนามัยด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าจำนวนวันและชนิดของหน้ากากอนามัยไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\text{-value} > 0.05$) การฝังลมของหน้ากากอนามัยในพื้นที่โล่งนาน 3 วัน โดยประมาณ ช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยรวมที่ปลดปล่อยออกมา 2-5 เท่า ทั้งนี้หน้ากากอนามัยยังคงเป็นอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อป้องกันตนเองจากโรคทางเดินหายใจ เช่น โควิด-19 (COVID-19) ไข้หวัดใหญ่ (influenza) ภูมิแพ้ (allergy) เป็นต้น ผู้คนละอองขนาดเล็กเข้าสู่ร่างกาย หรือการสวมใส่เพื่อดำเนินกิจกรรมในชีวิตประจำวัน อาทิเช่น บุคลากรในสถานพยาบาล ได้แก่ โรงพยาบาล คลินิก เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีมาตรฐานกำหนดระดับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยจากหน้ากากอนามัย การ

ตรวจวัดหน้ากากอนามัยด้วยวิธีมาตรฐานทางห้องปฏิบัติการก่อนนำออกจำหน่าย รวมถึงการเลือกใช้วัสดุผลิตหน้ากากอนามัยที่มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยต่ำ (low VOCs) สำหรับผลิตหน้ากากอนามัย เพื่อความปลอดภัยต่อสุขภาพของผู้ใช้งาน โดยเฉพาะกลุ่มเปราะบาง เช่น เด็กเล็ก คนท้อง ผู้สูงอายุ และผู้ที่มีโรคประจำตัว เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น และศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

References

- [1] Division of Epidemiology, Department of Disease Control, Ministry of Public Health. The situation of COVID-19 [Internet]. 2025 [cited 2025 May 30]. Available from: https://ddc.moph.go.th/uploads/ckeditor2/files/Alert_covid_04.26.2568.pdf. (In thai)
- [2] Division of Epidemiology, Department of Disease Control, Ministry of Public Health. The situation of influenza [Internet]. 2025 [cited 2025 May 30]. Available from: <https://ddc.moph.go.th/doe/pagecontent.php?page=607&dept=doe>. (In thai)
- [3] BBC News. PM2.5: More than 10 million people in Thailand will be sick from “air pollution” in 2023 [Internet]. 2025 [cited 2025 May 30]. Available from: <https://www.bbc.com/thai/articles/c723508nx22o>. (In thai)
- [4] Unicef Thailand. Air pollution accounted for 8.1 million deaths globally in 2021, becoming the second leading risk factor for death, including for children under five years [Internet]. 2025 [cited 2024 Oct30]. Available from: <https://shorturl.asia/3ki60>. (In thai)
- [5] World Health Organization. Advice on the use of masks in the context of COVID-19: interim guidance, 5 June 2020 [Internet]. 2025 [cited 2024 Oct 30]. Available from: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/045f4cc8-f9a2-4792-b3a6-bb2e22b42ea4/content>.
- [6] Grandwang NonWoven. Non-woven production process [Internet]. 2025 [cited 2024 Oct 2]. Available from: <https://www.grandwangnonwoven.com/content/26707/Non-woven-production-process>. (In thai)

- [7] Techasatian L, Lebsing S, Uppala R, Thaowandee W, Chaiyarit J, Supakunpinyo C, et al. The effects of the face mask on the skin underneath: A prospective survey during the COVID-19 pandemic. *Journal of Primary Care & Community Health* 2020;11. doi: 10.1177/2150132720966167.
- [8] Park S, Han J, Yeon YM, Kang NY, Kim E, Suh BF. Effects of one year of daily face mask wearing on the skin during the coronavirus disease 2019 pandemic. *Skin Research and Technology* 2022;28(5):729-39. doi: 10.1111/srt.13193.
- [9] Taleb R, Jad R, Salem R, Lababidi N, Awassa N, Atchan H, et al. The effect of frequently wearing face masks during the COVID-19 pandemic on the development of acne in adults: a crosssectional descriptive study. *BAU Journal - Health and Wellbeing* 2022;4(2):4. doi: 10.54729/MXTG6413.
- [10] Scheid JL, Lupien SP, Ford GS, West SL. Commentary: physiological and psychological impact of face mask usage during the COVID-19 pandemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(18):6655. doi: 10.3390/ijerph17186655.
- [11] Park S, Han J, Yeon YM, Kang NY, Kim E. Effect of face mask on skin characteristics changes during the COVID-19 pandemic. *Skin Research and Technology* 2020;27(4): 554-9.
- [12] Park S, Han J, Yeon YM, Kang NY, Kim E, SUH BF. Long-term effects of face masks on skin characteristics during the COVID-19 pandemic. *Skin Research and Technology*. 2022;28(1):153-61. doi: 10.1111/srt.13107.
- [13] Szepietowski JC, Matusiak Ł, Szepietowska M, Krajewski P, Białyński-Birula R. Face mask-induced itch: a self-questionnaire study of 2,315 responders during the COVID-19 pandemic. *Acta Dermato-Venereologica*. 2020;100(10):1-5. doi: 10.2340/00015555-3536.
- [14] Plastics Institute of Thailand. Medical face mask products [Internet]. 2025 [cited 2025 Jan 2]. Available from: <https://rmuti.me/gkGBxAQ6Q>. (In thai)
- [15] ASTM International. ASTM F2100-21. Standard specification for performance of materials used in medical face masks. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2021
- [16] European Committee for Standardization. EN 14683:2019+AC:2019. Medical face masks - requirements and test methods [Internet]. 2019 [cited 2025 Jan 30]. Available from: <http://www.shanghaijifa.com/uploadfile/file/20200318/1584515148111951.pdf>.

- [17] Chatsuvan T, Homwuttiwong S, Morris J, Ongwandee M. Volatile organic compounds from unexpected sources: fabric softener-initiated emissions. *EnvironmentAsia* 2022; 15(1):131-41. doi: 10.14456/ea.2022.12.
- [18] Vas G, Vékey K. Solid-phase microextraction: a powerful sample preparation tool prior to mass spectrometric analysis. *Journal of Mass Spectrometry* 2004;39(3):233-54. doi: 10.1002/jms.606.
- [19] Goss KU, Schwarzenbach RP. Linear free energy relationships used to evaluate equilibrium partitioning of organic compounds. *Environmental Science & Technology* 2001;35(1):1-9. doi: 10.1021/es000996d.
- [20] Cabanes A, Valdés F, Fullana A. A review on VOCs from recycled plastics. *Sustainable Materials and Technologies* 2020;25:e00179. doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00179.
- [21] National Center for Biotechnology Information. PubChem compound summary for CID 31261, Acetylacetone [Internet]. 2025 [cited 2025 Feb 3]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/%20%09acetylacetone>.
- [22] National Center for Biotechnology Information. PubChem compound summary for CID 1140, Toluene [Internet]. 2025 [cited 2025 Feb 3]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Toluene>.
- [23] Ren Y, Guan X, Peng Y, Gong A, Xie H, Chen S, et al. Characterization of VOC emissions and health risk assessment in the plastic manufacturing industry. *Journal of Environmental Management* 2024;357:120730. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120730.
- [24] Mckee RH, Adenuga MD, Carrillo JC. Characterization of the toxicological hazards of hydrocarbon solvents. *Critical Reviews in Toxicology* 2015;45(4):273-365. doi: 10.3109/10408444.2015.1016216.
- [25] Maskell D, da Silva CF, Mower K, Rana C, Dengel A, Ball RJ, et al. Properties of bio-based insulation materials and their potential impact on indoor air quality. *Academic Journal of Civil Engineering* 2015;33(2):156-63. doi: 10.26168/icbbm2015.24.
- [26] de Kort JMA, Gauvin F, Loomans MGLC, Brouwers HJH. Emission rates of bio-based building materials, a method description for qualifying and quantifying VOC emissions. *Science of the Total Environment* 2023;905:167158. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167158.

- [27] Saengphet T, Yimprayoon C. A comparative study of TVOC and HCHO emissions from various multilayer built-in furniture components based on ISO 16000-9:2006 emission test chamber methods. *Nakhara: Journal of Environmental Design and Planning* 2022;21(1):205. doi: 10.54028/NJ202221205.
- [28] Fan C, Huang Y, Lin J, Li J. Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: the use of polyethylene terephthalate (PET), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC) and nylon (NY) as the model constituents. *Environmental Technology & Innovation* 2021;23:101798. doi: 10.1016/j.eti.2021.101798.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ทับทิม ชาดิสุวรรณ ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น 150 ถ.ศรีจันทร์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

Email: thabtim.ch@rmuti.ac.th



มนิรัตน์ องค์กรณดี ตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาการพัฒนาและจัดการเมือง วิทยาลัยพัฒนามหานคร อาคารนวมินทร์ 1 วิทยาลัยพัฒนามหานคร 198 ซอยสามเสน 13 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 Email: maneerat.ong@nmu.ac.th

Article History:

Received: June 17, 2025

Revised: November 22, 2025

Accepted: November 25, 2025

การจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติ
แบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) บนทางพิเศษศรีรัช

TOLL LANE CONFIGURATION FOR M-FLOW ELECTRONIC TOLL
COLLECTION SYSTEM ON THE SI-RAT EXPRESSWAY

นริศรา วิเศษทอง¹ และ เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช²

¹นักศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาคาร 89 1518 ถนนประชาหาราญ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800,
s6401081856080@email.kmutnb.ac.th

²อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาคาร 89 1518 ถนนประชาหาราญ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800,
terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th

Naritsara Wisetthong¹ and Terdsak Rongviriyapanich²

¹Student, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, Building 89, 1518 Pracharaj 1 Rd, Wong Sawang Area, Bangsue District,
Bangkok 10800, s6401081856080@email.kmutnb.ac.th

²Lecturer, Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology North
Bangkok, Building 89, 1518 Pracharaj 1 Rd, Wong Sawang Area, Bangsue District,
Bangkok 10800, terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการจัดรูปแบบและจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางที่เหมาะสมกับ
สัดส่วนผู้ใช้บริการระบบ M-Flow ที่จะนำมาใช้ในอนาคต ควบคู่ไปกับระบบเดิม (MTC และ ETC)
ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค Aimsun ใน
การจำลองสภาพจราจร ณ ด้านเก็บค่าผ่านทางที่เป็นตัวแทน 3 แห่ง และกำหนดสถานการณ์
ทดสอบจาก 3 ตัวแปรหลัก ได้แก่ ตัวแปรสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ตัวแปรรูปแบบช่องเก็บ
ค่าผ่านทางพิเศษ และตัวแปรปริมาณจราจร โดยใช้ค่าความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทางเป็นตัวชี้วัด
ประสิทธิภาพการจราจร ผลการศึกษาพบว่า การกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ
มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow หากสัดส่วนผู้ใช้ต่ำ การจัดให้มีช่อง M-Flow
มากเกินไปจะทำให้การใช้ประโยชน์ช่องเก็บค่าผ่านทางไม่เต็มประสิทธิภาพและส่งผลกระทบต่อ

ช่องทางเดิมที่จำนวนช่องลดลง (MTC และ ETC) ในทางตรงกันข้าม หากสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow สูง แต่จำนวนช่องไม่เพียงพอ จะก่อให้เกิดความแออัดและความล่าช้าในการเดินทาง ดังนั้น การปรับเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ให้สอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาประสิทธิภาพโดยรวมของด่านเก็บค่าผ่านทาง งานวิจัยจึงได้เสนอหลักเกณฑ์ในการปรับเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ตามปริมาณจราจรรวมและสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ในแต่ละขนาดด่าน ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับด่านอื่น ๆ ของทางพิเศษศรีรัชได้ อาทิ ด่านพระราม 9 ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 60% ด่านบางซื่อ 2 ควรจัดให้มีช่อง M-Flow 1 และด่านอโศก 4 ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 28% และควรเพิ่มเป็น 3 ช่อง M-Flow เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกินกว่า 69% ผลลัพธ์นี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรักษาระดับการให้บริการและลดความล่าช้าในการเดินทางโดยรวมอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow, การจัดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ, ความจุด่าน

ABSTRACT

This research aims to determine the optimal toll lane configuration and number of toll lanes corresponding to the proportion of M-Flow users, integrated with existing systems (MTC and ETC), to maximize operational efficiency. The study employs the Aimsun microscopic traffic simulation model to simulate traffic conditions at three representative toll plazas, with test scenarios defined by three key variables: the proportion of M-Flow system users, the toll lane configuration layout, and the traffic volume. Average travel delay was utilized as the key performance indicator for traffic efficiency. The findings indicate that the determination of the optimal toll lane configuration is directly correlated with the M-Flow user proportion. If the user proportion is low, an excessive number of M-Flow lanes leads to underutilization and negatively impacts the capacity of the remaining conventional lanes. Conversely, if the M-Flow user proportion is high but the number of lanes is insufficient, it results in severe congestion and increased travel delay. The research concludes that incrementally adjusting the number of M-Flow lanes to correspond with the actual user proportion is a critical factor and proposes a criterion for this adjustment based on total traffic volume and the M-Flow user proportion for each plaza size. For instance, at Rama IX Toll Plaza, the number of M-Flow lanes should be increased from 1 to 2 when the M-Flow user proportion exceeds 60%. The Bang Sue 2 Toll Plaza should maintain 1 M-Flow lane, and the Asok 4 Toll Plaza

should increase M-Flow lanes from 1 to 2 when the proportion exceeds 28%, and further increase to 3 M-Flow lanes when the user proportion exceeds 69%. These results provide a practical guideline for optimizing toll lane configuration to effectively maintain the level of service and minimize overall travel delay.

KEYWORDS: M-Flow user proportion, toll lane configuration, toll plaza capacity

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงข่ายทางพิเศษในเขตกรุงเทพมหานครประสบปัญหาการจราจรติดขัด ซึ่งถือว่าเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข หนึ่งในปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทางคือ การจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทาง ซึ่งเกิดจากการชะลอตัวของรถเพื่อชำระค่าผ่านทาง ไม่ว่าจะเป็นระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC) หรือระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (ETC)

การทางพิเศษแห่งประเทศไทย (กทพ.) จึงมีนโยบายในการนำระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น หรือ ระบบ M-Flow มาประยุกต์ใช้กับทางพิเศษ โดยใช้เทคโนโลยีการตรวจจับและบันทึกภาพป้ายทะเบียนยานพาหนะ เพื่อให้ผู้ใช้ทางสามารถขับผ่านด่านได้โดยไม่ต้องหยุดหรือชะลอความเร็ว ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางได้

การนำระบบ M-Flow มาใช้ในการจัดเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษในเขตเมืองนั้นมีข้อจำกัดในด้านพื้นที่และลักษณะทางกายภาพ ทำให้ไม่สามารถขยายช่องทางเพิ่มเติมได้ จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนช่องเก็บค่าผ่านทางเดิมที่มีอยู่บางช่องให้เป็นระบบ M-Flow โดยยังคงระบบเก็บค่าผ่านทางเดิม (MTC และ ETC) ไว้ ซึ่งถือว่าเป็นประเด็นที่มีความท้าทายอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นการจัดรูปแบบที่มีลักษณะผสมผสาน (Mixed Mode) หากมีการจัดสรรช่องทาง M-Flow โดยไม่เหมาะสมและไม่สอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้บริการ อาจส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ระบบเดิมที่ต้องเผชิญกับจำนวนช่องทางที่ลดลง หรือทำให้การใช้ช่องทาง M-Flow ไม่เต็มประสิทธิภาพ และนำไปสู่ปัญหาความล่าช้าในการเดินทางโดยรวมที่รุนแรงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษที่เหมาะสมและสอดคล้องกับสัดส่วนผู้ใช้บริการระบบ M-Flow โดยมีความยืดหยุ่นต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรรวมและพฤติกรรมสัดส่วนการใช้ช่องทาง M-Flow เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบด่านเก็บค่าผ่านทางอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค (Microscopic Traffic Simulation) ในการจำลองสภาพจราจรบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษศรีรัชในปัจจุบัน

ปัจจุบันบนทางพิเศษศรีรัชมีระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษ 2 ระบบ ได้แก่

2.1.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (Manual Toll Collection, MTC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ใช้แรงงานของพนักงานปฏิบัติงาน โดยรถจะผ่านด่านเก็บค่าผ่านทางได้ต้องชะลอและหยุดเพื่อชำระค่าผ่านทางให้กับพนักงาน [1]

2.1.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection, ETC) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการบริหารจัดการเก็บค่าผ่านทาง โดยมีอุปกรณ์มาติดที่กระจกหน้ารถสำหรับใช้เป็นตัวส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณที่ติดตั้งในช่องเก็บค่าผ่านทางนั้น ๆ โดยระบบเก็บค่าผ่านทางนี้ไม่ต้องหยุดรถที่ช่องเก็บค่าผ่านทางเพียงแต่ชะลอความเร็ว [2]

2.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow)

ระบบ M-Flow เป็นการพัฒนาระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติระดับสูงด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลแบบ Video Tolling แทนการเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบระบบไม้กั้น ผู้ใช้บริการสามารถผ่านด่านได้สะดวก รวดเร็ว โดยอาศัยระบบการทำงานโดยการตรวจจับยานพาหนะ การอ่านป้ายทะเบียน รวมถึงการพัฒนาการตัดเงินค่าผ่านทาง [3] ระบบ M-Flow แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ

2.2.1 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (Single Lane Free Flow, SLFF) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ไม่มีการติดตั้งไม้กั้น (Barrier Gate) บริเวณช่องเก็บค่าผ่านทาง 1 ช่องทำให้ผู้ใช้ทางไม่ต้องชะลอความเร็วขณะผ่านช่องเก็บค่าผ่านทางเพื่อรอไม้กั้นเปิด

2.2.2 ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF) เป็นระบบเก็บค่าผ่านทางที่ติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการจัดเก็บค่าผ่านทางบนโครงเหล็กคร่อมช่องจราจร (Gantry) แบบหลายช่องทาง ทำให้ผู้ใช้ทางไม่ต้องชะลอความเร็ว สามารถขับขึ้นได้ตามความเร็วอิสระ

2.3 อัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทาง

ระบบเก็บค่าผ่านทางในแต่ละรูปแบบมีอัตราการให้บริการที่แตกต่างกัน โดยระบบ M-Flow ที่เป็นรูปแบบ Multi-Lane Free Flow มีอัตราการระบายรถสูงถึง 2,000 คัน/ชั่วโมง/ช่องจราจร ซึ่งสูงกว่าระบบ MTC ถึง 5 เท่า และสูงกว่าระบบ ETC ถึง 2.5 เท่า สะท้อนให้เห็นถึงขีดความสามารถของระบบ M-Flow ในการรองรับปริมาณจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทาง [3]

ระบบเก็บค่าผ่านทาง	อัตราการให้บริการ (คัน/ชม./ช่อง)
ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC)	400
ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (ETC)	800
ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (SLFF)	1,200
ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (MLFF)	2,000

2.4 การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมและการตัดสินใจเปลี่ยนแปลงไปใช้ระบบ M-Flow

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมผู้ใช้ทางพิเศษต่อการใช้งานระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ M-Flow บนโครงข่ายทางพิเศษ อาศัยข้อมูลแบบ Stated Preference (SP) นำไปสร้างแบบจำลองคาดการณ์ปริมาณผู้ใช้ระบบ M-Flow โดยอาศัยทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Theory) แล้วเก็บข้อมูลพฤติกรรมทางเลือกมาประมาณพารามิเตอร์ของฟังก์ชันอรรถประโยชน์ [4]

ตารางที่ 2 สัดส่วนการยึดติดกับระบบเก็บค่าผ่านทาง (Captive)

Captive	MTC	ETC
Captive to Cash/Easy Pass	7.3%	28.0%
Probability of choosing M-Flow	38.5%	24.1%
Non-captive	54.2%	47.9%

ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 2 กลุ่มผู้ใช้รถทั่วไปที่ชำระค่าผ่านทางด้วยระบบ MTC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow 38.5% ขณะที่กลุ่มผู้ใช้ระบบ ETC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow 24.1% จะเห็นได้ว่ากลุ่มผู้ใช้ระบบ MTC มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปใช้ระบบ M-Flow มากกว่ากลุ่มที่ใช้ ETC 14.4% เนื่องจากประหยัดเวลาในการผ่านด่านเก็บค่าผ่านทาง

2.5 การจำลองสภาพการจราจร

การวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Aimsun ในการจำลองสภาพจราจร สามารถจำลองในโครงข่ายถนนได้หลายรูปแบบ แบ่งแยกชนิดของยานพาหนะได้ โดยพฤติกรรมของยานพาหนะทุกคัน ในโครงข่ายถนนจะถูกจำลองอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาในการจำลอง มีพื้นฐานการจำลองมาจากทฤษฎีการเคลื่อนตัวตามกันของรถ (Car Following) การเปลี่ยนช่องจราจร (Lane Changing) และระยะระหว่างรถที่ยอมรับได้ (Gap Acceptance) [1]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2021 Panyim et al [3] ได้ศึกษาการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษเพื่อรองรับระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค Aimsun ในการวิเคราะห์ความเหมาะสมของการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษและผลกระทบด้านต่าง ๆ บริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจุดโชติ ทางพิเศษฉลองรัช ผลการศึกษาพบว่า ปัจจุบันควรจัดให้มีช่อง M-Flow จำนวน 2 ช่อง ซึ่งทำให้สภาพการจราจรหน้าด่านคล่องตัวมากที่สุด และควรเพิ่มช่อง M-Flow ที่ละ 1 ช่อง ภายหลังจากปีที่ 3 และปีที่ 7 หรือเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 59 และ 76 ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2021 Indee and Pitaksringkarn [1] ได้ทำการวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบผสมผสาน โดยพัฒนาแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม Vissim เพื่อศึกษาพฤติกรรมของยานพาหนะที่ใช้บริการทางพิเศษบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง (พื้นราบ) ในสภาพการจราจรปัจจุบัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ในปี พ.ศ. 2570 ควรมีระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษแบบ Multi-Lane Free Flow (MLFF) จำนวน 9 ช่องจราจร ตำแหน่งติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของระบบเก็บค่าผ่านทางพิเศษผสมผสานกับระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (MTC) จำนวน 2 ตู้ ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการและสามารถแก้ไขปัญหาจราจรได้

ในปี ค.ศ. 2022 Kreewong et al [5] ได้ศึกษาผลกระทบด้านการจราจรจากการเปิดให้บริการระบบจัดเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบไม่มีไม้กั้น (M-Flow) ด้านสุขาภิบาล 5-2 ทางพิเศษฉลองรัช โดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรในการประเมินสภาพการจราจรที่มีและไม่มีโครงการ M-Flow ผลการศึกษาพบว่า การเปิดให้บริการระบบ M-Flow ช่วยลดความล่าช้าได้มากกว่ากรณีที่ไม่มีโครงการ และเมื่อเปรียบเทียบค่าความล่าช้า พบว่า หากสัดส่วนผู้ใช้งานระบบ M-Flow เพิ่มขึ้น ความล่าช้าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำระบบ M-Flow มาใช้บนทางพิเศษ สามารถสรุปได้ว่าระบบดังกล่าวช่วยแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สภาพการจราจรคล่องตัวมากขึ้นและลดความล่าช้าในการเดินทางเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการใช้ระบบ M-Flow นอกจากนี้ ยังพบว่าสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดค่าความล่าช้าโดยรวมของด่านเก็บค่าผ่านทางได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมายังคงเป็นการวิเคราะห์เฉพาะรายด่านและสถานการณ์เฉพาะเจาะจง โดยกำหนดสถานการณ์ในการวิเคราะห์จากปริมาณจราจรและสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ณ ปัจจุบันและปีอนาคตที่คาดการณ์ไว้เท่านั้น จึงยังขาดการวิเคราะห์เปรียบเทียบในหลายระดับของปริมาณจราจรและสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่หลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อรองรับสถานการณ์การใช้งานที่แตกต่างกันได้ได้อย่างเหมาะสมในอนาคต

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาและการจัดกลุ่มด้านเก็บค่าผ่านทาง

การวิจัยนี้เลือกทางพิเศษศรีรัชเป็นพื้นที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษจำนวนมากถึง 32 ด่าน จึงไม่สามารถทำการวิเคราะห์เชิงลึกในทุกด่านได้โดยตรง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องจัดกลุ่มด่านที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน เพื่อคัดเลือกด่านตัวแทนมาทำการจำลองและประเมินผลด้วยแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค โดยมีหลักเกณฑ์ในการจัดกลุ่มและการคัดเลือกตัวแทนดังนี้

3.1.1 หลักเกณฑ์การจัดกลุ่มตามจำนวนช่องทาง

ใช้จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางเป็นตัวแปรในการแบ่งขนาดด่านเก็บค่าผ่านทางออกเป็น 3 รูปแบบ [6] ดังนี้

- 1) ด่านขนาดเล็ก ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางน้อยกว่า 5 ช่อง
- 2) ด่านขนาดกลาง ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางอยู่ระหว่าง 5-8 ช่อง
- 3) ด่านขนาดใหญ่ ซึ่งมีจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางมากกว่า 8 ช่อง

3.1.2 หลักเกณฑ์การคัดเลือกด่านตัวแทน

การคัดเลือกด่านตัวแทนสำหรับการศึกษานี้ ได้กำหนดให้เลือกด่านเก็บค่าผ่านทางที่มีรูปแบบทางเรขาคณิตของด่านเป็นรูปร่างตัว I (I-Shape) ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของด่านเก็บค่าผ่านทางบนทางพิเศษศรีรัช เพื่อให้ด่านที่นำมาศึกษาสามารถสะท้อนลักษณะทางกายภาพและรูปแบบการจัดช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านในกลุ่มเดียวกันได้อย่างเหมาะสม

จากการพิจารณาตามหลักเกณฑ์ข้างต้น ได้คัดเลือกด่านตัวแทนจำนวน 3 แห่ง เพื่อใช้ในการจำลองสภาพจราจรและประเมินผลบริเวณด่านเก็บค่าผ่านทาง ได้แก่ ด่านพระราม 9 (ด่านขนาดเล็ก) ด่านบางซื่อ 2 (ด่านขนาดกลาง) และด่านโอศุก 4 (ด่านขนาดใหญ่) โดยรูปที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพและตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านตัวอย่าง ซึ่งได้มาจากข้อมูลเชิงพื้นที่ของ Google Maps และถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างโครงข่ายถนนภายในแบบจำลองโดยอาศัยไฟล์ภาพถ่ายทางอากาศ (.jpeg) เป็นพื้นหลังสำหรับกำหนดจุดอ้างอิงและซ้อนทับเส้นทางให้สอดคล้องกับสภาพจริง



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทางของด่านตัวอย่าง

3.2 การศึกษาและรวบรวมข้อมูลภายในพื้นที่ศึกษา

3.2.1 ปริมาณจราจรปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลปริมาณจราจรที่ใช้ในการวิจัยนี้อ้างอิงจากฐานข้อมูลของบริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) โดยข้อมูลดังกล่าวจัดเก็บด้วยเทคโนโลยี Loop Detector บริเวณช่องเก็บค่าผ่านทาง ข้อมูลที่นำมาใช้เป็นปริมาณจราจรเฉลี่ยในช่วงเวลาเร่งด่วนของวันทำการ ประจำปี พ.ศ. 2566 ข้อมูลชุดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสภาพจราจร เพื่อให้แบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณจราจรปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ชื่อด่าน	เวลา	MTC	ETC	รวม	สัดส่วน ETC
พระราม 9	17.00-18.00 น.	684	1,198	1,882	64%
บางซื่อ 2	06.00-07.00 น.	473	930	1,403	66%
อโศก 4	07.00-08.00 น.	1,925	3,460	5,385	64%

3.2.2 จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลจำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านมีความสำคัญต่อการสร้างโครงข่ายถนนและการกำหนดสถานการณ์จำลอง เพื่อให้การวิเคราะห์มีความครอบคลุมสอดคล้องกับสภาพการจราจรที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทางและความจุด้านปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา

ชื่อด่าน	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง (ช่อง)			ความจุของด่าน (คัน/ชั่วโมง)		
	MTC	ETC	รวม	MTC	ETC	รวม
พระราม 9	2	2	4	800	1,600	2,400
บางซื่อ 2	4	2	6	1,600	1,600	3,200
อโศก 4	5	4	9	2,000	3,200	5,200

3.3 การกำหนดสถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์

กำหนดสถานการณ์เพื่อการวิเคราะห์จาก 3 ตัวแปร ได้แก่ สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ และปริมาณจราจร โดยด่านพระราม 9 จำลอง 140 สถานการณ์ ด่านบางซื่อ 2 จำลอง 275 สถานการณ์ และด่านอโศก 4 จำลอง 275 สถานการณ์

3.3.1 สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow

กำหนดสถานการณ์ทดสอบจากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% และ 90% เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ให้ครอบคลุมทุกช่วงของการเปลี่ยนผ่านของระบบ ผลการเปรียบเทียบค่าความล่าช้าในแต่ละสัดส่วนจะช่วยระบุช่วงสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่เหมาะสม (Optimal Range) ซึ่งทำให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางน้อยที่สุดสำหรับแต่ละรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทาง

3.3.2 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ

กำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษโดยวางตำแหน่งช่อง M-Flow ไว้ทางขวาสุดของด่านแทนที่ช่อง ETC เดิม เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่รถสามารถเดินทางผ่านได้ใกล้เคียงกับการไหลอย่างอิสระ (Free Flow) มีการตัดกระแสจราจรกับระบบเดิมบริเวณหน้าด่านน้อย และมีความปลอดภัยกับพนักงานเก็บค่าผ่านทางมากที่สุด [6] จากนั้นได้ทำการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ที่ละ 1 ช่อง โดยสลับแทนที่ช่อง MTC และ ETC เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการลดจำนวนช่องของแต่ละระบบต่อค่าความล่าช้าในการเดินทางโดยรวม

สำหรับลักษณะการประยุกต์ใช้ระบบ M-Flow จะพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของด่านเก็บค่าผ่านทาง โดยด่านพระราม 9 และด่านบางซื่อ 2 ใช้ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดียว (Single Lane Free Flow, SLFF) ส่วนด่านอโศก 4 ใช้ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF) ด้วย ทั้งนี้ ในกรณีที่ใช้ระบบ MLFF จะมีการลด

จำนวนช่องจราจรลง 1 ช่อง เพื่อปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของด่านให้มีความปลอดภัยมากขึ้น โดยรายละเอียดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษแสดงดังตารางที่ 5-7

ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษในตารางที่ 5-7 มีความหมายดังนี้

M_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบเงินสด (Manual Toll Collection, MTC)

E_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบอัตโนมัติ (Electronic Toll Collection, ETC)

SF_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบช่องทางเดี่ยว (Single Lane Free Flow, SLFF)

MF_n = ระบบเก็บค่าผ่านทางอัตโนมัติแบบหลายช่องทาง (Multi-Lane Free Flow, MLFF)

โดยที่ n หมายถึงหมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง

ตารางที่ 5 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านพระราม 9

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง			
		1	2	3	4
Existing	2MTC, 2ETC	M_1	M_2	E_3	E_4
Case 1	1M-Flow, 2MTC, 1ETC	M_1	M_2	E_3	SF_4
Case 2	1M-Flow, 1MTC, 2ETC	M_1	E_2	E_3	SF_4
Case 3	2M-Flow, 1MTC, 1ETC	M_1	E_2	SF_3	SF_4

ตารางที่ 6 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านบางซื่อ 2

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง					
		1	2	3	4	5	6
Existing	4MTC, 2ETC	M_1	M_2	M_3	M_4	E_5	E_6
Case 1	1M-Flow, 4MTC, 1ETC	M_1	M_2	M_3	M_4	E_5	SF_6
Case 2	1M-Flow, 3MTC, 2ETC	M_1	M_2	M_3	E_4	E_5	SF_6
Case 3	2M-Flow, 3MTC, 1ETC	M_1	M_2	M_3	E_4	SF_5	SF_6
Case 4	2M-Flow, 2MTC, 2ETC	M_1	M_2	E_3	E_4	SF_5	SF_6
Case 5	3M-Flow, 2MTC, 1ETC	M_1	M_2	E_3	SF_4	SF_5	SF_6
Case 6	3M-Flow, 1MTC, 2ETC	M_1	E_2	E_3	SF_4	SF_5	SF_6

ตารางที่ 7 รูปแบบช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษด่านอโศก 4

Types	จำนวนช่องเก็บค่าผ่านทาง	หมายเลขตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Existing	5MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉
Case 1	1M-Flow, 5MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	E ₆	E ₇	E ₈	SF ₉
Case 2	1M-Flow, 4MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	SF ₉
Case 3	2M-Flow, 3MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	M ₃	E ₄	E ₅	E ₆		MF ₈	MF ₉
Case 4	2M-Flow, 2MTC, 4ETC	M ₁	M ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆		MF ₈	MF ₉
Case 5	3M-Flow, 2MTC, 3ETC	M ₁	M ₂	E ₃	E ₄	E ₅		MF ₇	MF ₈	MF ₉
Case 6	3M-Flow, 1MTC, 4ETC	M ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅		MF ₇	MF ₈	MF ₉

3.3.3 ปริมาณจราจรที่ใช้ในแบบจำลอง

1) ปริมาณจราจรที่ใช้ในการทดสอบแบ่งตามความจุด้านในปัจจุบัน ได้แก่ 40%, 60%, 80%, 100% และ 120% ของความจุด้านแต่ละแห่ง การกำหนดช่วงปริมาณจราจรที่ครอบคลุมตั้งแต่ระดับต่ำกว่าความจุไปจนถึงสถานะเกินความจุ มีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) เพื่อให้สามารถกำหนดเกณฑ์การจัดสรรช่องทางที่มีความยืดหยุ่นและรองรับสถานะจราจรที่แตกต่างกันได้ ในตารางที่ 8 แสดงปริมาณจราจรที่ 100% ของความจุด้านปัจจุบัน โดยด่านพระราม 9 มีความจุ 2,400 คัน/ชั่วโมง ด่านบางซื่อ 2 มีความจุ 3,200 คัน/ชั่วโมง และด่านอโศก 4 มีความจุ 5,200 คัน/ชั่วโมง ส่วนปริมาณจราจร ณ ความจุอื่น ๆ คำนวณโดยใช้ตัวคูณ 0.4, 0.6, 0.8, 1.2 ตามลำดับ

2) กำหนดให้สัดส่วนผู้ใช้ระบบอัตโนมัติ (ETC) คงที่ โดยด่านพระราม 9 เท่ากับ 64%, ด่านบางซื่อ 2 เท่ากับ 66% และด่านอโศก 4 เท่ากับ 64% สัดส่วนดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณปริมาณจราจรเริ่มต้นในระบบ MTC และ ETC ก่อนที่จะมีการจำลองเปลี่ยนผู้ใช้งานบางส่วนไปสู่ระบบ M-Flow

3) การกำหนดปริมาณผู้ใช้ M-Flow สมมติฐานว่ามีที่มาจากผู้ใช้ระบบเงินสด (MTC) 62% และผู้ใช้ระบบอัตโนมัติ (ETC) 38% โดยอ้างอิงจากข้อมูลแนวโน้มพฤติกรรม การเปลี่ยนผ่านของผู้ใช้ที่สังเคราะห์ไว้ในบทบทวนวรรณกรรม ทั้งนี้ ยังคงเหลือปริมาณผู้ใช้ MTC ไม่น้อยกว่า 10% เพื่อสะท้อนสภาพการดำเนินงานจริงของด่านเก็บค่าผ่านทางที่ยังคงเปิดให้บริการระบบ MTC

ตารางที่ 8 ปริมาณจราจรที่ 100% ของความจุด้านในปัจจุบัน

%	ด้านพระราม 9			ด้านบางซื่อ 2			ด้านอโศก 4		
	M-Flow	MTC	ETC	M-Flow	MTC	ETC	M-Flow	MTC	ETC
10%	240	725	1,435	320	882	1,998	520	1,539	3,141
20%	480	577	1,343	640	685	1,875	1,040	1,219	2,941
30%	720	429	1,251	960	488	1,752	1,560	899	2,741
40%	960	282	1,158	1,280	292	1,628	2,080	580	2,540
50%	1,200	134	1,066	1,600	108	1,492	2,600	260	2,340
60%	1,440	87	873	1,920	108	1,172	3,120	186	1,894
70%	1,680	87	633	2,240	108	852	3,640	186	1,374
80%	1,920	87	393	2,560	108	532	4,160	186	854
90%	2,160	87	153	2,880	108	212	4,680	186	334

3.4 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

3.4.1 การเปรียบเทียบปริมาณจราจร

การเปรียบเทียบแบบจำลองเป็นกระบวนการปรับค่าตัวแปรบางตัวในแบบจำลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งโดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาประมวลผล และนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลหตุภูมิหรือข้อมูลสำรวจ

แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคจะทำการปรับเทียบโดยอาศัยเกณฑ์ที่อ้างอิงตามมาตรฐานของ Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) จากการคำนวณค่า GEH [7] ดังสมการที่ 1 เนื่องจากเป็นเกณฑ์ในการปรับเทียบแบบจำลองระดับจุลภาคที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในระดับสากล

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \quad (1)$$

โดยที่ M คือ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง และ C คือ ค่าอ้างอิงหรือข้อมูลสำรวจภาคสนาม

ในการสร้างแบบจำลองสภาพจราจร หากค่า GEH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 5.0 ถือว่าผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามอยู่ในเกณฑ์ดี สามารถใช้งานต่อไปได้ หากค่า GEH อยู่

ระหว่าง 5.0-10.0 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์พอใช้ ส่วนค่า GEH มากกว่า 10.0 แสดงว่าแบบจำลองไม่สอดคล้องกับข้อมูลจริงและต้องปรับเทียบเพิ่มเติม

ตารางที่ 9 การปรับค่าตัวแปรในแบบจำลอง

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด
Delay Metering: MTC	4.25 วินาที
Delay Metering: ETC	0.5 วินาที
Flow Metering: M-Flow, SLFF	1,200 คัน/ชั่วโมง
Flow Metering: M-Flow, MLFF	2,000 คัน/ชั่วโมง
รูปแบบการมาถึง	แบบไม่คงตัว (Exponential)

หลังจากดำเนินการปรับค่าตัวแปรภายในแบบจำลองดังตารางที่ 9 แล้วเสร็จ ได้นำผลลัพธ์มาคำนวณค่า GEH เพื่อประเมินความถูกต้องของอัตราการให้บริการของระบบเก็บค่าผ่านทางในแบบจำลองเทียบกับค่าอ้างอิงของ กทพ. ผลการปรับเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 10 พบว่าค่า GEH ของแต่ละระบบเก็บค่าผ่านทางมีค่าน้อยกว่า 5.0 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความแม่นยำ น่าเชื่อถือ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในขั้นตอนต่อไปได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบอัตราการให้บริการจากแบบจำลองและข้อมูลอ้างอิง

ระบบเก็บค่าผ่านทาง	อัตราการให้บริการ (คันต่อชั่วโมง)		GEH
	ค่าอ้างอิง	แบบจำลอง	
MTC	400	399	0.05
ETC	800	799	0.04
M-Flow (SLFF)	1,200	1,201	0.03
M-Flow (MLFF)	2,000	2,000	0.00

3.4.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ปริมาณจราจรต่อชั่วโมงในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าปริมาณจราจรผ่านด่านจริงใน ปี พ.ศ. 2566 ของแต่ละด่าน รายละเอียดผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ชื่อด่าน	ระบบเก็บค่าผ่านทาง	ปริมาณจราจร (คัน/ชั่วโมง)		GEH
		ค่าจริง	แบบจำลอง	
ด่านพระราม 9	MTC	684	701	0.63
	ETC	1,198	1,190	0.24
ด่านบางซื่อ 2	MTC	473	472	0.06
	ETC	930	896	1.14
ด่านอโศก 4	MTC	1,925	1,956	0.70
	ETC	3,460	3,428	0.55

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองชี้ให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ($GEH < 5.0$) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง Aimsun สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพระบบเก็บค่าผ่านทางได้

3.4.3 การเปรียบเทียบความยาวแถวคอย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเปรียบเทียบความยาวแถวคอยเฉพาะด่านที่มีปัญหาการจราจรเกินความจุ ได้แก่ ด่านอโศก 4 ซึ่งมีปริมาณจราจรชั่วโมงเร่งด่วน 5,385 คัน/ชั่วโมง หรือคิดเป็น 104% ของความจุด่านปัจจุบัน

เนื่องจากมีข้อจำกัดในการลงพื้นที่สำรวจภาคสนาม ผู้วิจัยจึงประยุกต์ใช้ข้อมูลจาก Google Maps โดยอ้างอิงเส้นสีแดงซึ่งแสดงถึงสภาพการจราจรที่มีความเร็วต่ำในช่วงเวลาเร่งด่วน (07.00-08.00 น.) ดังรูปที่ 2 (ก) ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนถึงความหนาแน่นของการจราจรและถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบตำแหน่งท้ายแถวว่ามีความยาวไปถึงจุดใด จากนั้นจึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองของแบบจำลอง Aimsun โดยพิจารณาตำแหน่งท้ายแถวว่าใกล้เคียงกันหรือไม่ หากพบว่ายังไม่สอดคล้องกัน จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น อัตราการให้บริการ เวลาตอบสนองของผู้ขับฯ และระยะทางการรับรู้ของผู้ขับฯ จนกว่าแบบจำลองจะแสดงความยาวแถวคอยใกล้เคียงกับสภาพจริงมากที่สุด

ผลการเปรียบเทียบความยาวแถวคอย พบว่าความยาวของแถวคอยที่ได้จากแบบจำลอง ดังรูปที่ 2 (ข) มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจาก Google Maps ซึ่งสะท้อนสภาพการจราจรจริงในช่วงเวลาที่ศึกษา และมีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สภาพจราจรบริเวณด่านอโศก 4 ต่อไปได้



(ก) ความยาวแนวคอคอยจาก Google Maps



(ข) ความยาวแนวคอคอยภายในแบบจำลอง

รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบความยาวแนวคอคอย

4. ผลการศึกษาวิจัย

ผลลัพธ์จากแบบจำลองสภาพจราจรถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทางและสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการจัดช่องเก็บค่าผ่านทางพิเศษ โดยค่าความล่าช้าเฉลี่ยในแต่ละสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ได้จากผลการจำลองสภาพจราจรในแต่ละกรณี ส่วนการประมาณหาจุดตัดของกราฟความล่าช้า ซึ่งเป็นจุดที่แสดงสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ที่เหมาะสมต่อการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ใช้วิธีการประมาณค่าระหว่างจุด (Linear Interpolation)

ผลการศึกษาของด้านเก็บค่าผ่านทางทั้ง 3 ขนาด พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อปริมาณจราจรรวมเพิ่มสูงขึ้น สัดส่วนของผู้ใช้ระบบ M-Flow จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความล่าช้าเฉลี่ยในการเดินทาง โดยเมื่อสัดส่วนของผู้ใช้ระบบ M-Flow เพิ่มขึ้น ค่าความล่าช้าเฉลี่ยจะมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม หากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow สูงเกินกว่าระดับที่เหมาะสม จะทำให้เกิดความหนาแน่นบริเวณช่องทาง M-Flow และก่อให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงควรพิจารณาการปรับเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow ให้เหมาะสมกับปริมาณผู้ใช้ในแต่ละช่วง

สำหรับการจัดสรรช่องทาง M-Flow พบว่า ในกรณีที่ปริมาณจราจรรวมอยู่ในระดับต่ำประมาณ 40% ของความจุด้าน ด้านขนาดเล็กและด้านขนาดกลางสามารถจัดให้มีช่องทาง M-Flow เพียง 1 ช่อง ก็เพียงพอต่อการรองรับการใช้งาน ขณะที่ด้านขนาดใหญ่จำเป็นต้องมีช่องทาง M-Flow จำนวน 2 ช่อง เนื่องจากมีปริมาณจราจรสูงกว่า และเมื่อพิจารณาที่ระดับปริมาณจราจรสูงขึ้น 100% ของความจุด้าน พบว่า ด้านขนาดเล็กควรจัดสรรช่องทาง M-Flow จำนวน 1-2 ช่อง ส่วนด้านขนาดกลางและด้านขนาดใหญ่ควรจัดสรรช่องทาง M-Flow จำนวน 1-3 ช่อง โดยด้านขนาดใหญ่ซึ่งรองรับปริมาณจราจรจำนวนมาก จำเป็นต้องเพิ่มช่องทาง M-Flow ตั้งแต่สัดส่วนผู้ใช้ระบบยังอยู่ในระดับต่ำ

4.1 ผลการศึกษาของด้านพระราม 9 (ด้านขนาดเล็ก)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3

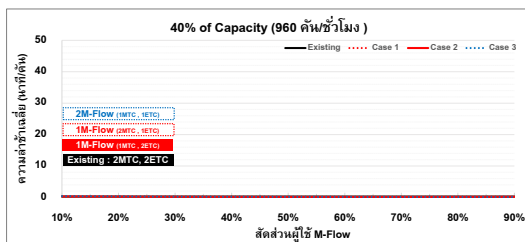
4.1.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (960 คัน/ชม.) พบว่าการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง เนื่องจากปริมาณจราจรค่อนข้างน้อย

4.1.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,440 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 80% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

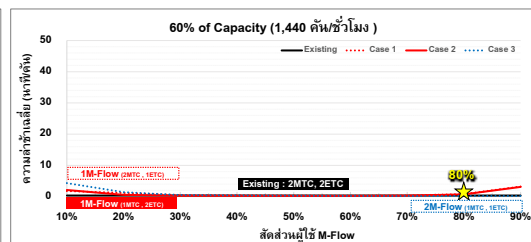
4.1.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,920 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 60% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

4.1.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,400 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 56% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 56% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)

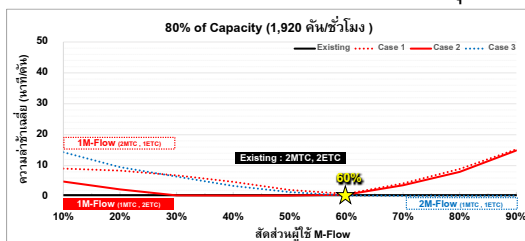
4.1.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,880 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 55% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (1MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow เกินกว่า 55% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (1MTC, 1ETC)



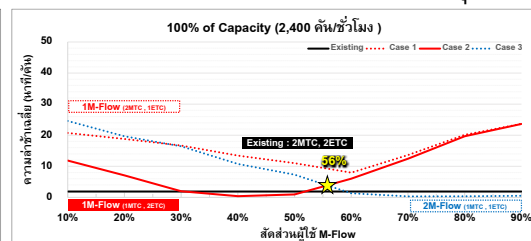
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ

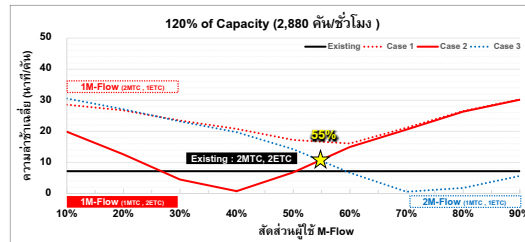


(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านพระราม 9



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านพระราม 9 (ต่อ)

4.2 ผลการศึกษาของด้านบางข้อ 2 (ด้านขนาดกลาง)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4

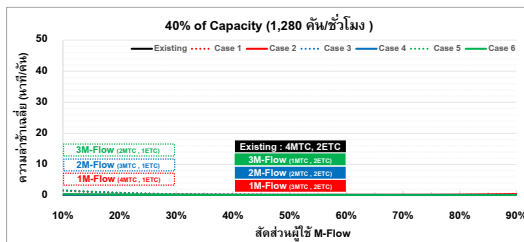
4.2.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,280 คัน/ชม.) พบว่ารูปแบบการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง Case 2, Case 4, Case 6 ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.2.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (1,920 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

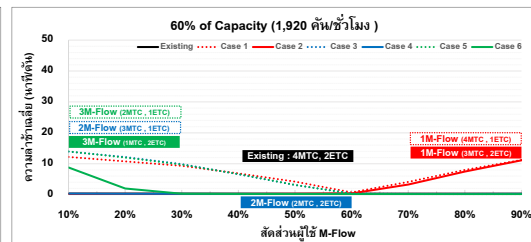
4.2.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,560 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 40% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 40% - 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 80% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)

4.2.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,200 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 30% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 30% - 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 60% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)

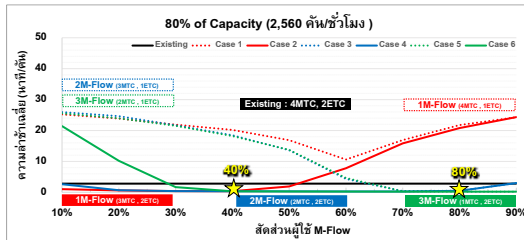
4.2.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,840 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 30% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (3MTC, 2ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 30% - 50% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 2ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 50% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 2ETC)



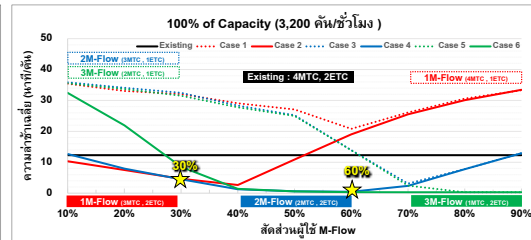
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



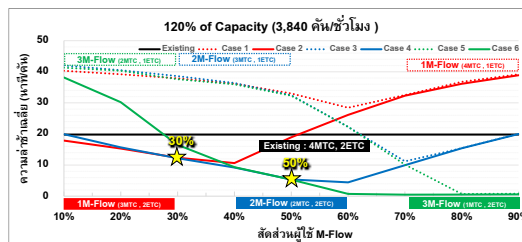
(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ



(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านบางซื่อ 2

4.3 ผลการศึกษาของด้านไฮสโคก 4 (ด้านขนาดใหญ่)

ผลการศึกษาภายใต้ปริมาณจราจรที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นว่าการกำหนดจำนวนช่อง M-Flow ที่เหมาะสม รวมถึงสัดส่วนของผู้ใช้ที่ควรพิจารณาในการเพิ่มจำนวนช่อง M-Flow มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 5

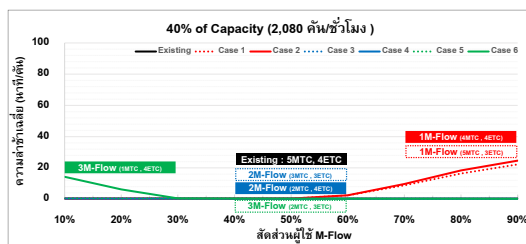
4.3.1 กรณีปริมาณจราจร 40% ของความจุด้านปัจจุบัน (2,080 คัน/ชม.) พบว่ารูปแบบการจัดตำแหน่งช่องเก็บค่าผ่านทาง Case 3, Case 4, Case 5 ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.3.2 กรณีปริมาณจราจร 60% ของความจุด้านปัจจุบัน (3,120 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (3MTC, 3ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

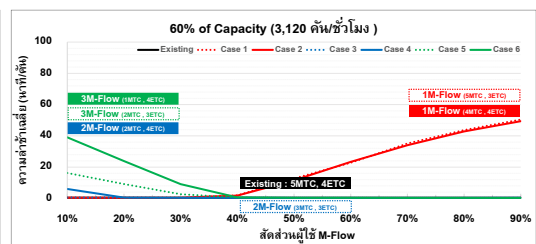
4.3.3 กรณีปริมาณจราจร 80% ของความจุด้านปัจจุบัน (4,160 คัน/ชม.) พบว่าควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 2 ช่อง (3MTC, 3ETC) จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการเดินทาง

4.3.4 กรณีปริมาณจราจร 100% ของความจุด้านปัจจุบัน (5,200 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 28% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (4MTC, 4ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 28% - 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 4ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 4ETC)

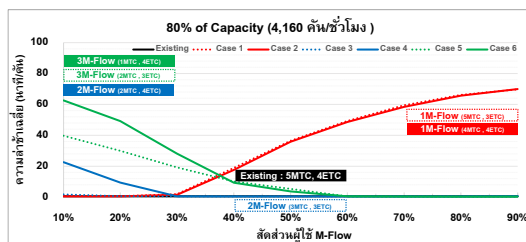
4.3.5 กรณีปริมาณจราจร 120% ของความจุด้านปัจจุบัน (6,240 คัน/ชม.) พบว่าหากสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow น้อยกว่า 28% ควรจัดให้มีช่องทาง M-Flow 1 ช่อง (4MTC, 4ETC) เมื่อสัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow อยู่ระหว่าง 28% - 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 2 ช่อง (2MTC, 4ETC) และเมื่อสัดส่วนเพิ่มขึ้นเกินกว่า 69% ควรเพิ่มช่องทาง M-Flow เป็น 3 ช่อง (1MTC, 4ETC)



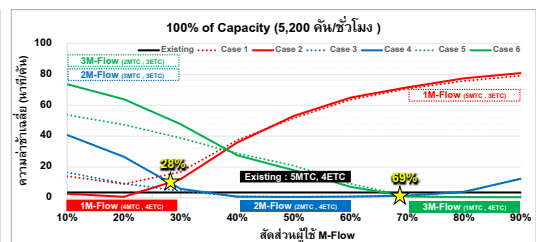
(ก) ปริมาณจราจร 40% ของความจุ



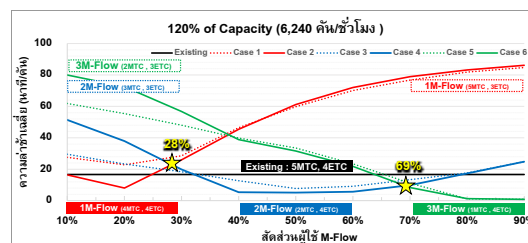
(ข) ปริมาณจราจร 60% ของความจุ



(ค) ปริมาณจราจร 80% ของความจุ



(ง) ปริมาณจราจร 100% ของความจุ



(จ) ปริมาณจราจร 120% ของความจุ

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนช่อง M-Flow และสัดส่วนผู้ใช้ M-Flow ด้านโศก 4

5. สรุปผล

ผลการศึกษาของด้านตัวแทนสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อรองรับระบบ M-Flow ของด้านอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้ โดยเริ่มจากการจำแนกว่าด้านเป้าหมายอยู่ในกลุ่มขนาดเล็ก ขนาดกลาง หรือขนาดใหญ่ จากนั้นพิจารณาปริมาณจราจรรวมในปัจจุบัน เมื่อทราบทั้งขนาดของด้านและปริมาณการจราจรแล้ว จะสามารถกำหนดรูปแบบและจำนวนช่องทาง M-Flow ที่เหมาะสม รวมทั้งระบุเกณฑ์สัดส่วนผู้ใช้ระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มจำนวนช่องทางได้

สำหรับแนวทางการประยุกต์ใช้ เช่น ด้านพระราม 9 ซึ่งมีปริมาณจราจร 1,882 คัน/ชั่วโมง (78% ของความจุด้าน) ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 60% ขณะที่ด้านบางซื่อ 2 ซึ่งมีปริมาณจราจร 1,403 คัน/ชั่วโมง (44% ของความจุด้าน) ควรจัดให้มีช่อง M-Flow จำนวน 1 ช่อง พร้อมคงช่อง ETC ไว้ 2 ช่อง เพื่อรองรับผู้ใช้ระบบเดิม ส่วนด้านอโศก 4 ซึ่งมีปริมาณจราจร 5,385 คัน/ชั่วโมง (104% ของความจุด้าน) ควรเพิ่มช่อง M-Flow จาก 1 เป็น 2 ช่อง เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกิน 28% และควรเพิ่มเป็น 3 ช่อง M-Flow เมื่อสัดส่วนผู้ใช้เกินกว่า 69%

อย่างไรก็ตาม การดำเนินการเพิ่มระบบ M-Flow ควรพิจารณาด้านงบประมาณในการติดตั้ง และบำรุงรักษาระบบควบคู่กับการประเมินพฤติกรรมของผู้ใช้ทางพิเศษ เนื่องจากหากผู้ใช้อย่างไม่ปรับตัวมาใช้ระบบใหม่มากนัก อาจส่งผลต่อความคุ้มค่าของการลงทุน ดังนั้น การจัดสรรช่องทาง M-Flow ควรศึกษาข้อมูลพฤติกรรมผู้ใช้ทางที่คาดว่าจะมาใช้ระบบ M-Flow ของแต่ละด้านร่วมด้วย เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนสภาพการใช้งานจริงได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

5.1 ด้านขนาดเล็ก

ด้านขนาดเล็ก (ช่องเก็บค่าผ่านทาง < 5 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-2 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดเล็ก

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
960	-	1 ช่อง
1,440	มากกว่า 1,152 (M-Flow 80%)	2 ช่อง
1,920	มากกว่า 1,152 (M-Flow 60%)	2 ช่อง
2,400	มากกว่า 1,344 (M-Flow 56%)	2 ช่อง
2,880	มากกว่า 1,584 (M-Flow 55%)	2 ช่อง

5.2 ด้านขนาดกลาง

ด้านขนาดกลาง (ช่องเก็บค่าผ่านทาง 5-8 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-3 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดกลาง

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
1,280	-	1 ช่อง
1,920	-	2 ช่อง
2,560	ระหว่าง 1,024 - 2,048 (M-Flow 40% - 80%) มากกว่า 2,048 (M-Flow 80%)	2 ช่อง 3 ช่อง
3,200	ระหว่าง 960 - 1,920 (M-Flow 30% - 60%) มากกว่า 1,920 (M-Flow 60%)	2 ช่อง 3 ช่อง
3,840	ระหว่าง 1,152 - 1,920 (M-Flow 30% - 50%) มากกว่า 1,920 (M-Flow 50%)	2 ช่อง 3 ช่อง

5.3 ด้านขนาดใหญ่

ด้านขนาดใหญ่ (ช่องเก็บค่าผ่านทาง > 8 ช่อง) จะพิจารณาใช้ช่องทาง M-Flow 1-3 ช่อง โดยใช้ปริมาณจราจรระบบ M-Flow เป็นเกณฑ์ในการเพิ่มจำนวนช่องทาง ซึ่งสรุปผลไว้ในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 เกณฑ์การเพิ่มจำนวนช่องทาง M-Flow สำหรับด้านขนาดใหญ่

ปริมาณจราจรรวม ทุกระบบ (คัน/ชม.)	เกณฑ์ปริมาณจราจรระบบ M-Flow ที่ควรเพิ่มช่องทาง (คัน/ชม.)	จำนวนช่อง M-Flow
2,080	-	2 ช่อง
3,120	-	2 ช่อง
4,160	-	2 ช่อง
5,200	ระหว่าง 1,456 - 3,588 (M-Flow 28% - 69%) มากกว่า 3,588 (M-Flow 69%)	2 ช่อง 3 ช่อง
6,240	ระหว่าง 1,747 - 4,306 (M-Flow 28% - 69%) มากกว่า 4,306 (M-Flow 69%)	2 ช่อง 3 ช่อง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัททางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพจำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนการสนับสนุนเครื่องมือและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างยิ่ง

References

- [1] Indee T, Pitaksringkarn J. Analyzing a mixed toll collection system using traffic microsimulation models: a case study of Din Daeng toll plaza. KMITL Engineering Journal 2021;38(1):1–14. (In Thai)
- [2] Su-angka K. The traffic evaluation of electronic toll collection system design in Thailand [Internet]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2013 [cited 2023 Jul 24]. Available from: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/4613>. (In Thai)
- [3] Punyim P, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. Toll lane configuration for M-Flow electronic toll collection system. Proceedings of the 26th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2021 Jun 23–25; Rayong, Thailand. p. TRL-03-1-8. (In Thai)
- [4] Srisuwan S, Klomranok T, Kreewong T, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. A study on changes in expressway user behavior for the use of the multi-lane free flow (M-Flow) toll system on the expressway network. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL-39-1-8. (In Thai)
- [5] Kreewong T, Klomranok T, Srisuwan S, Panyachaiwattanakul S, Rattanapanyakorn T. A study of the traffic impact on the opening of multi-lane free flow (M-Flow) on the Chalong Rat Expressway. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL22-1–8. (In Thai)
- [6] Klomranok T, Kreewong T, Srisuwan S, Pitakpanich N, Rattanapanyakorn T. Grouping factors and physical design concepts of toll plazas for supporting the multi-lane free flow (M-Flow) toll system on the Chalong Rat Expressway. Proceedings of the 27th National Convention on Civil Engineering (NCCE); 2022 Aug 24–26; Chiang Rai, Thailand. p. TRL11-1–9. (In Thai)

- [7] The Highways Agency. Design manual for roads and bridges. volume 12 traffic appraisal of roads schemes. section 2 traffic appraisal advice. part 1 traffic appraisal in urban areas [internet]. Birmingham, UK: The Highways Agency; 1996 [cited 2024 Oct 25]. Available from: <https://assets.highwaysengland.co.uk/roads/road-projects/a2-bean-ebbsfleet-junction-improvements/Orders/I.8+DMRB+Part+1+Traffic+Appraisal.pdf>.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นริศรา วิเศษทอง นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: s6401081856080@email.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมจราจรและวางแผนการขนส่ง



รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: การขนส่งในเขตเมืองและการขนส่งสินค้า

Article History:

Received: August 19, 2025

Revised: December 3, 2025

Accepted: December 4, 2025

การพัฒนาจิกเทมเพลตเพื่อลดระยะเวลาการติดตั้ง MIRROR และ LED DEVELOPMENT OF A JIG TEMPLATE TO REDUCE INTALLTION TIME FOR MIRROR AND LED INSTALLATION PROCESSES

ศุภลักษณ์ สุวรรณ¹ และ รัตติกาล บำรุงนา²

¹อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ 169 หมู่ 3 ตำบลหนองแก้ว อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ 50230,
supaluck@northcm.ac.th

²นักศึกษา, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่ 169 หมู่ 3 ตำบลหนองแก้ว อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ 50230,
b661102030@northcm.ac.th

Supaluck Suwan¹ and Rattikan Bumrungra²

¹Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
North-Chiang Mai University, supaluck@northcm.ac.th

²Student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
North-Chiang Mai University, b661102030@northcm.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาจิกเทมเพลตสำหรับการติดตั้ง Mirror และ LED และมุ่งเน้นการลดระยะเวลาในกระบวนการติดตั้ง โดยประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) ในการปรับปรุงขั้นตอนการทำงานให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า จำนวนขั้นตอนลดลงจาก 15 ขั้นตอน เหลือเพียง 9 ขั้นตอน และระยะเวลาในการติดตั้งลดลงจาก 426.62 วินาที เหลือ 200.03 วินาที คิดเป็นการลดลงของเวลา 226.59 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 53.11 แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาจิกเทมเพลตร่วมกับการประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS สามารถลดความซับซ้อนของกระบวนการ เพิ่มความแม่นยำและลดต้นทุนด้านเวลาได้ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตโดยรวม

คำสำคัญ: เทคนิค ECRS, จิกเทมเพลต, Mirror และ LED

ABSTRACT

This research aims to develop a jig template for the installation of mirrors and LED components, with a focus on reducing installation time. The improvement process incorporates ECRS technique (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) to optimize workflow steps for greater efficiency and suitability. A comparative analysis of the installation process before and after the implementation revealed a reduction in the number of steps from 15 to 9, representing a 40% decrease. Furthermore, the total installation time was significantly reduced from 426.62 seconds to 200.03 seconds, yielding a time savings of 226.59 seconds or 53.11%. The results demonstrate that integrating jig template design with the ECRS approach effectively minimizes procedural complexity and operational time, thereby improving production efficiency and reducing time-related costs in manufacturing operations.

KEYWORDS: ECRS Technique, Template Jig, Mirror and LED

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมยุคใหม่ ประสิทธิภาพของขั้นตอนการประกอบชิ้นงานมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตและการลดต้นทุน โดยเฉพาะการติดตั้งชิ้นส่วน เช่น Mirror และ LED ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำและความสม่ำเสมอในการทำงาน โดยเฉพาะในสายการผลิตที่มีปริมาณมาก อย่างไรก็ตาม การกำหนดตำแหน่งและการจัดวางด้วยมือมักใช้เวลานานและมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้นำหลักการของการจัดการแบบลีน (Lean Management) ร่วมกับเทคนิค ECRS ซึ่งประกอบด้วย การกำจัด (Eliminate) การรวมขั้นตอน (Combine) การจัดเรียงใหม่ (Rearrange) และการทำให้ง่ายขึ้น (Simplify) มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการติดตั้ง โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำ ลดระยะเวลาในการติดตั้ง และลดข้อผิดพลาดจากการปฏิบัติงานของคน [1-3] งานวิจัยของ Díaz-Reza et al [3] ได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิค ECRS มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่า งานวิจัยนี้จึงต่อยอดจากแนวคิดดังกล่าว โดยนำไปประยุกต์ใช้กับการติดตั้ง Mirror และ LED เพื่อพัฒนาเครื่องมือที่สามารถใช้งานได้จริงในงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาจิ๊กเทมเพลตเพื่อช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการติดตั้ง Mirror และ LED ของบริษัท แอร์ คิว-ซี จำกัด

ในปัจจุบัน การดำเนินงานในโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและลดระยะเวลาในการทำงาน [4] เพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิต [5, 6]

จิ๊กเทมเพลตจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในการผลิตชิ้นงาน เนื่องจากช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความสม่ำเสมอ และประสิทธิภาพในการทำงาน ส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง [7] กระบวนการติดตั้ง Mirror และ LED ของบริษัท แอร์ คิว-ซี จำกัด เป็นงานที่ต้องมีการกำหนดตำแหน่งก่อนการติดตั้ง ซึ่งหากไม่มีอุปกรณ์ช่วยในการกำหนดตำแหน่ง จะส่งผลให้เกิดความล่าช้าในขั้นตอนการติดตั้ง และเกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงาน ทำให้เสียเวลาในการปรับแก้และลดประสิทธิภาพในการทำงาน [8, 9]

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการพัฒนาและสร้างจิ๊กเทมเพลตสำหรับช่วยในกำหนดจุดของการติดตั้ง Mirror และ LED เพื่อช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตและเพิ่มความเที่ยงตรงของตำแหน่งติดตั้ง ซึ่งจะส่งผลให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อพัฒนาจิ๊กเทมเพลตสำหรับการติดตั้ง Mirror และ LED

2.2 เพื่อลดระยะเวลาในการติดตั้ง Mirror และ LED

3. ระเบียบการวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมีการพัฒนาอุปกรณ์จิ๊กเทมเพลต เพื่อใช้ในการติดตั้ง Mirror และ LED จากนั้นเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังการใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าว โดยใช้แนวคิดการจัดการแบบลีน (Lean Management) และเทคนิค ECRS เป็นกรอบในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน [7, 8]

3.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้คือ พนักงานฝ่ายผลิตของบริษัท แอร์ คิว-ซี จำกัด ที่มีหน้าที่ในการติดตั้ง Mirror และ LED โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง 10 คน (จากพนักงานทั้งหมด 10 คน) ซึ่งพนักงานทุกคนมีประสบการณ์ในการติดตั้งไม่น้อยกว่า 5 ปี เพื่อเข้าร่วมการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุง

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

จิ๊กเทมเพลตที่ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการติดตั้ง Mirror และ LED และแบบบันทึกเวลาในการทำงาน (Time Study Sheet)

3.4 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ **ข้อมูลเชิงปริมาณ** เก็บจากการจับเวลาในการติดตั้ง Mirror และ LED ก่อนและหลังการใช้จิ๊กเทมเพลต **ข้อมูลเชิงคุณภาพ** เก็บจากการสัมภาษณ์หรือสอบถามความคิดเห็นของพนักงานเกี่ยวกับความสะดวก ความแม่นยำและประสิทธิภาพในการทำงานหลังการใช้จิ๊กเทมเพลต

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบระยะเวลาในการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุงเพื่อประเมินผลของการใช้จิ๊กเทมเพลตและเทคนิค ECRS ในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

4. ผลการวิจัย

4.1 การจับเวลาในแต่ละขั้นตอนของการติดตั้ง Mirror และ LED ก่อนปรับปรุงจำนวน 20 รอบ กลุ่มตัวอย่าง 10 คน เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 426.62 วินาที โดยแต่ละขั้นตอนสามารถสร้างเป็นแผนภูมิกระบวนการไหลได้ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 6 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งจนถึงวางชิ้นงานมีเวลารวม 269.98 นาที และมีขั้นตอนที่สามารถนำมารวมกันได้เพื่อลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน ผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดการจัดการลีน (Lean) ด้วยวิธี ECRS ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นการลดความสูญเปล่าและเพิ่มคุณค่าให้กับกิจกรรมที่จำเป็นในกระบวนการผลิตหรือบริการ [10] การดำเนินการแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

4.1.1 Eliminate กำจัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น

ผลวิเคราะห์: ขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น คือ ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนที่ 4 และ ขั้นตอนที่ 10

การปรับปรุง: ให้เตรียม Alu Profile ไว้พื้นที่เดิม โดยสามารถกำหนดตำแหน่งได้ปกติ ระหว่างกำหนดตำแหน่งจะตรวจสอบไปที่ละตำแหน่ง และตรวจอีกครั้งหลังขันโบลต์เรียบร้อยแล้ว ทำความสะอาดหลังประกอบเสร็จสมบูรณ์ในครั้งเดียวก่อนจัดเก็บชิ้นงาน

4.1.2 Combine รวมขั้นตอนการทำงานที่สามารถทำร่วมกันได้

ผลวิเคราะห์: ขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อน คือ ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3, ขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6, ขั้นตอนที่ 9 และขั้นตอนที่ 10

การปรับปรุง: รวมขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 เข้าด้วยกัน ขั้นตอนที่ 5 และขั้นตอนที่ 6 เข้าด้วยกัน ขั้นตอนที่ 9 และขั้นตอนที่ 10 เข้าด้วยกัน

ตารางที่ 1 แผนภูมิกระบวนการไหลก่อนปรับปรุง

Flow Process Chart								
ชื่อกระบวนการ (Subject Process) : ติดตั้ง Mirror & LED								
ฝ่าย (Department) : Assembly				สถานะ (Method) : ก่อนปรับปรุง				
ขั้นตอน	กิจกรรม	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์				
1	เตรียมวัสดุอุปกรณ์	0	8.71	●	⇒	D	□	▽
2	นำ Alu Profile วางบนแท่น	0.5	11.92	○	⇒	D	□	▽
3	กำหนดตำแหน่งติดตั้ง Mirror และ LED	0	120.06	●	⇒	D	□	▽
4	ตรวจสอบตำแหน่งที่ตาม Drawing	0	9.84	○	⇒	D	■	▽
5	ปรับแก้ตำแหน่งหลัก (+/-1 mm.)	0	59.76	●	⇒	D	□	▽
6	ติดตั้ง Mirror & LED ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้	0	80.32	●	⇒	D	□	▽
7	ใส่แหวนและขันโบลต์ M8 48 ตัว	0	20.34	●	⇒	D	□	▽
8	ขันโบลต์ด้วยแรงบิด 60 Nm 48 ตัว	0	13.77	●	⇒	D	□	▽
9	ตรวจสอบการขันโบลต์ด้วยแรงบิด 48 ตัว	0	10.04	○	⇒	D	■	▽
10	ทำความสะอาด Alu Profile	0	5.11	●	⇒	D	□	▽
11	ยกทั้งชุดติดตั้งกับ Main Frame	1	15.09	○	⇒	D	□	▽
12	ใส่แหวนและขันโบลต์ M8 48 ตัว ติดกับ Main Frame	0	20.14	●	⇒	D	□	▽
13	ขันโบลต์ด้วยแรงบิด 60 Nm 48 ตัว	0	13.2	●	⇒	D	□	▽
14	ทำความสะอาดชิ้นงาน	0	7.13	●	⇒	D	□	▽
15	จัดเก็บชิ้นงาน	0	31.19	○	⇒	D	□	▼
รวม		1.5	426.62	10	2	0	2	1

4.1.3 Rearrange ปรับเปลี่ยนลำดับขั้นตอนการทำงานเพื่อให้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

ผลวิเคราะห์: หลังใช้ Eliminate และ Combine แล้วยังไม่พบขั้นตอนที่ต้องปรับเปลี่ยนใหม่

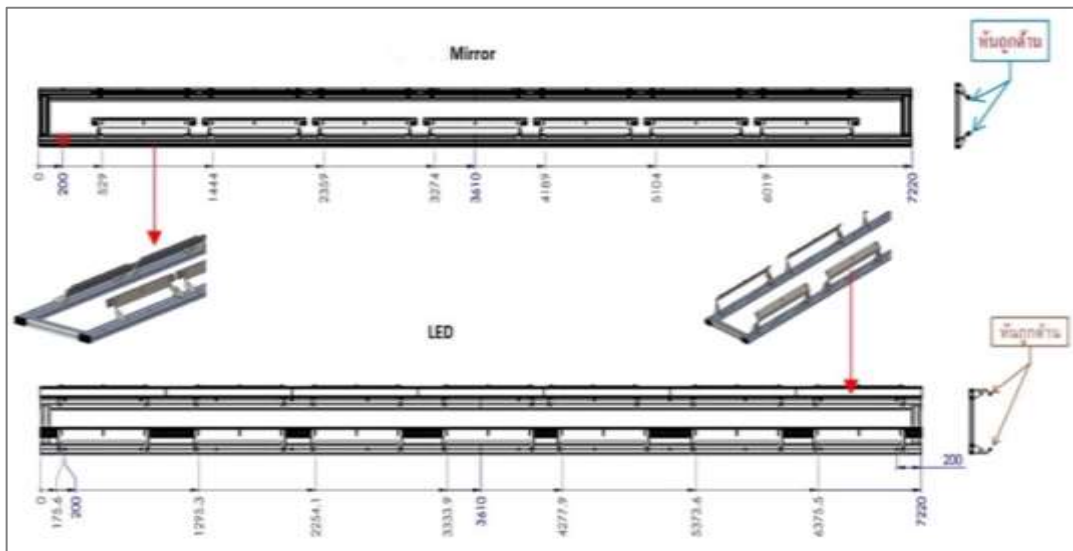
การปรับปรุง: ไม่มี

4.1.4 Simplify ลดความซับซ้อนของกระบวนการ โดยใช้เครื่องมือหรือเทคโนโลยีที่ช่วยให้การทำงานง่ายขึ้น

ผลวิเคราะห์: ขั้นตอนที่ 3 ถึงขั้นตอนที่ 6 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งจนถึงวางชิ้นงานมีเวลารวม 269.98 นาที

การปรับปรุง: พัฒนาจิ๊กเทมเพลตสำหรับการติดตั้ง Mirror และ LED

4.2 การพัฒนาจิ๊กเทมเพลตสำหรับการติดตั้ง Mirror และ LED ศึกษาตำแหน่งและระยะการติดตั้ง Mirror และ LED ดังรูปที่ 1



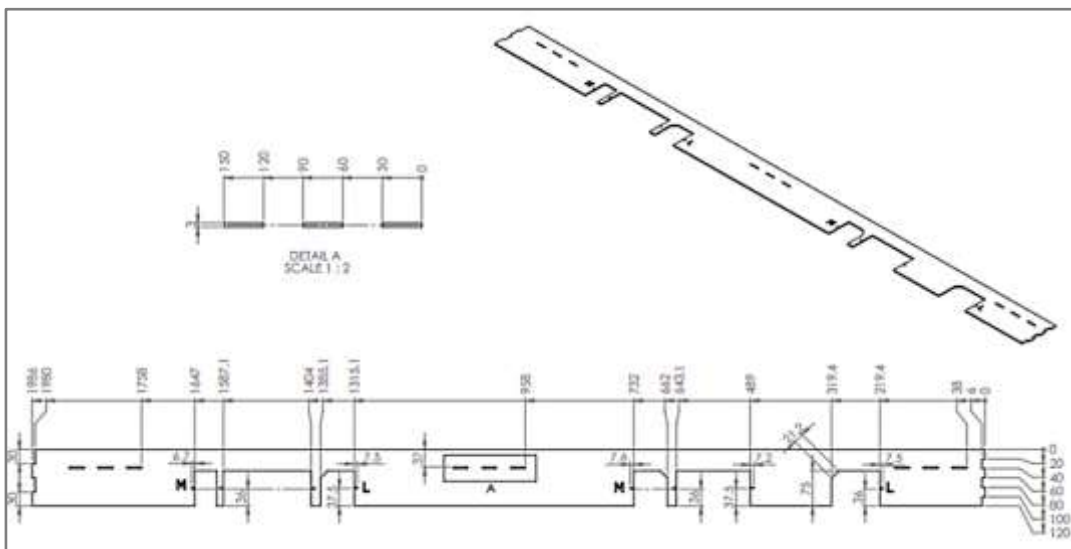
รูปที่ 1 ตำแหน่งและระยะการติดตั้ง Mirror & LED

จากรูปที่ 1 พบว่าการนำ Mirror และ LED ติดตั้งบน Alu Profile มีลักษณะวางเรียงกันเป็นแนวยาว หันหน้าเข้าหากัน แต่ตำแหน่งของ Mirror และ LED จะวางสลับกันเป็นฟันปลา เมื่อ Mirror และ LED ถูกวางในตำแหน่งที่ถูกต้องตามตำแหน่งที่กำหนดแล้ว ทำการพัฒนาจิ๊กเทมเพลตเพื่อไม่ให้ Mirror และ LED นั้นเคลื่อนที่ผิดไปจากตำแหน่งที่กำหนด

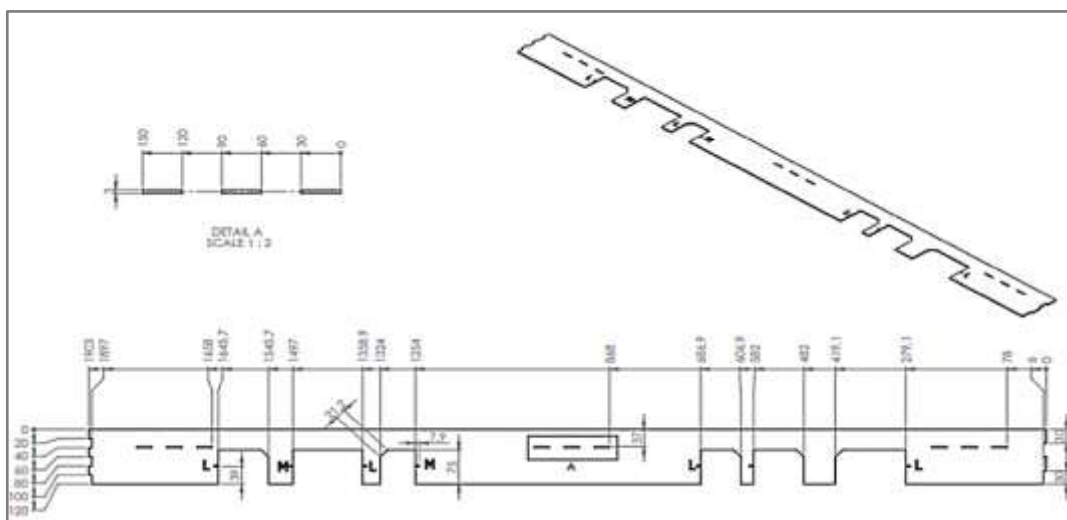
จิ๊กเทมเพลตที่ออกแบบจะมีจำนวน 3 ชั้น เพื่อไม่ให้จิ๊กมีขนาดที่ยาวเกินไปและน้ำหนักมากเกินไป เพราะอาจทำให้ยากต่อการใช้งาน การจัดเก็บและอาจเกิดอันตรายได้ ลักษณะของจิ๊กเป็นแผ่นทำจากเหล็กแผ่นที่มีความหนา 1.5 มิลลิเมตร มีตัวจับยึดชิ้นงาน ขนาดและลักษณะของจิ๊กทั้ง

3 ชั้น แสดงได้ในรูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4 ในการเจาะรูจะมีขนาดเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานที่ต้องการใช้ จิ๊กเทมเพลตนี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดและเที่ยงตรงของชิ้นงานค่อนข้างมาก โดยใช้การวางทาบบนชิ้นงานหรืออยู่ข้างในชิ้นงานซึ่งอาจมีป्लอกนำเจาะหรือไม่ก็ได้ และไม่จำเป็นต้องมีการจับยึดใด ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับจิ๊กที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแล้วจิ๊กเทมเพลตมีลักษณะการใช้งานที่สะดวกและเหมาะสมกว่า [2]

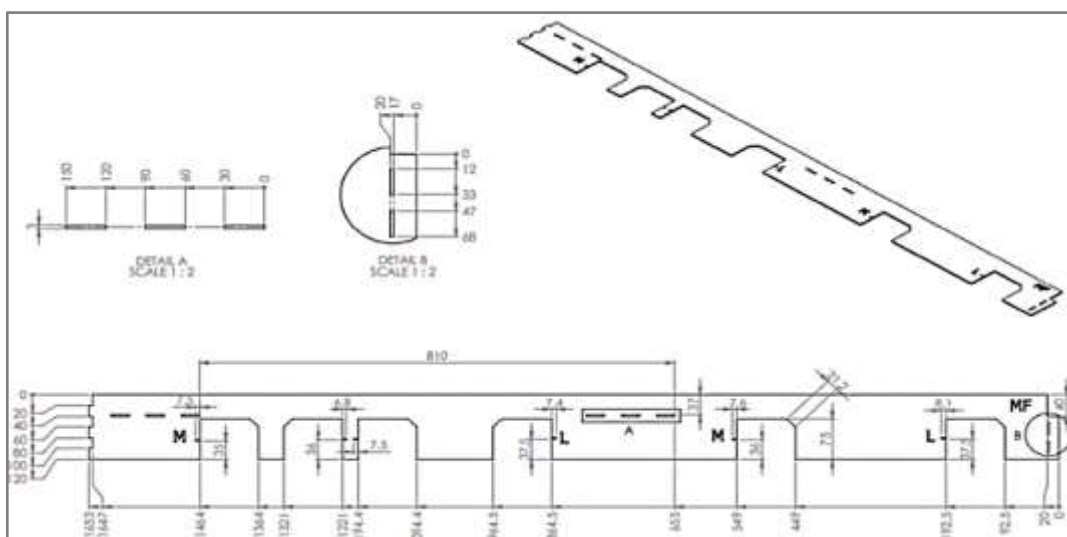
จากรูปที่ 2 ลักษณะของจิ๊กเทมเพลตชิ้นที่ 1 มีขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 1,986 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร จากรูปที่ 3 ลักษณะของจิ๊กเทมเพลตชิ้นที่ 2 มีขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 1,903 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร และจากรูปที่ 4 ลักษณะของจิ๊กเทมเพลตชิ้นที่ 3 มีขนาดความกว้าง 120 มิลลิเมตร ความยาว 1,653 มิลลิเมตร และความหนา 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการสร้างจิ๊กเทมเพลตจากแผ่นเหล็กตามขนาดดังกล่าวแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 2 แบบจิ๊กเทมเพลตชิ้นที่ 1 แสดงขนาดและตำแหน่งช่องเจาะรู



รูปที่ 3 แบบจิกเทมเพลตชั้นที่ 2 แสดงขนาดและตำแหน่งช่องเจาะรู

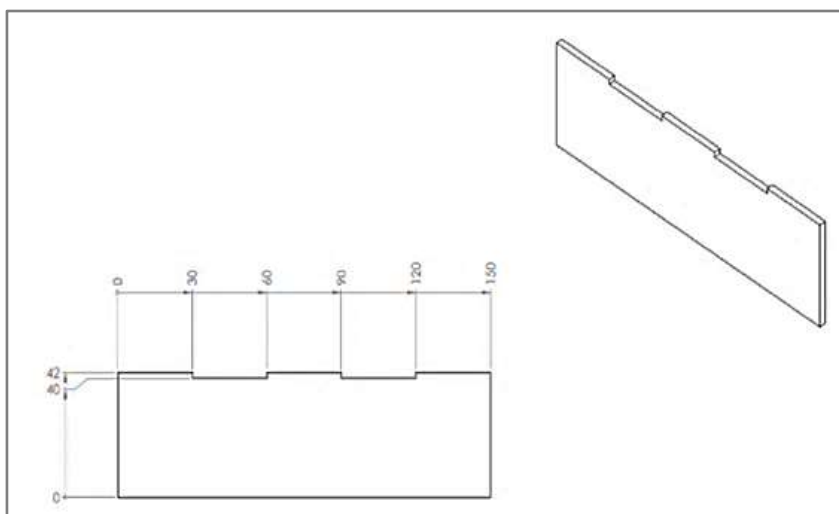


รูปที่ 4 แบบจิกเทมเพลตชั้นที่ 3 แสดงขนาดและตำแหน่งช่องเจาะรู

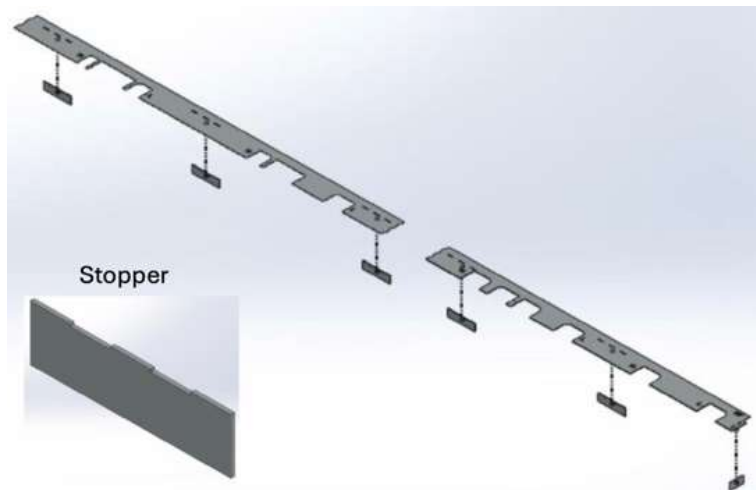


รูปที่ 5 จิ๊กเทมเพลตที่ออกแบบขึ้น

ผลการทดลองใช้จิ๊กเทมเพลตทั้ง 3 ชั้น ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง Mirror และ LED พบว่าต้องใช้แคลมป์จับชิ้นงาน (F Clamp) จำนวนหลายตัว ซึ่งทำให้เสียเวลาในการใช้งาน และยังพบช่องว่างระหว่างจิ๊กกับชิ้นงาน จึงพัฒนาจิ๊กเทมเพลตเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเพิ่มการออกแบบตัวหยุด (Stopper) เพื่อป้องกันการขยับของจิ๊ก ช่วยให้มีความแม่นยำมากขึ้น ลดช่องว่างระหว่างจิ๊กกับชิ้นงาน และลดจำนวนการใช้แคลมป์จับชิ้นงาน (F Clamp) ซึ่ง Stopper นั้นมีขนาดแสดงดังรูปที่ 6 และตำแหน่งที่ติดตั้งแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แบบขนาดของ Stopper



รูปที่ 7 แบบจิกเทมเพลตหลังปรับปรุงที่ติดตั้ง Stopper แล้ว



รูปที่ 8 จิกเทมเพลตหลังปรับปรุงที่ติดตั้ง Stopper แล้ว

จากรูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงขนาดของ Stopper มีความกว้าง 42 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และทำจากเหล็กความหนา 1.5 มิลลิเมตรชนิดเดียวกับตัวจิกเทมเพลต ติดตั้งตามแบบที่พัฒนาขึ้น และสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 แสดงจิกเทมเพลตที่พัฒนาขึ้นหลังปรับปรุงที่ติดตั้ง Stopper แล้ว

ผลการทดลองใช้จิกเทมเพลตที่พัฒนาแบบมี Stopper ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง Mirror และ LED พบว่าไม่มีช่องว่างระหว่าง Mirror และ LED กับ Alu Profile สามารถขันโบลต์ให้แน่น

ได้ทันทีโดยไม่ต้องรอตตรวจสอบตำแหน่งและไม่ต้องทำความสะอาดรอยดินสอ แสดงได้ดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 การใช้งานจิ๊กเทมเพลตที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 10 การติดตั้ง Mirror & LED โดยจิ๊กเทมเพลตที่พัฒนาขึ้น

4.3 การจับเวลาหลังปรับปรุงกระบวนการรวมกับการใช้จิ๊กเทมเพลตเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ของการติดตั้ง Mirror และ LED จำนวน 20 รอบ กลุ่มตัวอย่าง 10 คน (กลุ่มตัวอย่างเดียวกันจากการทดลองก่อนปรับปรุง) เวลาเฉลี่ยอยู่ที่ 200.03 นาที โดยแต่ละขั้นตอนสามารถสร้างเป็นแผนภูมิกระบวนการไหลได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แผนภูมิกระบวนการไหลหลังปรับปรุง

Flow Process Chart								
ชื่อกระบวนการ (Subject Process) : ติดตั้ง Mirror & LED								
ฝ่าย (Department) : Assembly				สถานะ (Method) : หลังปรับปรุง				
ขั้นตอน	กิจกรรม	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (นาที)	สัญลักษณ์				
1	เตรียมวัสดุอุปกรณ์	0	8.45	●	⇒	D	□	▽
2	กำหนดตำแหน่งติดตั้ง Mirror และ LED พร้อมปรับแก้ตำแหน่งหลัก (+/-1 mm) (ใช้จิกเทมเพลต)	0	32.57	●	⇒	D	□	▽
3	ติดตั้ง Mirror และ LED ตามตำแหน่งที่กำหนดไว้	0	35.75	●	⇒	D	□	▽
4	ใส่แหวน ชันโบลต์ M8 และขันโบลต์ ด้วยแรงบิด 60 Nm 48 ตัว	0	29.81	●	⇒	D	□	▽
5	ตรวจสอบขันโบลต์ด้วยแรงบิด 48 ตัว	0	9.83	○	⇒	D	■	▽
6	ยกทั้งชุดติดตั้งกับ Main Frame	1	14.10	○	➡	D	□	▽
7	ใส่แหวน ชันโบลต์ M8 48 ตัว ติดกับ Main Frame และขันโบลต์ด้วยแรงบิด 60 Nm 48 ตัว	0	32.90	●	⇒	D	□	▽
8	ทำความสะอาดชิ้นงาน	0	5.50	●	⇒	D	□	▽
9	จัดเก็บชิ้นงาน	0	31.12	○	⇒	D	□	▼
รวม		1	200.03	6	1	0	1	1

จากตารางที่ 2 กระบวนการทำงานลดลงเหลือ 9 ขั้นตอน เวลาเฉลี่ยรวมลดลงเหลือเพียง 200.03 นาที หลังจากใช้จิกเทมเพลตเข้ามาช่วยในการทำงาน

4. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาจิกเทมเพลตสำหรับการติดตั้ง Mirror และ LED โดยประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาจิ๊กเทมเพลตร่วมกับการประยุกต์ใช้เทคนิค ECRS สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตั้ง Mirror และ LED ได้โดยจำนวนขั้นตอนลดลงจาก 15 ขั้นตอนเหลือเพียง 9 ขั้นตอน และระยะเวลาเฉลี่ยในการติดตั้งลดลงถึงร้อยละ 53.11 การเพิ่มอุปกรณ์ Stopper ยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งติดตั้งเพิ่มความแม่นยำ และลดการใช้เครื่องมือจับยึด ส่งผลให้กระบวนการติดตั้งมีความรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5. อภิปรายผล

ผลการวิจัยสอดคล้องกับแนวคิดของ Díaz-Reza et al [3] ที่ระบุว่าเทคนิค ECRS เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในด้านการลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นและเพิ่มความคล่องตัวในการทำงาน การลดจำนวนขั้นตอนและระยะเวลาในการติดตั้งที่ได้จากการวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้แนวคิดลีน (Lean Management) ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การพัฒนาจิ๊กเทมเพลตที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานและกระบวนการผลิต ช่วยให้สามารถควบคุมคุณภาพของงานติดตั้งได้ดีขึ้น ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และลดความจำเป็นในการตรวจสอบซ้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Groover [5] ที่ชี้ให้เห็นว่าเครื่องมือช่วยจับยึดที่ออกแบบมาเฉพาะสามารถเพิ่มความแม่นยำและลดเวลาในการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้มีข้อจำกัดในด้านขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการสรุปผลในระดับอุตสาหกรรมโดยรวม ดังนั้น การศึกษาต่อไปควรขยายขอบเขตการทดลองให้ครอบคลุมกระบวนการผลิตอื่น ๆ และกลุ่มตัวอย่างที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อยืนยันผลลัพธ์และเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อเสนอแนะในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

References

- [1] Pertiwi AFO, Astuti RD. Increased line efficiency by improved work methods with the ECRS concept in a washing machine production: a case study. Jurnal Sistem dan Manajemen Industri 2020;4(1):13-29. doi: 10.30656/jsmi.v4i1.2184.
- [2] Jornden S, Sriwittayagul W, Prayoon W. Design and development of drilling jig fixture for supporting the study in industrial production practice section 1. Songkhla: Rajamangala University of Technology Srivijaya; 2021 [cited 2025 Jul 8]. Available from:

- <https://riss.rmuts.ac.th/upload/doc/202309/8XBMw35VywF3pSRNtwg6/8XBMw35VywF3pSRNtwg6.pdf>. (In Thai)
- [3] Díaz-Reza JR, García-Alcaraz JL, Morales García AS. Lean manufacturing origins and concepts. In: *Best Practices in Lean Manufacturing*. Cham: Springer; 2022. p. 1–14.
- [4] Anil Kumar S, Suresh N. *Production and operations management*. New Delhi: New Age International Publishers; 2009.
- [5] Groover MP. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson Education; 2015.
- [6] Wichanpradit K. Increase productivity by applying lean manufacturing concept: a case study of teak wood production company [independent study]. Chonburi: Burapha University; 2020 [cited 2025 Jul 8]. Available from: <https://ir.buu.ac.th/dspace/bitstream/1513/297/1/61920221.pdf>. (In Thai)
- [7] Muangngern A. Application of Lean technique (ECS⁺) to increase the process efficiency of automated book return system of Library and Information Center, National Institute of Development Administration (NIDA). Proceeding of the 11th PULINET Online National conference - PULINET2021; 2021 Jan 6-7 [cited 2025 Jul 8]. p. 149-59. Available from: https://pulinet2021.pulinet.org/uploads_file_completely/2020-12-29/pulinet452-IS.pdf. (In Thai)
- [8] Kasemset C, Pinmanee P, Umarin P. Application of ECS and simulation techniques in bottleneck identification and improvement: a paper package factory. Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference 2014; 2014 Oct 12-15 [cited 2025 Jan 15], Jeju, Korea. p. 1477-84. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/276417414>. (In Thai)
- [9] Mhoraksa T, Samattapapong N, Yunyao S, Wongsakul P. Simulation-based application for improving drinking water production process: a case study of the drinking water factory in Chanthaburi. RMUTL Engineering Journal 2020 [cited 2025 Jan 17];5(2):36-42. <https://www.researchgate.net/publication/371378576>. (In Thai)
- [10] Sairam B, Yeh Y, Pansi P, Wiwattanakornwong K, Khumboon R. Eliminating waste of production process through ECS method: case study of XYZ Restaurant [internet]. The 10th RMUTT Global Business and Economics National and International

Conference (RTBEC 2023); 2023 May 26 [cited 2025 Mar 5], Pathum Thani, Thailand.
p. 310-20. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/371132002>. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



ศุภลักษณ์ สุวรรณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่
169 หมู่ 3 ตำบลหนองแก้ว อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ 50230
E-mail: supaluck@northcm.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Work improvement , Ergonomics, Optimization



รัตติกาล บำรุงนา นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนอร์ท-เชียงใหม่
169 หมู่ 3 ตำบลหนองแก้ว อำเภอหางดง จังหวัดเชียงใหม่ 50230
E-mail: b661102030@northcm.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Work improvement

Article History:

Received: July 18, 2025

Revised: December 13, 2025

Accepted: December 15, 2025

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เคตารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ศ.ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัฒนา จิตตลดาการ	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
Prof. Dr. Belkacem Zeghami	Laboratoire de Mathematiques et Physique des Systeme- Groupe de Mecanique Energetique, Universite de Perpignan, France
รศ.ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เล้าหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.กานติส สุตสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรนุช เสี่ยงมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ฐสิทธิ์ ประดับเพ็ชร	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.ณกร อินทร์พยุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา

รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชัยเอียร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ รองวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญยญา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร กุวโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิตมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สือเจย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัดชู	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ประยูร สุรินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.พานิช วุฒิพฤษ	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.พาสีทธิ์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โกคาร์ตันกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงห์นันทกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุทักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรমন จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.ภาวิณี เอี่ยมตระกูล	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.มนตรี คำเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์	ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.มานิช สรรพกิจทิพาการ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรนุช แจงสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชระ เพียรสุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สถาพร โอภาสานนท์	สาขาวิชาบริหารธุรกิจระหว่างประเทศ โลจิสติกส์และการขนส่ง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.สมใจ จันทร์อุดม	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.สมศักดิ์ มีตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่องพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักตร์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันห์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน

รศ.วิญญู แสงวสินกลกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ศันสนีย์ สุภาภา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.เอกชัย วิมลมาลา	ภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เอนก ศิริพานิชกร	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.กรกช ทวีสิน	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กฤษ สุจริตตั้งธรรม	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผศ.ดร.กัมพล พรหมจระประวัต	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันท์กิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณ ทอศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ตันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักรินทร์ กลั่นเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ้มเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว
ผศ.ดร.ชลัท ทิพากรเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ชีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัติภา เจียรไนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอธนาทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าพฤทธิ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนาค	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ แทะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญ์ บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ผศ.ดร.พงษ์ชัย ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอ่อน	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐิแทนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรัญญู วงษ์เสรี	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริตล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนคร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลย์หล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์นุสรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผศ.ดร.สิรางค์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุริดา ที่ปักษ์พันธ์ุ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.โสภา แซ่เฮ้ง	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สมล แซ่เฮ้ง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชา เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขล านครินทร์
ผศ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัย กาฬสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ชาดีปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญา ภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีษะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.กำธร เสพย์ธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.คมพันธ์ ชมสมุทร	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.จักรภพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
อ.ดร.ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์หิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ชานินทร์ ศรีสุวรรณภา	ภาควิชาสถิติประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.ดร.ณัฐภรณ์ เจริญธรรม	สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิต	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.ดุชนิ สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงศิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารภนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.ภักดิ์วัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.ลัญจกร อมรกิจบำรุง	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอเนตต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญ รอดประพัฒน์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ตะวันออก
อ.ดร.วสิน มหัตถินรัตน์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีระเดช กิรติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีชีวเคมี แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์
อ.ดร.สำเริง เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุชัยญา วงศ์รอด	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.สุวรรณีย์ สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ
อ.ดร.อติเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
อ.ดร.อภิชาติ บัวกล้า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
อ.ดร.อนันต์ เดอร์ชิง	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ
อ.ดร.อุกฤษฏ์ สมัครสมาน	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.จุฑา สุนิตย์สกุล	สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวง
ดร.พุทธิพงษ์ เหลือรัตน์วัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท

ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์	สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวัฒน์ ปลั่งใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย
	เกษมบัณฑิต
อ.ณัฐนนท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
	ธัญบุรี
อ.นิตยา จันทร์เรือง มหาผล	เลขาธิการสภาวิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
อ.ว่าที่ ร.ต.สรวิชัย ดาแก้ว	คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
อ.สมเดช อิงคะวะระ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา



ปรัชญา ปณิธาน

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมที่มีคุณภาพ เพื่อสนองความต้องการของส่วนราชการ เอกชน ให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ
2. ค้นคว้าและวิจัยทางวิศวกรรมศาสตร์ โดยเฉพาะสิ่งที่ยังประโยชน์ให้เกิดแก่ประเทศไทยโดยตรง
3. บริการวิชาการ และให้คำปรึกษาแนะนำทางวิศวกรรมศาสตร์แก่หน่วยงานของรัฐและเอกชน รวมทั้งประชาชนทั่วไป

เป้าหมาย และวัตถุประสงค์

1. ผลิตบัณฑิตทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อแสวงหาเทคโนโลยีที่ทันสมัย อันนำไปสู่การพัฒนาตนเองทางเทคโนโลยีในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ
2. ให้บริการวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์แก่สังคม

วิสัยทัศน์

**“คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เป็นคณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอกชน ที่เป็นที่ยอมรับ
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีมั่นคงและยั่งยืน”**

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

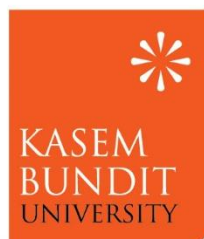
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

และสมัครสมาชิกพร้อมส่งบทความผ่านระบบ Online Journal System ได้ที่

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>

ท่านที่สนใจสามารถดูรายละเอียดและดาวน์โหลดแบบฟอร์มต่างๆ หรือสอบถามเพิ่มเติม ได้ที่

- เว็บไซต์: http://eng.kbu.ac.th/home/?main_page=research&page=engineer_journal
- E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th
- <https://www.tci-thaijo.org/index.php/kbej/user/register>
- โทรศัพท์: 0-2320-2777 ต่อ 1211



www.kbu.ac.th

วิทยาเขตพัฒนาการ

1761 ถนนพัฒนาการ เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ 10250
โทร. 0-2320-2777
Fax : 0-2321-4444

วิทยาเขตร่มเกล้า

60 ถนนร่มเกล้า เขตมีนบุรี
กรุงเทพฯ 10510
โทร. 0-2904-2222
Fax : 0-2904-2200