

วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

KASEM BUNDIT Engineering Journal

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



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2569
Vol.16 No.2 May-August 2026

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

- เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่งานวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
- เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่งานวิจัยและพัฒนา และผลงานวิชาการของคณาจารย์ทั้งในและนอกสถาบัน ตลอดจนนักวิชาการอิสระและวิศวกรทั่วไป
- เพื่อส่งเสริมและกระตุ้นให้เกิดการวิจัยทั้งภายในและภายนอกสถาบัน ส่งผลให้มีการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิศวกรรม เพื่อให้เกิดความเชื่อมโยงระหว่างวิชาการและวิชาชีพ อันจะเป็นประโยชน์แก่ชุมชนและสังคมโดยรวม
- เพื่อสร้างกลไกสนับสนุนการเผยแพร่รวมถึงระบบการรวบรวมและคัดสรรผลงานวิจัยและงานสร้างสรรค์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในวงวิชาการและวิชาชีพ ซึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งของการประกันคุณภาพการศึกษา

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความที่สามารถตีพิมพ์ลงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต จะเน้นเป็นบทความวิจัย (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
- เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ในระหว่างการพิจารณาของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ
- เป็นบทความที่ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น เนื้อหาในบทความไม่ได้ลอกเลียนหรือคัดลอกมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่นหรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
- ผู้เขียนได้แก้ไขบทความตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Peer Reviewer) หรือกองบรรณาธิการแล้ว
- บทความในลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากรายละเอียดข้างต้นจะได้รับการพิจารณาจากกองบรรณาธิการเป็นกรณีเฉพาะ

การประเมินบทความ

การประเมินบทความที่ดีพึงพึงในวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตมีรายละเอียดดังนี้

- บทความทุกฉบับจะได้รับการอ่านและตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะในสาขาวิชานั้นๆ จำนวนไม่น้อยกว่า 3 ท่าน ในระบบ Double-blind Review โดยผู้ทรงคุณวุฒิและผู้เขียนบทความจะถูกปกปิดชื่อระหว่างกระบวนการพิจารณาบทความ
- กองบรรณาธิการจะพิจารณาบทความเบื้องต้นเกี่ยวกับความถูกต้องของรูปแบบบทความ ถ้าไม่ผ่านการพิจารณา จะส่งกลับไปแก้ไข ถ้าผ่านจะเข้าสู่การพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิ เมื่อผลการประเมินผ่านหรือไม่ผ่านหรือมีการแก้ไขจะแจ้งผลให้ผู้เขียนทราบ เมื่อผู้เขียนดำเนินการแก้ไขบทความตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ และ/หรือ กองบรรณาธิการแล้ว จากนั้นจึงจะแจ้งให้ทราบกำหนดการตีพิมพ์บทความนั้นต่อไป
- กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขรูปแบบบทความที่ส่งมาตีพิมพ์และอาจจะส่งเรื่องคืนมายังผู้เขียนให้เพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่แล้วแต่กรณี
- 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.อิศร 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 เคดารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Prof. Dr.Belkacem Zeghmati	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 รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายัณห์ รศ.ศันสนีย์ สุภาภา ผศ.ดร.หนึ่งฤทัย ทิมย้ายงาม	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.วรารกร เกิดทรัพย์	หมวดคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์สำหรับวิศวกร มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาติ ฤทธิ์ธีรฤณ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ชาญวิทย์ อุดมศักดิ์กุล	สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ
อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ อ.ดร.วสิน มหัตนรินทร์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต วิศวกร ที่ปรึกษาโรงงาน อาจารย์พิเศษ ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี อ.จิรวัฒน์ ปล้องไหม	สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ชัยพล ผ่องพลีศาล อ.บัญชา บุรพัฒน์ศิริ	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ปิยพัชร เพ็ชรจันทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

อ.ธีรยุทธ จันทรแจ่ม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัย
เกษมบัณฑิต

อ.สุวิทย์ วงศ์คุ้มสิน

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

ฝ่ายเลขานุการ:

คุณยุพิน ไชยโคตร

คุณรุ่งนภาพร ภูธรธราช

บทบรรณาธิการ

ก้าวเข้าสู่ครึ่งหลังของปี พ.ศ. 2569 วงการวิศวกรรมศาสตร์ทั้งในระดับโลกและระดับประเทศ ยังคงเผชิญแรงขับเคลื่อนสำคัญจากปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่ขยายบทบาทเข้าสู่ภาคพลังงานและภาคอุตสาหกรรมอย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น ความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจากศูนย์ข้อมูล (Data Center) และการประมวลผลขนาดใหญ่เพื่อรองรับ AI ได้กลายเป็นโจทย์เร่งด่วนที่ผลักดันให้ประเทศไทยต้องเร่งวางแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าฉบับใหม่ (PDP 2569) ซึ่งกำหนดเพิ่มสัดส่วนพลังงานสะอาดไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด พร้อมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ของเทคโนโลยีเสริม อาทิ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็ก (Small Modular Reactor) และ แบตเตอรี่กรีนสำหรับการกักเก็บพลังงานเพื่อรองรับการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมและดิจิทัลอย่างมั่นคงและยั่งยืน ควบคู่ไปกับเป้าหมาย Net Zero ในปี ค.ศ. 2050 ขณะเดียวกันภาคการผลิตของไทยก็เร่งปรับตัวสู่ระบบการผลิตอัตโนมัติอัจฉริยะ (Smart Manufacturing) ที่นำ AI และหุ่นยนต์เข้ามาช่วยควบคุมคุณภาพพยากรณ์ความเสียหายของเครื่องจักรล่วงหน้า และบรรเทาปัญหาการขาดแคลนแรงงาน สอดคล้องกับแนวคิด “Intelligence in Science for a Sustainable Future” ที่กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ใช้เป็นแกนหลักของงานมหกรรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2569 สะท้อนให้เห็นว่างานวิจัยทางวิศวกรรมในปัจจุบันมิได้มุ่งเน้นเพียงประสิทธิภาพเชิงเทคนิค แต่ยังต้องคำนึงถึงความมั่นคงของระบบ ความปลอดภัยทางไซเบอร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวไปพร้อมกันภายใต้บริบทการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

วารสารวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิตยังคงยึดมั่นในบทบาทของการเป็นเวทีเผยแพร่องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมที่มีคุณภาพและเป็นสะพานเชื่อมโยงงานวิจัยของนักวิชาการไทยสู่การใช้ประโยชน์จริงในภาคอุตสาหกรรมและสังคม กองบรรณาธิการยังคงให้ความสำคัญกับการยกระดับมาตรฐานการพิจารณาบทความความทันสมัยและความเข้มข้นทางวิชาการของงานวิจัยที่ตีพิมพ์ ตลอดจนความโปร่งใสในทุกขั้นตอนของกระบวนการกลั่นกรอง ในนามของกองบรรณาธิการขอขอบคุณผู้เขียนบทความและผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้สละเวลาและทุ่มเทองค์ความรู้ในการพัฒนาบทความแต่ละฉบับให้มีคุณภาพและหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นอีกหนึ่งกลไกสำคัญในการผลักดันงานวิจัยด้านวิศวกรรมของไทยให้ก้าวทันการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีโลกต่อไป

รองศาสตราจารย์ วิทยุ แสงสินกสิกิจ
บรรณาธิการวิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต

บทความวิจัย (Research Article)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการแปลงข้อมูลการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการการผลิต

APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN TRANSFORMING
MANUFACTURING DATA TO IMPROVE PRODUCTION MANAGEMENT
EFFICIENCY

1

กรกนก ยัมพลาย กวินธร สัยเจริญ และ สิทธิชัย แซ่หล่ม

อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงลม

INFLUENCE OF ROW CONFIGURATION OF SOLAR PANELS ON WIND
LOAD COEFFICIENTS

27

จิรวัฒน์ จันทร์เรือง และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ

การทำนายลักษณะเฉพาะการไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตพุ่งชนแบบหลายช่อง
โดยใช้หัวฉีดกลม

PREDICTION OF TURBULENT FLOW CHARACTERISTICS OF THE MULTI-CHANNEL
IMPINGING JETS USING CIRCULAR NOZZLES

55

เมืองแก้ว ยุตัน

การปรับปรุงกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารโดยการประยุกต์ใช้ดีเอ็มเอไอซีและ
ระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล: กรณีศึกษาการผลิตปูอัดในประเทศไทย

PROCESS IMPROVEMENT IN THE FOOD INDUSTRY THROUGH DMAIC
AND DIGITAL AUTOMATION: A CASE STUDY OF SURIMI CRAB STICK
PRODUCTION IN THAILAND

76

คมกริช วีรวัฒนา ประยุทธ์ ฤทธิเดช และ ศุภรัชชัย วรรัตน์

การคำนวณแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่วและโค้งโดยการทดสอบแบบจำลองใน
อุโมงค์ลม

WIND LOAD CALCULATION OF LOW-RISE BUILDINGS WITH GABLE AND
ARCHED ROOFS BY WIND TUNNEL TEST

101

นรวิทย์ มั่นศิลป์ จิรวัฒน์ จันทร์เรือง และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

การออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟอโรมาโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลง
หน้าที่เชิงคุณภาพ: กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตเซรามิก

PRODUCT DESIGN OF A CERAMIC AROMA LAMP THROUGH THE
APPLICATION OF QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT: A CASE STUDY OF
A COMMUNITY-BASED CERAMIC ENTERPRISE

129

อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ และ ชาตรี หอมเขียว

การบูรณาการกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์กับกรีนลีนซิกซ์ซิกมาเพื่อการผลิต
ที่ยั่งยืน: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในประเทศไทย

INTEGRATING PRODUCT PORTFOLIO STRATEGY AND GREEN LEAN SIX
SIGMA FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING: A CASE STUDY OF THE
FEED INDUSTRY IN THAILAND

150

วิรัช ชัยอัศวนันต์ ศุภรัชชัย วรรัตน์ และ ประยุทธ์ ฤทธิเดช

การพัฒนาแบบจำลองแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเรืออัตโนมัติ
ด้วยอัลกอริทึม Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient ในระบบการเรียนรู้
เสริมกำลังเชิงลึก

REAL-TIME MODEL DEVELOPMENT AND PERFORMANCE ENHANCEMENT
FOR AUTONOMOUS SHIP CONTROL USING THE DEEP REINFORCEMENT
LEARNING TWIN DELAYED DEEP DETERMINISTIC POLICY GRADIENT
ALGORITHM

174

ธนาวุฒิ วิริยะพันธ์ สาลินี สมบูรณ์ไพศาล ก้องเกียรติ ลีกันนุช และ ทวีศักดิ์ มั่นชวนนท์

การวิเคราะห์การกระจายตัวและแนวโน้มดัชนีองศาวันความเป็นรายภูมิภาคของ
ประเทศไทย

REGIONAL DISTRIBUTION AND TREND ANALYSIS OF COOLING DEGREE-DAY
INDICES IN THAILAND

199

อภิวัฒน์ ชัยสุกัญญาสันต์ พงศกร คชาพงศ์กุล และ สิริชัย จิรวงศ์นุสรณ์

บทความวิจัย (Research Article) (ต่อ)

APPLICATION OF LAND USE AND TRANSPORTATION INTERACTION (LUTI)
MODEL FOR TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD): THE CASE STUDY
OF CITY AND ACTIVITY CENTER DEVELOPMENT ALONG THE MRT PINK
LINE CORRIDOR, BANGKOK METROPOLITAN REGION

217

Sikkawat Sukhumaumnuychai

การศึกษาพฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้บริการทางพิเศษ กรณีการกำหนดค่าผ่านทาง
ตามช่วงเวลา

DISCRETE CHOICE MODELS OF TRAVEL BEHAVIOR OF EXPRESSWAY IN
TIME-OF-DAY PRICING

242

แสงระวี ตันงาม และ เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการแปลงข้อมูลการผลิต
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการการผลิต

APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN TRANSFORMING
MANUFACTURING DATA TO IMPROVE PRODUCTION MANAGEMENT
EFFICIENCY

กรกนก ยิ้มพลา¹ กวินธร สัยเจริญ² และ สิทธิชัย แซ่เหล่ม³

¹นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์,
เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000, Kornkanok.yimpay@gmail.com

^{2,3}อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์,
เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000,
²saicharoen_k@silpakorn.edu, ³saelem_s@silpakorn.edu

Kornkanok Yimpay¹, Kawinthorn Saicharoen² and Sitichai Saelem³

¹Student, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering
and Industrial Technology, Silpakorn University - Sanam Chandra Palace Campus,
6 Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang, Nakhon Pathom, 73000 Thailand,
Kornkanok.yimpay@gmail.com

^{2,3}Lecturer, Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering
and Industrial Technology, Silpakorn University - Sanam Chandra Palace Campus,
6 Rajamankha Nai Rd., Amphoe Muang, Nakhon Pathom, 73000 Thailand
²saicharoen_k@silpakorn.edu, ³saelem_s@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบดิจิทัลสำหรับจัดเก็บ ติดตาม และแสดงผลข้อมูลการผลิต โดยมุ่งเน้นกรณีศึกษากระบวนการบรรจุผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรม เพิ่มประสิทธิภาพการจัดการข้อมูล โดยประยุกต์ใช้แนวคิดการจัดการความสูญเปล่า (7 Wastes) และการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Why-Why Analysis) ร่วมกับหลักการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ (HCI)

ตามมาตรฐาน ISO 9241 เพื่อปรับปรุงกระบวนการและลดกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า กระบวนการวิจัยประกอบด้วยการสำรวจสถานะปัจจุบัน การวิเคราะห์กระบวนการจัดการข้อมูล ต้นทาง และการออกแบบสถาปัตยกรรมข้อมูล เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลผ่านแบบฟอร์มดิจิทัลเข้าสู่ฐานข้อมูลกลาง พร้อมแสดงผลผ่านหน้าปัดแสดงผล ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถลดขั้นตอนการทำงานลงร้อยละ 33.33, ลดเวลาการทำงานรวมลงร้อยละ 63.98, กำจัดความผิดพลาดในการป้อนข้อมูลลงเหลือ 0 ครั้ง และลดเวลารอคอยข้อมูลจาก 24 ชั่วโมงเหลือเพียง 1 ชั่วโมง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่าโครงการให้อัตราผลตอบแทนจากการลงทุนร้อยละ 43.73 ต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 3 เดือน

คำสำคัญ: ระบบดิจิทัล, การจัดการข้อมูลการผลิต, หน้าปัดแสดงผล, สถาปัตยกรรมข้อมูล, การจัดการงานประจำวัน

ABSTRACT

This research aims to develop a digital system for data acquisition, monitoring, and visualization, with a focus on the packaging process in a case study industry. The primary objective is to enhance data management efficiency. By integrating Lean manufacturing principles, specifically the identification of the Seven Wastes and Why-Why Analysis, the study seeks to streamline operations and eliminate non-value-added activities. Furthermore, the system design incorporates Human-Computer Interaction (HCI) principles in accordance with ISO 9241. The research methodology encompasses an initial state assessment, an analysis of shopfloor data management processes, and the design of a data architecture to facilitate seamless data integration from digital forms into a centralized database. The empirical results demonstrate that the proposed digital system successfully reduced operational steps by 33.33% and decreased total working hours by 63.98%. Notably, manual data entry errors were eliminated (reduced to zero), and data latency dropped significantly from 24 hours to just 1 hour. Economic evaluation further indicates the project's viability, yielding a Return on Investment (ROI) of 43.73% per annum with a payback period of approximately 2 years and 3 months.

KEYWORDS: Digital System, Production Data Management, Dashboard, Data Architecture, Daily Management

1. บทนำ

อุตสาหกรรมของประเทศไทยยังคงเผชิญความท้าทายจากภาวะเศรษฐกิจโลกที่ชะลอตัว [1] ส่งผลให้โรงงานจำเป็นต้องเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอย่างต่อเนื่อง และในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่การเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัลได้กลายเป็นปัจจัยหลักในการขับเคลื่อนประสิทธิภาพการผลิต โดยเฉพาะการเปลี่ยนฐานข้อมูลจากการจดบันทึกด้วยมือสู่ระบบดิจิทัลที่สามารถประมวลผลได้ทันที ซึ่งในระดับสากลได้มุ่งเน้นการใช้ระบบเชื่อมโยงข้อมูลหน่วยงานเข้ากับระบบสนับสนุนการตัดสินใจสอดคล้องกับแนวโน้มงานวิจัยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา พบว่าการจัดการข้อมูลที่รวดเร็วช่วยลดความคลาดเคลื่อนในระบบจัดการข้อมูลและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันได้อย่างมีนัยสำคัญ [2]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องมือแสดงผลเพื่อการบริหารจัดการระดับสูง [3-5] แต่ยังคงขาดการปรับปรุงกระบวนการนำเข้าข้อมูล ณ พื้นที่ปฏิบัติงานจริง โรงงานกรณีศึกษายังประสบปัญหาความล่าช้าจากการบันทึกข้อมูลในรูปแบบเอกสาร ซึ่งก่อให้เกิดความสูญเปล่าด้านเวลาจากการป้อนข้อมูลซ้ำซ้อน และหัวหน้างานต้องรอข้อมูลนานถึง 24 ชั่วโมงจึงจะสามารถรวบรวมข้อมูลเพื่อทำการสรุปการผลิตได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการบูรณาการหลักการออกแบบที่เน้นผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลางตามมาตรฐาน ISO 9241 [6] เพื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการบันทึกข้อมูลแบบดั้งเดิมสู่ระบบดิจิทัลการแสดงผลผ่านหน้าปัดแสดงผล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดขั้นตอนการทำงานที่ซ้ำซ้อนและลดระยะเวลาในการเข้าถึงข้อมูล พร้อมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการลงทุนของระบบดิจิทัล [7]

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาในสายการบรรจุของโรงงานกรณีศึกษา ครอบคลุมการออกแบบจุดเชื่อมต่อข้อมูลดิจิทัลจำนวน 21 ฟอรัม การสร้างฐานข้อมูลกลาง และการแสดงผลผ่านหน้าปัดแสดงผลด้วยเครื่องมือ Microsoft Excel และ Power BI ภายใต้กรอบเวลาดำเนินงานในปี พ.ศ. 2568-2569

2. แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ระบบบริหารงานประจำวัน (Daily Management System: DM)

ระบบบริหารงานประจำวัน (Daily Management System: DM) เป็นองค์ประกอบสำคัญของการจัดการคุณภาพทั้งองค์กร (Total Quality Management: TQM) ที่เน้นการควบคุมกระบวนการให้เป็นไปตามมาตรฐานทุกวัน ประกอบด้วยกำหนัดมาตรฐาน การติดตามตัวชี้วัด การประชุมทบทวนผล และการปรับปรุงกิจกรรมประจำวัน [8]

2.1.2 กระบวนการจัดการข้อมูล ETL (Extract-Transform-Load)

ประกอบด้วยการดึงข้อมูล (Extract) การแปลงข้อมูล (Transform) และการโหลดข้อมูล (Load) [9] เพื่อบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่งที่จัดกระจายให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน พร้อมสำหรับการวิเคราะห์และสนับสนุนการตัดสินใจ [3-5]

2.1.3 ธุรกิจอัจฉริยะ (Business Intelligence: BI) และระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

เป็นกรอบการทำงานที่เปลี่ยนข้อมูลดิบเป็นองค์ความรู้เพื่อการตัดสินใจบนพื้นฐานข้อเท็จจริง โดยใช้การสร้างภาพข้อมูลผ่านหน้าปัดแสดงผล เพื่อลดภาระการรับรู้และช่วยในการวิเคราะห์เจาะลึกสาเหตุของปัญหาอย่างแม่นยำ [10] โดยเน้นการออกแบบหน้าปัดแสดงผลที่ลดภาระการรับรู้ผ่านการนำเสนอเฉพาะข้อมูลที่จำเป็น การใช้รูปแบบที่เป็นมาตรฐาน และการรองรับการปฏิสัมพันธ์ของข้อมูล เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์เจาะลึกถึงสาเหตุของปัญหาและปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างแม่นยำ

2.1.4 การออกแบบโดยเน้นผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง (Human-Centered Design)

ระบบดิจิทัลจำเป็นต้องอาศัยการออกแบบที่สอดคล้องกับขีดความสามารถของมนุษย์มาตรฐาน ISO 9241-210 จึงถูกนำมาใช้เป็นกรอบของการพัฒนาที่เน้นการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน [6] งานวิจัยนี้ได้บูรณาการการออกแบบ โดยประยุกต์ใช้กฎของฮิก เพื่อลดความซับซ้อนในการตัดสินใจผ่านการจำกัดทางเลือกที่เหมาะสม ร่วมกับการสร้างกลไกป้องกันความผิดพลาดในรูปแบบดิจิทัลที่สอดคล้องกับลำดับขั้นตอนการปฏิบัติงานจริง

2.1.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ใช้ประเมินความเหมาะสมของการลงทุน ประกอบด้วยอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) [7] การใช้ตัวชี้วัดทั้งสองช่วยให้สามารถประเมินความคุ้มค่าของโครงการได้อย่างเหมาะสม

อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน ใช้ในการประเมินความสามารถของโครงการในการสร้างผลประโยชน์เมื่อเทียบกับต้นทุนทั้งหมด โดยคำนวณได้ตามสมการที่ (1)

$$ROI = (\text{ผลประหยัดต่อปี} \div \text{ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด}) \times 100 \quad (1)$$

ขณะที่ระยะเวลาคืนทุนใช้แสดงระยะเวลาที่ผลประโยชน์สุทธิสะสมมีค่าเท่ากับต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2)

$$\text{Payback Period} = \text{ต้นทุนการลงทุน} + \text{ผลประโยชน์สุทธิ} \quad (2)$$

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Clausen [2] ศึกษาการเปลี่ยนผ่านของบอร์ดแสดงผลหน้างานในระบบบริหารงาน (Shop Floor Management: SFM) โดยพบว่าองค์กรการผลิตจำนวนมากเริ่มลงทุนด้านดิจิทัลมากขึ้น แต่การใช้งานบอร์ดดิจิทัลในทางปฏิบัติยังอยู่ในระดับต่ำ ผู้วิจัยชี้ว่าการเปลี่ยนผ่านสู่บอร์ดดิจิทัลมีความจำเป็นต่อการสนับสนุนข้อมูลแบบเวลาจริง การลดการใช้เอกสาร และการตัดสินใจที่แม่นยำมากขึ้น โดยเสนอว่าระยะเปลี่ยนผ่านอาจใช้รูปแบบผสมระหว่างแอนะล็อกและดิจิทัลเพื่อรักษาจุดแข็งของทั้งสองระบบไว้ร่วมกัน

Schmitt et al [3] ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง (Augmented Reality: AR) ร่วมกับข้อมูลจากเครือข่าย IoT เพื่อติดตามสถานะการใช้พลังงานของเครื่องจักร โดยเปรียบเทียบเครื่องมือแสดงผลข้อมูลในรูปแบบต่าง ๆ ผลการศึกษาพบว่า Power BI เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดสำหรับองค์กรที่ต้องการระบบจัดการข้อมูลที่ใช้งานง่าย ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถมองเห็นความผิดปกติของกระบวนการผลิตได้อย่างชัดเจนและทันทั่วทั้งที่ ส่งผลให้การแก้ปัญหาและการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตทำได้ดีขึ้น

Sorour and Atkins [5] นำเสนอโครงสร้างการพัฒนาระบบธุรกิจอัจฉริยะ เพื่อรองรับการจัดการชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ผ่านการวิเคราะห์แบบบริการตนเอง โดยเน้นการใช้เครื่องมืออย่าง Power BI ในการสร้างความเชื่อมโยงของข้อมูลจากหลายแหล่งเข้าด้วยกัน เพื่อแสดงผลผ่านหน้าปัดแสดงผลที่รองรับการวิเคราะห์แบบเจาะลึก ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหารและการบริหารจัดการข้อมูลเชิงองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ

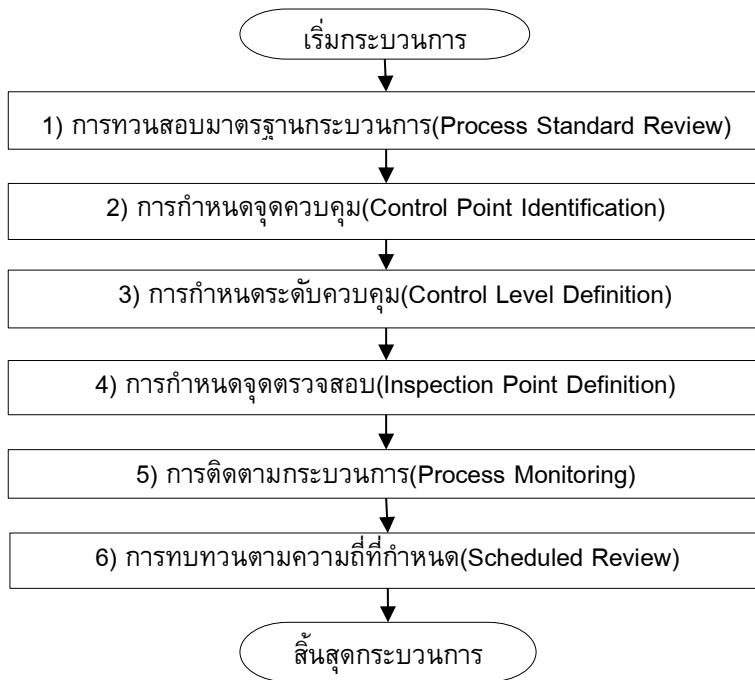
Pshychenko [7] ศึกษาวิธีการคำนวณผลตอบแทนจากการลงทุนสำหรับโครงการดิจิทัลในระบบการผลิต โดยเสนอว่าการประเมินความคุ้มค่าควรพิจารณาทั้งรายจ่ายลงทุน รายจ่ายดำเนินงาน ผลประโยชน์ทางตรง ผลประโยชน์ทางอ้อม และปัจจัยด้านเวลา ควบคู่กับการใช้ตัวชี้วัดทางการเงินอื่นๆ เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน เพื่อให้การวิเคราะห์ครอบคลุมจึงเหมาะสำหรับใช้เป็นกรอบแนวคิดในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

Jaisue and Sirioran [11] ศึกษาการลดเวลาดันหาเอกสารคุณภาพด้วยหลักการลดความสูญเสีย 4 ประการ ร่วมกับการพัฒนาฐานข้อมูลด้วย Visual Basic for Applications (VBA) บน Microsoft Excel เพื่อปรับปรุงกระบวนการจัดการเอกสาร ผลการวิจัยพบว่า การออกแบบโครงสร้างข้อมูลที่เป็นระบบร่วมกับการลดขั้นตอนที่ซ้ำซ้อน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บและเข้าถึงข้อมูลได้อย่างชัดเจน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาขั้นตอนการทำงาน

การวิเคราะห์สถานะปัจจุบันของกระบวนการติดตามข้อมูลสายการบรรจุ มีขั้นตอนการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตแสดงขั้นตอนตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการผลิต

อธิบายขั้นตอนการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการผลิต

1) การทวนสอบมาตรฐานกระบวนการ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระบวนการผลิตดำเนินไปตามมาตรฐานที่กำหนด โดยทำการตรวจสอบเอกสารมาตรฐานการผลิต ว่าพนักงานมีการปฏิบัติตามอย่างถูกต้องหรือไม่ กรณีที่ไม่มีมาตรฐานที่เหมาะสมกับการทำงานในสภาพปัจจุบัน จำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานที่เหมาะสมและจัดการอบรมมาตรฐานการทำงานเพื่อให้การทำงานเข้าสู่สภาวะปกติและเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดอยู่เสมอ

2) การกำหนดจุดควบคุม ทำการกำหนดตามปัจจัยด้านความสามารถในการบันทึกข้อมูลของพนักงาน และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพและปริมาณของเสียในกระบวนการ โดยมีการกำหนดจุดควบคุมทั้งหมด 23 จุด และมีเครื่องจักรสำหรับตรวจสอบคุณภาพของสินค้า ได้แก่

2.1) เครื่องตรวจสอบภาชนะก่อนบรรจุ: ตรวจสอบความสะอาดของภาชนะทั้งภายนอกและภายใน รวมทั้งความสมบูรณ์ของภาชนะ ก่อนเข้าสู่กระบวนการบรรจุ

2.2) เครื่องตรวจสอบความสมบูรณ์ของภาษาหลังบรรจุเครื่องที่ 1: ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์ของภาษาตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ความสมบูรณ์ของสภาพภาษาภายนอกและสิ่งแปลกปลอมภายในภาษา เป็นต้น

2.3) เครื่องตรวจสอบความสมบูรณ์ของภาษาหลังบรรจุเครื่องที่ 2: ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์ของภาษาตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น ความสมบูรณ์ของสภาพภาษาภายนอก และปริมาณสินค้าหลังการบรรจุ เป็นต้น

2.4) เครื่องตรวจสอบแพ็ค: ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์ของการแพ็ค ความสมบูรณ์ของภาษา และความสมบูรณ์ของฟิล์มหุ้มแพ็ค

2.5) เครื่องอ่านบาร์โค้ด: ทำหน้าที่ตรวจสอบความสมบูรณ์และความถูกต้องของบาร์โค้ด

2.6) เครื่องตรวจสอบน้ำหนักต่อแพ็ค: ทำหน้าที่ตรวจสอบน้ำหนักต่อแพ็คตามมาตรฐานที่กำหนด

3) การกำหนดระดับควบคุม เป็นการกำหนดขอบเขตของค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ในกระบวนการผลิตทั้งหมด 23 จุด แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การควบคุมด้านจำนวนของเสีย 15 จุด และการควบคุมด้านคุณภาพ 8 จุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1) การควบคุมด้านจำนวนของเสีย ประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมเพื่อกำหนดค่าควบคุมที่เหมาะสมตามลักษณะของข้อมูล โดยเลือกใช้แผนภูมิสัดส่วนของเสีย (p -chart) เพื่อกำหนดหาค่าเฉลี่ยและค่าควบคุม สำหรับใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินสถานะของกระบวนการ

3.2) การควบคุมด้านคุณภาพ ระบุจุดที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และตรวจสอบการทำงานของเครื่องจักรให้เป็นไปตามค่ามาตรฐานที่ทางโรงงานกำหนด เช่น แรงดันน้ำที่ใช้สำหรับการล้างภาษา เป็นต้น โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์อันตรายและจุดวิกฤตที่ต้องควบคุม (Hazard Analysis and Critical Control Points: HACCP) ในกระบวนการผลิต

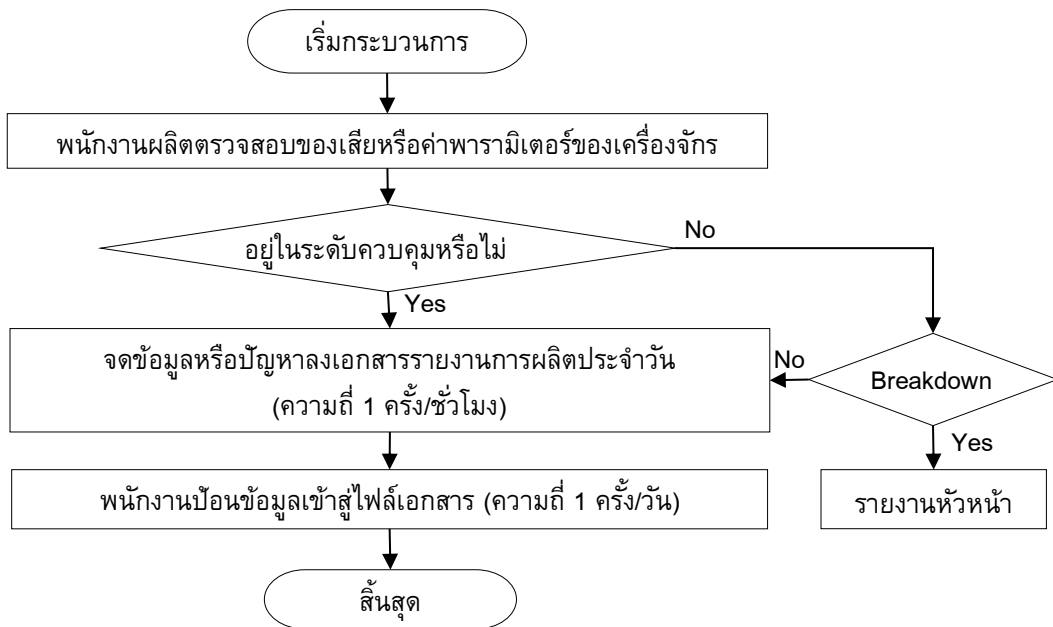
4) การกำหนดจุดตรวจสอบ พนักงานวัดค่าควบคุมทั้ง 23 จุด และเมื่อค่าที่ได้ออกนอกระดับควบคุม พนักงานจะต้องทำการตรวจสอบเครื่องจักรตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น การตรวจสอบสภาพเครื่องจักรและการตั้งค่าการทำงานของเครื่องจักร เป็นต้น เพื่อให้การทำงานกลับสู่สภาวะปกติและสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะเวลาที่สั้น

5) การติดตามกระบวนการ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

5.1) จัดทำไฟล์สำหรับป้อนข้อมูล เริ่มจากออกแบบโครงสร้างไฟล์ Microsoft Excel ให้รองรับข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น วันที่ เวลา ค่าพารามิเตอร์และจำนวนของเสีย เป็นต้น โดยไฟล์ต้องครอบคลุมจุดควบคุมทั้งหมด 23 จุด สำหรับการป้อนข้อมูลการผลิตเป็นระยะเวลา 1 ปี

5.2) การติดตามกระบวนการ เริ่มต้นจากการที่พนักงานผลิตทำการตรวจสอบของเสียหรือพารามิเตอร์ของเครื่องจักรเพื่อเฝ้าระวังความผิดปกติ โดยหากค่าที่วัดได้ยังคงอยู่ในระดับควบคุม พนักงานจะดำเนินการจดบันทึกข้อมูลลงเอกสารรายงานการผลิตประจำวันด้วยความถี่ทุก 1 ชั่วโมง

และสรุปข้อมูลเข้าสู่ไฟล์ Microsoft Excel วันละ 1 ครั้ง และในกรณีที่พบว่าค่าพารามิเตอร์ไม่อยู่ในระดับควบคุม ทำการจำแนกสถานะต่อไปว่าเกิดการหยุดชะงักของเครื่องจักร (Breakdown) หรือไม่ หากเครื่องจักรไม่ได้หยุดทำงาน พนักงานจะบันทึกข้อมูลการผลิตหรือปัญหาที่พบลงเอกสาร แต่หากเกิดการหยุดชะงักของเครื่องจักร พนักงานจะต้องรายงานต่อหัวหน้างานทันทีเพื่อดำเนินการแก้ไข แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการติดตามข้อมูลการผลิต

5.3) การรวบรวมข้อมูลเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหา เริ่มจากการนำข้อมูลที่ได้จากไฟล์ Microsoft Excel มาสรุปผล จากนั้นทำการรวบรวมปัญหา สาเหตุ และแนวทางการแก้ไขที่ส่งผลให้ค่าเกินระดับควบคุม จากนั้นพนักงานจะนำข้อมูลมาจัดทำเป็นกราฟสำหรับแสดงผลรายสัปดาห์และรายเดือน เพื่อใช้สำหรับการประชุมติดตามผลในขั้นตอนต่อไป

5.4) ประชุมติดตามผล พนักงานนำข้อมูลที่ได้รวบรวมจัดทำเป็นไฟล์ PowerPoint สำหรับการนำเสนอข้อมูล เพื่อนำไปใช้สำหรับการประชุมข้อมูลการผลิตและสรุปผล

6) การทบทวนตามความถี่ที่กำหนด ถูกกำหนดไว้เป็นมาตรฐานตามรอบ ที่ใช้สำหรับการพิจารณาการกำหนดจุดควบคุม, การกำหนดระดับควบคุม และการกำหนดจุดตรวจสอบเพื่อให้การผลิตอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการในปัจจุบันอยู่เสมอ

3.2 การเก็บรวบรวมและคำนวณเวลาการทำงานก่อนการปรับปรุง

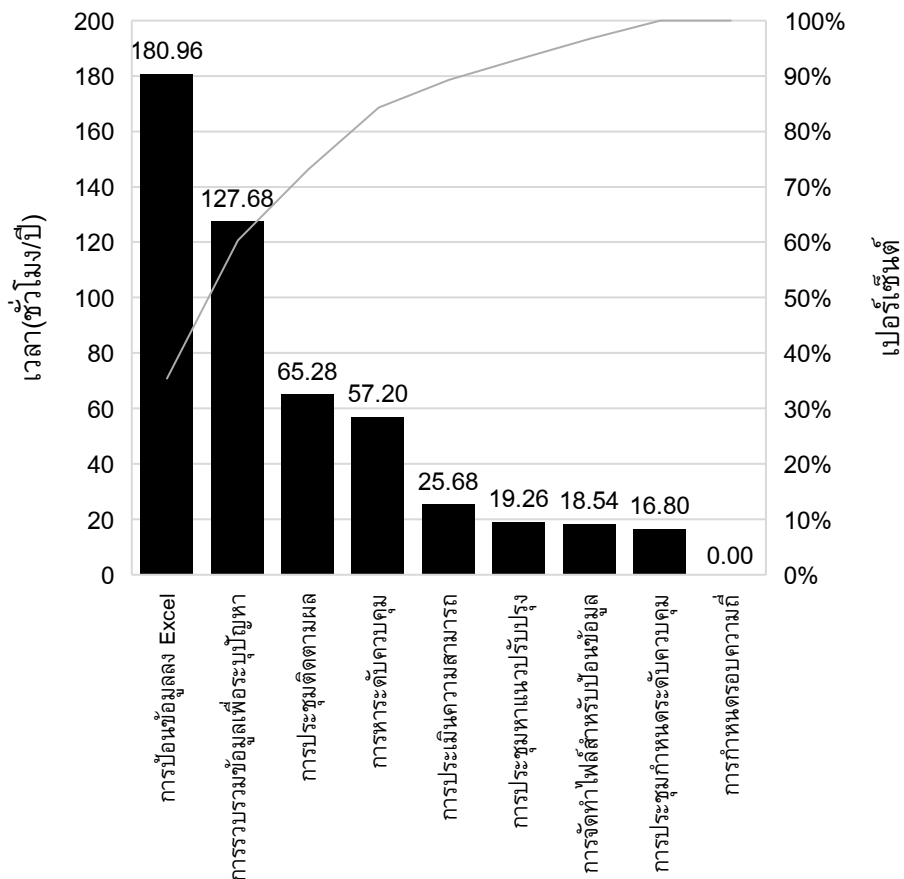
การหาค่าเวลาก่อนการปรับปรุงในตารางที่ 1 จากการเก็บข้อมูลเวลาจากการปฏิบัติงานจริงของพนักงานในแต่ละกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการผลิต โดยพิจารณา ร่วมกับจำนวนพนักงานที่มีส่วนร่วมในกิจกรรมนั้น และความถี่ของการดำเนินงานตลอดรอบปี เพื่อสะท้อนภาระงานจริงของกระบวนการ ตัวอย่างเช่น กิจกรรมที่ดำเนินเป็นประจำทุกวันมีเวลาสะสมต่อปีสูงกว่ากิจกรรมที่ดำเนินเพียงบางช่วง จากการรวบรวมข้อมูลดังกล่าวพบว่า กระบวนการก่อนการปรับปรุงมีทั้งหมด 9 ขั้นตอน และใช้เวลารวม 511.40 ชั่วโมงต่อปี โดยกิจกรรมที่ใช้เวลาสูงส่วนใหญ่เป็นงานด้านการจัดทำไฟล์ การป้อนข้อมูล และการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหา

ตารางที่ 1 เวลาต่อปีของกิจกรรมผลิตก่อนการปรับปรุง

หมวดหมู่	รายการ	จำนวน พนักงาน	ความถี่ ครั้ง/ปี	ก่อนปรับปรุง (ชั่วโมง)	
				เวลา/ครั้ง	เวลา/ปี
กำหนดจุดควบคุม	1 การประเมินคัดเลือจุดควบคุม	6	1	4.28	25.68
กำหนดระดับควบคุม	2 ขั้นตอนการหาระดับควบคุม	2	26	1.10	57.20
	3 การประชุมกำหนดระดับควบคุม	4	2	2.10	16.80
กำหนดจุดตรวจสอบ	4 การจัดการประชุมเพื่อหาแนวปรับปรุง	6	1	3.21	19.26
การติดตามกระบวนการ	5 การจัดทำไฟล์สำหรับป้อนข้อมูล	2	1	9.27	18.54
	6 การป้อนข้อมูลลงไฟล์ Microsoft Excel	2	312	0.29	180.96
	7 การรวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์	2	12	5.32	127.68
	8 การประชุมติดตามผล	8	12	0.68	65.28
การทบทวน	9 กำหนดรอบความถี่	6	2	-	-
	จำนวนกิจกรรม		9	ขั้นตอน	
	เวลารวมทุกกิจกรรม		511.40	ชั่วโมงต่อปี	

3.3 การวิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหา

จากข้อมูลเวลาการทำงานก่อนการปรับปรุงในตารางที่ 1 ได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตดังรูปที่ 3 เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหาส่วนน้อยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการโดยรวม



รูปที่ 3 พาเรโตเวลาทำงานของกระบวนการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์พบว่ากิจกรรม 3 ลำดับแรกที่ใช้เวลาสูงสุด ได้แก่ การป้อนข้อมูลลงไฟล์ Microsoft Excel การรวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ และการประชุมติดตามผล ซึ่งรวมกันคิดเป็นร้อยละ 73 ของเวลาการทำงานทั้งหมด จึงเหมาะสมที่จะเลือกกิจกรรม 3 ลำดับแรกมาเป็นประเด็นในการปรับปรุง จากนั้นนำประเด็นที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา (Why-Why Analysis) [12] ดังตารางที่ 2 เพื่อค้นหาสาเหตุรากของปัญหาและกำหนดแนวทางการปรับปรุง

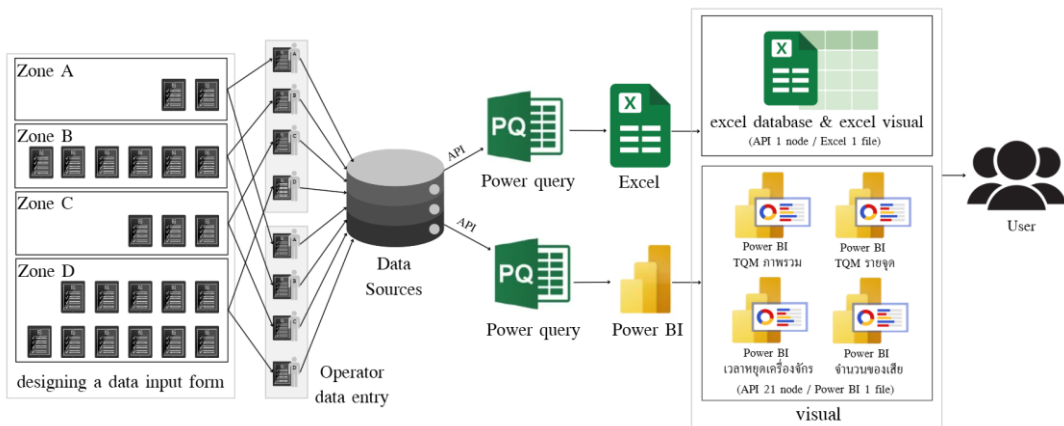
ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาในกระบวนการติดตามข้อมูล

What	Why 1	Why 2	Why 3	Why 4
ทำไมการป้อนข้อมูลลง Microsoft Excel ใช้เวลามาก?	ต้องคีย์ข้อมูลด้วยมือจำนวนมาก	ข้อมูลต้นทางไม่เป็นดิจิทัล/ไม่ได้อยู่ในรูปแบบพร้อมใช้งาน	ไม่มีเครื่องมือ/ระบบบันทึกข้อมูลหน้างานแบบมาตรฐาน	ไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลอัตโนมัติจากต้นทาง
ทำไมการรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ใช้เวลา?	ข้อมูลรูปแบบไม่มาตรฐาน/คุณภาพข้อมูลไม่สม่ำเสมอ	ต้องตามข้อมูลจากหลายไฟล์หลายคนหลายที่	ไม่มีศูนย์กลางข้อมูล	ขาดการเชื่อมโยงข้อมูล
ทำไมการประชุมติดตามผลใช้เวลา?	ข้อมูลสำหรับสรุปผลไม่พร้อมหรือไม่อัปเดต	ต้องใช้เวลาเคลียร์ข้อมูลให้ตรงกันก่อนสรุปผล	ไม่มีหน้าปัดแสดงผลหรือรายงานชุดเดียวแบบ real-time	-

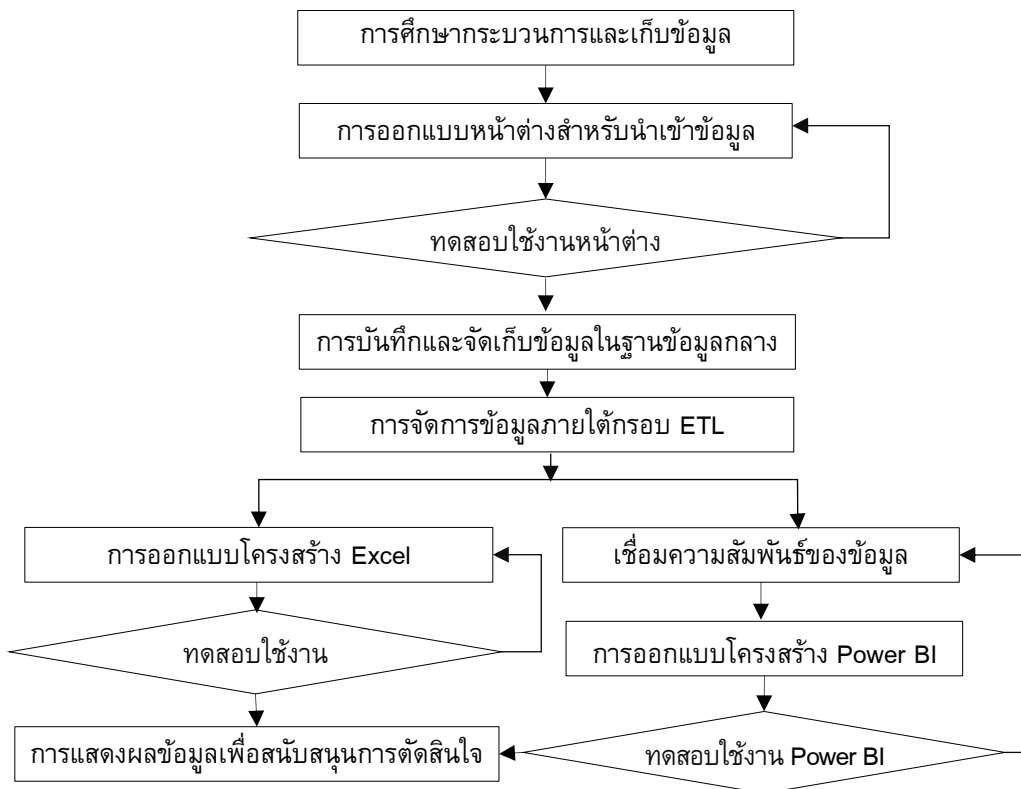
ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 2 พบว่า ความล่าช้าในกระบวนการ มีสาเหตุสำคัญมาจากการบันทึกและป้อนข้อมูลด้วยมือ การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบเอกสาร การขาดระบบดิจิทัลและฐานข้อมูลกลาง ตลอดจนการเชื่อมโยงข้อมูลที่ไม่เป็นระบบ ส่งผลให้ข้อมูลการจัดกระจายตรวจสอบล่าช้า และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล ประเด็นเหล่านี้สะท้อนถึงปัญหาของกระบวนการที่ทำให้การติดตามและการตัดสินใจขาดความน่าเชื่อถือและล่าช้า ดังนั้นแนวทางแก้ไขคือลดขั้นตอนการบันทึกและรวบรวมข้อมูลด้วยมือ สร้างฐานข้อมูลกลางที่เชื่อมโยงข้อมูลได้อย่างเป็นระบบ และจัดให้มีเครื่องมือแสดงผล เพื่อให้ข้อมูลการผลิตมีความพร้อมใช้งานถูกต้อง และสนับสนุนการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.4 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบแสดงผล

การกำหนดขั้นตอนการพัฒนาครอบคลุมตั้งแต่การนำเข้าข้อมูลจากหน้างาน การจัดเก็บในฐานข้อมูลกลาง การจัดการข้อมูลตามกรอบแนวคิดกระบวนการจัดการข้อมูล ETL (Extract-Transform-Load) [9] ไปจนถึงการแสดงผลในรูปแบบเอกสารและหน้าปัดแสดงผล โดยโครงสร้างการเชื่อมโยงข้อมูลจากหน้างานผ่านระบบจัดการข้อมูลสู่เครื่องมือแสดงผลตามรูปที่ 4 และภาพรวมขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 กระบวนการเชื่อมโยงข้อมูลจากหน้างานสู่การแสดงผล



รูปที่ 5 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาระบบแสดงผล

3.4.1 การออกแบบหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล

การออกแบบหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลเป็นขั้นตอนสำคัญของระบบดิจิทัล เนื่องจากเป็นจุดเชื่อมระหว่างผู้ปฏิบัติงานในสายการผลิตกับฐานข้อมูลกลางของโรงงาน มีขั้นตอนดังนี้

1) การสำรวจและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจสายการผลิตทั้งหมด 2 สาย พบว่า มีเอกสารในการบันทึกข้อมูลการผลิตรวมทั้งสิ้น 21 ฉบับ เอกสารส่วนใหญ่จดบันทึก 1 ครั้งต่อชั่วโมง และสายการผลิตเดินงาน 24 ชั่วโมงต่อวัน โดยเอกสารมีลักษณะและวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น รายงานการตรวจสอบคุณภาพค่าพารามิเตอร์ของเครื่องจักร และรายงานผลผลิต เอกสารมีช่องข้อมูลประมาณ 20-40 ช่องต่อการบันทึกหนึ่งครั้ง ส่งผลให้มีจำนวนช่องต่อสายการผลิต 1 สายมีข้อมูลรวมมากกว่า 10,000-16,000 ช่อง สะท้อนถึงภาระในการบันทึกข้อมูลและความซับซ้อนของกระบวนการ

2) การจัดกลุ่มข้อมูลและออกแบบโครงสร้างหน้าต่าง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถจัดกลุ่มตามลักษณะการใช้งาน เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานแยกประเภทข้อมูลได้เร็ว ลดความสับสนในการบันทึกข้อมูล และลดภาระทางความคิด ตัวอย่างการออกแบบหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลตามรูปที่ 6 ซึ่งแบ่งเป็น 3 หมวด ได้แก่

- ข้อมูลทั่วไป เช่น วันที่ เวลา ชื่อผู้ปฏิบัติงาน
- ข้อมูลกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ แรงดัน หรือค่าฟังก์ชันการตรวจสอบ
- ข้อมูลผลลัพธ์ เช่น ปริมาณของเสีย ผลการตรวจสอบ หรือหมายเหตุอื่นๆ

3) การออกแบบหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล

หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลถูกออกแบบตามหลักการออกแบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human-Computer Interaction: HCI) และปัจจัยด้านมนุษย์ (Human Factors) [6] เพื่อให้สอดคล้องกับลำดับการทำงานจริงของผู้ปฏิบัติงาน และช่วยลดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล โดยได้ประยุกต์ใช้หลักการสำคัญ ดังนี้

- Poka-Yoke: การจำกัดช่วงค่าที่สามารถกรอกได้เพื่อป้องกันการกรอกข้อมูลผิดพลาด และแสดงสัญลักษณ์เตือนเมื่อผู้ใช้งานยังไม่ได้กรอกข้อมูลที่จำเป็น ดังรูปที่ 7(a) และ 7(b) ตามลำดับ

- Hick's Law: ใช้รายการแบบเลื่อนเพื่อจำกัดจำนวนตัวเลือกที่ผู้ใช้งานต้องพิจารณาในแต่ละครั้ง ช่วยลดภาระในการตัดสินใจและเพิ่มความรวดเร็วในการเลือกข้อมูล ตามรูปที่ 7(c)

- Fitts's Law: กำหนดขนาด ตำแหน่งของปุ่มและช่องในการกรอกข้อมูลให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อเพิ่มความสะดวกและลดเวลาในการป้อนข้อมูล ตามรูปที่ 6

4) การทดสอบการใช้งานและปรับปรุงฟอร์ม

หน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูลได้รับการทดสอบการใช้งานกับผู้ปฏิบัติงานจริง ผลการทดสอบถูกรวบรวมจากข้อเสนอแนะของผู้ใช้งาน เพื่อนำไปปรับปรุงรูปแบบของฟอร์ม เช่น การปรับ

ตำแหน่งช่องกรอกข้อมูล การเพิ่มตัวเลือกสินค้าให้ครบถ้วน และการปรับลำดับการบันทึกข้อมูลให้สอดคล้องกับแบบฟอร์มเดิมที่ผู้ใช้งานคุ้นเคย

Figure 6 displays four examples of different page layouts for data entry, illustrating the integration of Poka-Yoke and Hick's Law. The layouts are labeled with arrows indicating the flow of information: 'ข้อมูลทั่วไป' (General Information), 'ข้อมูลผลลัพธ์' (Production Results), and 'ข้อมูลทั่วไป' (General Information).

รูปที่ 6 ตัวอย่างการออกแบบหน้าต่างสำหรับนำเข้าข้อมูล

Figure 7 illustrates the application of Poka-Yoke and Hick's Law in the data entry process:

- (a) การจำกัดช่วงค่าของข้อมูลที่กรอก (Restricting the range of data entry): The 'Product type' dropdown menu is shown with options A, B, 10 mg., 20 mg., 30 mg., 40 mg., and 50 mg. The 'B' option is selected.
- (b) การแจ้งเตือนเมื่อข้อมูลไม่ครบถ้วน (Alert when data is incomplete): A red border highlights the 'สายการผลิต' (Production Line) field, which is required. The error message 'สายการผลิต is required' is displayed.
- (c) การใช้รายการแบบเลื่อนเพื่อลดจำนวนตัวเลือก (Using a dropdown menu to reduce the number of options): A dropdown menu is shown with the option 'ครั้งที่ 1' (Time 1) selected.

รูปที่ 7 การประยุกต์ใช้ Poka-Yoke และ Hick's Law

3.4.2 การจัดเก็บข้อมูลในฐานข้อมูลกลาง

ระบบที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้ระบบคลาวด์ของโรงงานที่มีอยู่เดิมเป็นฐานข้อมูลกลาง เนื่องจากโรงงานมีข้อจำกัดด้านการติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานใหม่ การเข้าถึงสิทธิ์การใช้งาน และระยะเวลาในการพัฒนา การเลือกใช้ระบบเดิมจึงเหมาะสมทั้งในด้านความต่อเนื่องของการใช้งาน ความปลอดภัยของข้อมูล และความสะดวกในการเชื่อมต่อกับระบบภายในขององค์กร

สถาปัตยกรรมของระบบออกแบบให้ข้อมูลจากหน้างานถูกส่งผ่าน API เข้าสู่ฐานข้อมูลกลางบนคลาวด์ จากนั้นดึงข้อมูลออกในรูปแบบ JSON เพื่อนำไปจัดการข้อมูลด้วย Power Query และโหลดเข้าสู่ Microsoft Excel และ Power BI เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และแสดงผล โดยกำหนดโครงสร้างฟิลด์ข้อมูลให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกฟอร์มเพื่อให้เชื่อมโยงและตรวจสอบย้อนกลับได้ง่าย นอกจากนี้ กำหนดระยะเวลาการจัดเก็บข้อมูลย้อนหลัง 2 ปี และใช้ระบบสำรองข้อมูลอัตโนมัติขององค์กรเพื่อลดความเสี่ยงจากการสูญหายของข้อมูล

3.4.3 การดึงข้อมูลและการจัดการข้อมูล

กระบวนการทั้งหมดถูกออกแบบภายใต้กรอบแนวคิด กระบวนการจัดการข้อมูล ETL (Extract-Transform-Load) [9] เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความครบถ้วน ถูกต้อง และพร้อมใช้งาน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การดึงข้อมูล (Extract) ข้อมูลที่ผู้ปฏิบัติงานกรอกผ่านหน้าต่างดิจิทัลจะถูกส่งเข้าสู่ฐานข้อมูลกลางบนระบบคลาวด์โดยอัตโนมัติ จากนั้นดึงออกผ่าน API ในรูปแบบ JSON ซึ่งเหมาะสำหรับการนำเข้าและประมวลผลด้วย Power Query

2) การแปลงและจัดการข้อมูล (Transform) ดำเนินการผ่าน Power Query แบบฟอร์มทั้ง 21 ฉบับมีโครงสร้างข้อมูลแตกต่างกัน จึงต้องปรับให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน โดยเริ่มจากการเลือกข้อมูลที่ต้องการใช้ จากข้อมูล JSON ที่ดึงมาผ่าน API ให้เหลือเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และการแสดงผล จากนั้นทำการแปลงและทำความสะอาดข้อมูล โดยแปลงโครงสร้างข้อมูลจาก JSON ให้เป็นตาราง กำหนดชนิดข้อมูลให้ถูกต้อง และการจัดการข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ เช่น ค่าว่างหรือค่าที่ผิดรูปแบบ เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องและพร้อมใช้งาน ต่อด้วยการจัดรูปแบบข้อมูลให้สอดคล้องกัน โดยอ้างอิงโครงสร้างข้อมูลกลางที่กำหนดมาตรฐานร่วมกันตลอดทั้งระบบ เช่น มาตรฐานหน่วยวัด รหัสสายการผลิต และรหัสจุดควบคุม เพื่อให้ข้อมูลจากหลายแหล่งสามารถเชื่อมโยงและเปรียบเทียบกันได้อย่างเป็นระบบ และสุดท้ายการบันทึกขั้นตอนการแปลงในรูปแบบ M Code เพื่อให้ข้อมูลทุกขั้นตอนสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

3) การโหลดข้อมูล (Load) ภายหลังจากการแปลงและจัดการข้อมูล ข้อมูลจะถูกโหลดเข้าสู่ระบบแสดงผลข้อมูล โดยทำการโหลดข้อมูลเข้าสู่โมเดลข้อมูลของ Microsoft Excel และ Power BI

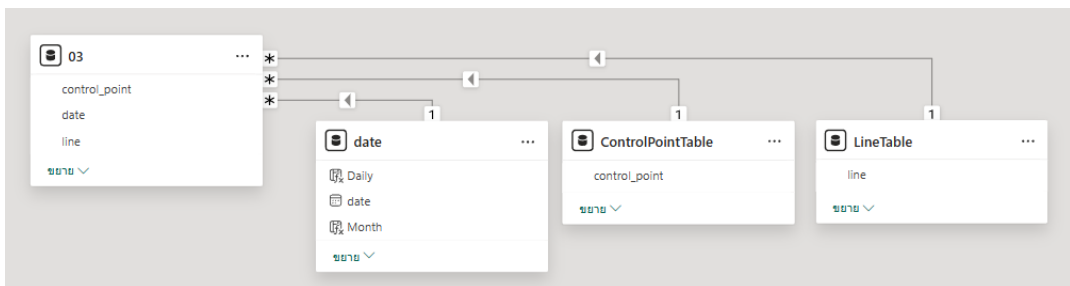
3.4.4 การออกแบบความสัมพันธ์ของข้อมูลเพื่อรองรับหน้าปัดแสดงผล

การออกแบบโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตาราง มุ่งเน้นให้การแสดงผลบนหน้าปัดแสดงผลมีความถูกต้อง แม่นยำ และรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลข้ามมิติได้อย่างเป็นระบบ โดยเลือก

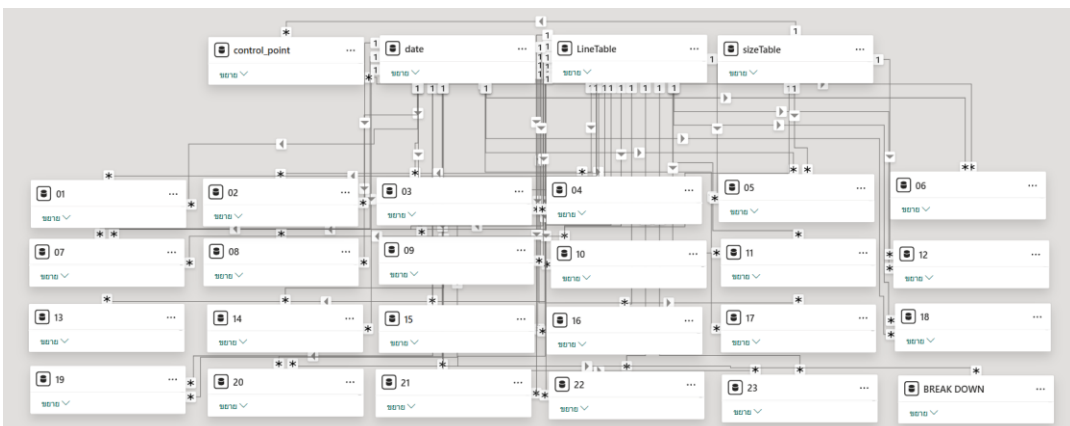
ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมแบบโครงสร้างรูปดาว (Star Schema) [13] กำหนดโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

- 1) ตารางข้อมูลเชิงมิติ: ได้แก่ ตารางเวลา (date) สายการผลิต (LineTable) และจุดควบคุม (ControlPointTable) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองหลักเพื่อใช้ในการควบคุมทิศทางข้อมูล
- 2) ตารางข้อมูลข้อเท็จจริง: คือตารางข้อมูลการผลิตและพารามิเตอร์ที่ถูกจัดเก็บรายชั่วโมงจากแบบฟอร์มดิจิทัล

การออกแบบความสัมพันธ์ใช้รูปแบบหนึ่งต่อกลุ่ม (1:*) และกำหนดทิศทางการกรองข้อมูลแบบทางเดียว ตัวอย่างการเชื่อมโยงข้อมูลเฉพาะจุดแสดงในรูปที่ 8 และภาพรวมการเชื่อมโยงข้อมูลทั้งหมดในรูปที่ 9 สถาปัตยกรรมนี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์เจาะลึกข้อมูลจากภาพรวมไปจนถึงรายละเอียดเฉพาะในระดับรายเครื่องจักรหรือรายจุดควบคุมได้อย่างเป็นระบบ



รูปที่ 8 ตัวอย่างความสัมพันธ์แบบโครงสร้างรูปดาวระหว่างตารางมิติและตารางข้อมูล



รูปที่ 9 ภาพรวมความสัมพันธ์ข้อมูลของระบบการจัดการข้อมูลการผลิตทั้งหมด

3.4.5 การแสดงผลข้อมูล

การแสดงผลข้อมูลมีระบบที่พัฒนานี้เพื่อรองรับการแสดงผล ดังนี้

1) การแสดงผลข้อมูลในรูปแบบเอกสาร Microsoft Excel

รูปแบบเอกสารถูกออกแบบให้มีโครงสร้างสอดคล้องกับเอกสารเดิมของโรงงาน เพื่อลดภาระการเรียนรู้ใหม่ของพนักงาน ข้อมูลถูกเชื่อมต่อกับ Power Query เพื่อจัดวางพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันทุกเอกสาร เพิ่มความชัดเจนในการตรวจสอบ และประยุกต์ใช้สีเตือนตามมาตรฐานสากล ได้แก่ สีแดงสำหรับค่าที่ผิดปกติ สีเหลืองสำหรับค่าเฝ้าระวัง และสีเขียวสำหรับค่าปกติ แสดงดังในรูปที่ 10

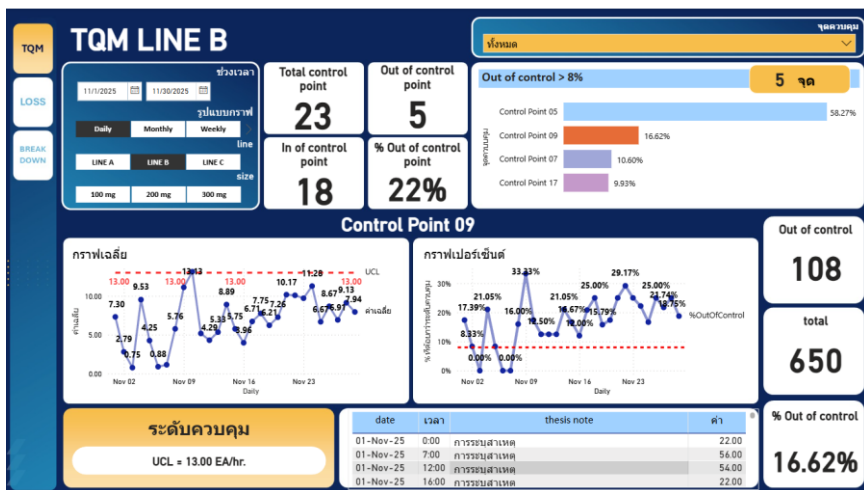
บริษัท XXXX																				
แผนก วัสดุ A																				
บันทึกการควบคุม XXXX																				
															รวมรอบๆแถวควบคุม			50 EA		
หน่วย บรรจุ	วันที่	เวลา	Product type	Input	Good	จำนวน Reject รวม	จุดควบคุม จำนวน Reject ต่อ ชั่วโมง	X	X	X	X	X	สาเหตุการแก้ไข เมื่อเกินระดับควบคุม เลขที่ใบแจ้งซ่อม (กรณีข้ามแก้ไข)	จุดควบคุม ควบคุม สถานะการผ่าน	สาเหตุการแก้ไข เมื่อเกินระดับควบคุม เลขที่ใบแจ้งซ่อม (กรณีข้ามแก้ไข)	XXX	หมายเหตุ	ชื่อ ผู้รายงาน	ลายเซ็น	
line A	06/02/26	00:00	Type B	100 mg.	13,248	13,226	22	22	0	1	0	12	10	เกินกว่าอย่าง	ผ่าน		10	Start Line	น/บ A	data:image
line A	06/02/26	01:00	Type B	100 mg.	59,981	59,958	23	1	0	1	0	12	10					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	02:00	Type B	100 mg.	119,733	119,710	23	0	1	1	0	12	10					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	03:00	Type B	100 mg.	119,733	119,709	24	1	1	1	0	12	10					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	03:30	Type B	100 mg.	158,395	158,361	34	10	4	8	0	12	10				8	น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	05:00	Type A	150 mg.	17,535	17,534	1	1	0	1	0	0	0		ผ่าน			น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	06:00	Type A	150 mg.	45,846	45,845	1	0	0	1	0	0	0					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	07:00	Type A	150 mg.	83,943	83,942	1	0	0	1	0	0	0					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	08:00	Type A	150 mg.	149,706	149,587	119	118	0	1	88	10	20	เกินกว่าอย่าง			21	น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	09:00	Type A	150 mg.	190,086	189,967	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	10:00	Type A	150 mg.	240,500	240,381	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	11:00	Type A	150 mg.	306,800	306,681	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	12:00	Type A	150 mg.	365,000	364,881	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	13:00	Type A	150 mg.	428,671	428,552	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	14:00	Type A	150 mg.	448,493	448,374	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	15:00	Type A	150 mg.	496,040	495,921	119	0	0	1	88	10	20					น/บ A	data:image	
line A	06/02/26	16:00	Type A	150 mg.	552,678	552,537	141	22	0	2	88	21	30	เกินกว่าอย่าง			11	น/บ A	data:image	

รูปที่ 10 หน้าปัดแสดงผลข้อมูลบน Microsoft Excel

2) การแสดงผลข้อมูลในรูปแบบหน้าปัดแสดงผลบน Power BI

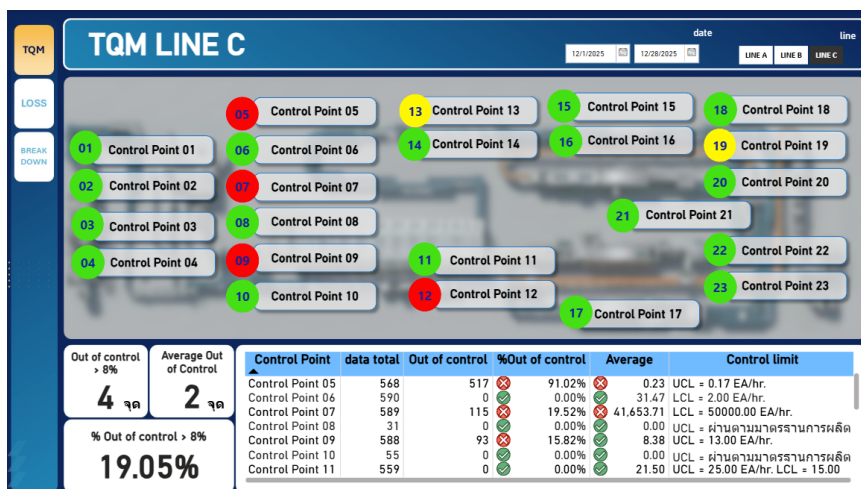
การออกแบบหน้าปัดแสดงผลมุ่งเน้นความยืดหยุ่นและการโต้ตอบ เพื่อให้ครอบคลุมความต้องการของผู้ใช้งานตั้งแต่ระดับปฏิบัติการจนถึงระดับบริหาร โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนสำคัญ ดังนี้:

- หน้าปัดแสดงผลสถานะการควบคุมคุณภาพ: ออกแบบมาเพื่อสนับสนุนการติดตามดัชนีชี้วัดรายจุดควบคุมโดยใช้กราฟควบคุมเชิงสถิติ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถระบุความผิดปกติของพารามิเตอร์ได้ทันทีตามหลักของ ISO 9241 ซึ่งให้ผู้ใช้เลือกดูข้อมูลได้ แสดงตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 หน้าปัดแสดงผลสถานะการควบคุมคุณภาพสำหรับติดตามตัวชี้วัดรายจุดควบคุม

- หน้าปัดแสดงผลภาพรวมสถานะการผลิต: เป็นการสรุปสถานะการผลิตรายจุดควบคุมในหน้าจอเดียว โดยใช้รหัสสีที่ชัดเจนเพื่อสื่อสารสถานะของกระบวนการ เพื่อให้ผู้ใช้เข้าใจสถานการณ์ได้ทันที แสดงตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 หน้าปัดแสดงผลภาพรวมสถานะการผลิตรายจุดควบคุม

- หน้าปัดแสดงผลการวิเคราะห์ความสูญเสีย: ทำหน้าที่จำแนกประเภทและตำแหน่งของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการ ช่วยให้หัวหน้างานสามารถระบุจุดที่ต้องปรับปรุงได้อย่างแม่นยำ แสดงตามรูปที่ 13



รูปที่ 13 หน้าปัดแสดงผลการวิเคราะห์ความสูญเสียในกระบวนการ

- หน้าปัดแสดงผลการวิเคราะห์การหยุดชะงักของเครื่องจักร: มุ่งเน้นการแสดงสถิติเวลาสูญเสียและสาเหตุการหยุดทำงานของเครื่องจักร รองรับการวิเคราะห์เจาะลึกให้ผู้ใช้งานควบคุมการกรองข้อมูลเพื่อหาสาเหตุของปัญหาได้อย่างอิสระ แสดงตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 หน้าปัดแสดงผลการวิเคราะห์การหยุดชะงักของเครื่องจักร

3.5 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบ

ประเมินความเหมาะสมของการลงทุนในการพัฒนาระบบดิจิทัลสำหรับการจัดการข้อมูลการผลิต ใช้การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการลงทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับจากการปรับปรุงกระบวนการทำงาน ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมิน

ประกอบด้วย อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

4. ผลการวิจัย

4.1 การแปลงข้อมูลในรูปแบบเอกสารการผลิตสู่ระบบดิจิทัล

งานวิจัยนี้พัฒนาระบบดิจิทัลเพื่อแปลงข้อมูลการผลิตจากรูปแบบเอกสารกระดาษให้เป็นฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ โดยออกแบบสถาปัตยกรรมระบบเชื่อมโยงข้อมูลจากพื้นที่การผลิตผ่านแบบฟอร์มดิจิทัลจำนวน 21 ฟอร์ม เข้าสู่ฐานข้อมูลกลางของโรงงาน จากนั้นใช้ Power Query เพื่อแปลงและจัดรูปแบบข้อมูลก่อนส่งต่อไปยัง Microsoft Excel และ Power BI เพื่อใช้ในการแสดงผลและวิเคราะห์ข้อมูล โครงสร้างดังกล่าวช่วยลดการกรอกข้อมูลการผลิตที่ซ้ำซ้อน เพิ่มความถูกต้องของข้อมูล และสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารและหัวหน้าสายการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

4.2 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงระบบดิจิทัลสำหรับการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลการผลิต พบว่าการพัฒนาระบบสามารถลดจำนวนขั้นตอนการดำเนินงานจากเดิม 9 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน และลดเวลาการทำงานรวมจาก 511.40 ชั่วโมงต่อปี เหลือ 184.22 ชั่วโมงต่อปี ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 15 มีความแตกต่างของเวลาการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุงอย่างชัดเจน โดยเวลาที่ลดลงส่วนใหญ่มาจากการตัดขั้นตอนที่ไม่สร้างคุณค่า ได้แก่ การจัดทำไฟล์สำหรับป้อนข้อมูล การป้อนข้อมูลลงไฟล์ และการรวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ สามารถลดเวลาการทำงานได้มากถึง 327.18 ชั่วโมงต่อปี คิดเป็นร้อยละ 63.98

การวิเคราะห์นัยสำคัญทางสถิติของการลดขั้นตอนการดำเนินงาน ทำการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติด้วย One-Sample t-test [14] เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการตัดกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่า จำนวน 3 กิจกรรมหลัก โดยกำหนดค่าเป้าหมายผลต่างของเวลาให้เท่ากับ 0 ในหน่วยนาที่ ผลการทดสอบพบว่าระยะเวลาที่เคยใช้ในอดีตมีความแตกต่างจากค่าเป้าหมายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังนี้

1) การจัดทำไฟล์สำหรับป้อนข้อมูล: มีค่าเฉลี่ยเวลาเดิม 519.20 นาที่/ครั้ง มีค่าสถิติทดสอบ $t = 31.09$ และค่า $p < 0.001$

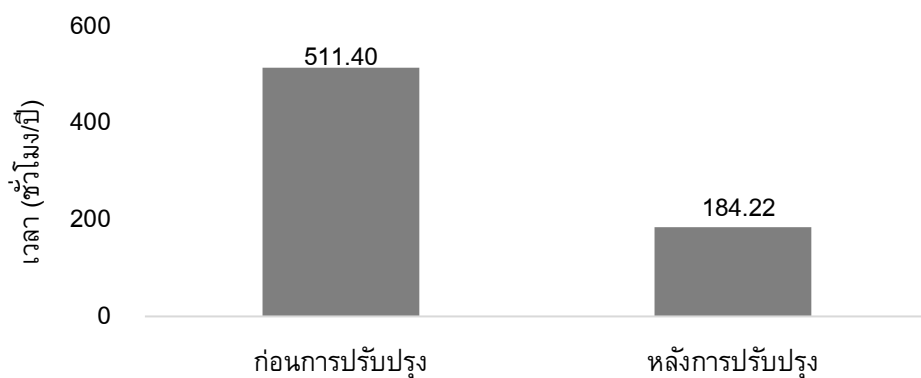
2) การป้อนข้อมูลลงไฟล์ Microsoft Excel: มีค่าเฉลี่ยเวลาเดิม 16.40 นาที่/ครั้ง มีค่าสถิติทดสอบ $t = 41.00$ และค่า $p < 0.001$

3) การรวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์: มีค่าเฉลี่ยเวลาเดิม 298.10 นาที/ครั้ง มีค่าสถิติทดสอบ $t = 22.96$ และค่า $p < 0.001$

ผลการทดสอบข้างต้นยืนยันว่า การปรับปรุงโดยการตัดขั้นตอนที่ไม่สร้างคุณค่าออกและทดแทนด้วยระบบดิจิทัล ส่งผลให้เกิดการลดระยะเวลาการทำงานได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งช่วยสนับสนุนผลลัพธ์การลดเวลาการทำงานรวมร้อยละ 63.98ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

หมวดหมู่	รายการ	เวลารวมต่อปี (ชั่วโมง)	
		ก่อน	หลัง
กำหนดจุดควบคุม	1 การประเมินคัดเลือกจุดควบคุม	25.68	25.68
กำหนดระดับ	2 ขั้นตอนการหาระดับควบคุม	57.20	57.20
ควบคุม	3 การประชุมกำหนดระดับควบคุม	16.80	16.80
กำหนดจุดตรวจสอบ	4 การจัดการประชุมเพื่อหาแนวปรับปรุง	19.26	19.26
การติดตาม	5 การจัดทำไฟล์สำหรับป้อนข้อมูล	18.54	0
กระบวนการ	6 การป้อนข้อมูลลงไฟล์ Microsoft Excel	180.96	0
	7 การรวบรวมข้อมูลสำหรับวิเคราะห์	127.68	0
	8 การประชุมติดตามผล	65.28	65.28
ทบทวน	9 กำหนดรอบความถี่	-	-
เวลารวมทุกกิจกรรม (ชั่วโมงต่อปี)		511.40	184.22
จำนวนกิจกรรม (ขั้นตอน)		9	6



รูปที่ 15 เวลาก่อนการปรับปรุงเทียบหลังการปรับปรุง

นอกจากนี้ ระยะเวลาในการเข้าถึงข้อมูลลดลงจากเวลาเฉลี่ยประมาณ 24 ชั่วโมงต่อครั้ง เหลือ 1 ชั่วโมงต่อครั้ง และความผิดพลาดจากการป้อนข้อมูลลงไฟล์เฉลี่ย 15 ครั้งต่อเดือน ลดลงเหลือ 0 ครั้งต่อเดือน เนื่องจากการยกเลิกขั้นตอนการป้อนข้อมูลลงไฟล์ และระบบดิจิทัลยังสนับสนุนการประชุมติดตามผลผ่านหน้าปัดแสดงผลบน Power BI ช่วยลดภาระการจัดทำรายงานในรูปแบบเอกสาร และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงข้อมูล

4.3 การวิเคราะห์ด้านต้นทุน

จากการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานก่อนและหลังการพัฒนาระบบดิจิทัลสำหรับการจัดการข้อมูลการผลิต พบว่าค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่อปีลดลงจาก 85,882.74 บาท เหลือ 16,260.76 บาท คิดเป็นผลประหยัดรวม 69,621.98 บาทต่อปี ทั้งนี้ สาเหตุหลักของการลดต้นทุนมาจากการยกเลิกการใช้เอกสารกระดาษ และการลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่สร้างคุณค่า ซึ่งส่งผลให้ค่าแรงงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบต้นทุนก่อนและหลังการพัฒนาระบบ

รายการ	ก่อน (บาท/ปี)	หลัง (บาท/ปี)	ผลต่าง (บาท/ปี)	หมายเหตุ
ค่ากระดาษและค่าถ่ายเอกสาร	48,703.20	0	48,703.20	ยกเลิกการใช้กระดาษ
ค่าแรงที่ลดลงจากการปรับปรุง	37,179.54	0	37,179.54	ลดลง 327.18 ชั่วโมง
ค่าใช้จ่ายพื้นที่จัดเก็บข้อมูล	0	5,995.20	- 5,995.20	
ค่าโปรแกรมแสดงผลข้อมูล	0	6,216.00	- 6,216.00	จำนวน 1 ผู้ใช้
ค่าบริการอีเมลองค์กร	0	4,049.56	- 4,049.56	จำนวน 2 ผู้ใช้
รวมทั้งหมด	85,882.74	16,260.76	69,621.98	ลดลง 81.07%

เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ จากการคำนวณตามสมการที่ (1) พบว่า เมื่อใช้ต้นทุนการลงทุนรวม 159,200 บาท และผลประหยัดต่อปี 69,621.98 บาท ระบบดิจิทัลที่พัฒนามีอัตราผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment: ROI) เท่ากับร้อยละ 43.73 ต่อปี สะท้อนว่าการลงทุนสามารถสร้างผลตอบแทนได้ในระดับที่เหมาะสม นอกจากนี้ จากการคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ตามสมการที่ (2) พบว่าระบบสามารถคืนทุนได้ภายใน 2 ปี 3 เดือน ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบดิจิทัล

5. สรุปผลและอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบดิจิทัลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการข้อมูลการผลิตในโรงงานกรณีศึกษา โดยผลการวิจัยสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

1) ด้านประสิทธิภาพกระบวนการ: ระบบสามารถลดขั้นตอนการทำงานลงได้ร้อยละ 33.33 โดยลดขั้นตอนจาก 9 ขั้นตอน เหลือ 6 ขั้นตอน และลดเวลาการทำงานรวมลงได้ถึงร้อยละ 63.98 โดยลดเวลาจาก 511.40 ชั่วโมงต่อปี เหลือ 184.22 ชั่วโมงต่อปี ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการตัดกิจกรรมที่ไม่สร้างคุณค่าในขั้นตอนการจัดการเอกสาร

2) ด้านคุณภาพข้อมูล: ความผิดพลาดจากการป้อนข้อมูลลดลงจากเฉลี่ย 15 ครั้งต่อเดือน เหลือ 0 ครั้งต่อเดือน เนื่องจากการตัดขั้นตอนการป้อนข้อมูลออกทั้งหมด ส่งผลให้ความผิดพลาดลดลงเหลือ 0 ครั้งต่อเดือน และความเร็วในการเข้าถึงข้อมูลเพื่อการตัดสินใจเพิ่มขึ้น โดยลดเวลาการรอคอยข้อมูลจาก 24 ชั่วโมง เหลือเพียง 1 ชั่วโมง

3) ด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์: โครงการนี้ให้ผลตอบแทนจากการลงทุนร้อยละ 43.73 ต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2 ปี 3 เดือน สะท้อนถึงความคุ้มค่าในการปรับเปลี่ยนสู่ระบบดิจิทัลในระดับปฏิบัติการ

5.2 อภิปรายผล

ผลจากการพัฒนาระบบดิจิทัลแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่เป็นรูปธรรม ซึ่งสามารถอภิปรายเชิงลึกตามประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1) การกำจัดความผิดพลาดของข้อมูล: สาเหตุที่ระบบสามารถลดความผิดพลาดในการป้อนข้อมูลเหลือ 0 ครั้งต่อเดือน คือกลไกการตรวจสอบข้อมูล ณ จุดบันทึก โดยระบบฟอร์มดิจิทัลถูกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตข้อมูล และบังคับการกรอกข้อมูลที่จำเป็น ซึ่งแตกต่างจากระบบเดิมที่พึ่งพาการจดบันทึกด้วยมือแล้วนำมาป้อนลงไฟล์ซ้ำภายหลัง

2) การเชื่อมโยงมิติข้อมูลและความคล่องตัวในการตัดสินใจ: การเลือกใช้สถาปัตยกรรมข้อมูลแบบดาว (Star Schema) ทำให้หน้าปัดแสดงผลมีความคล่องตัวสูงกว่างานของ Clausen [2] ที่เน้นเพียงการมองเห็น เนื่องจากระบบในงานวิจัยนี้สนับสนุนการวิเคราะห์เจาะลึกจากดัชนีชี้วัดภาพรวมระดับโรงงานลงสู่รายละเอียดรายเครื่องจักรได้ทันที ผลที่ได้สอดคล้องกับงานของ Sorour and Atkins [5] ในแง่การใช้เครื่องมือ Power BI ที่เหมาะสมกับทรัพยากรขององค์กร แต่ให้ผลลัพธ์ที่รวดเร็วกว่าเนื่องจากการแปลงข้อมูลที่เป็นระบบตั้งแต่ต้นทาง

3) การตอบสนองต่อผู้ใช้งานตามมาตรฐาน HCI: ความสำเร็จในการลดเวลาเข้าถึงข้อมูลเหลือ 1 ชั่วโมง เป็นผลจากการพัฒนาระบบดิจิทัลและการออกแบบหน้าจอที่ช่วยให้ผู้ใช้งานในระดับ

ปฏิบัติการและระดับบริหารเข้าใจสถานะการผลิตได้ทันทีผ่านรหัสสี โดยไม่ต้องเสียเวลาตีความตัวเลข

5.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1) การป้อนข้อมูลด้วยมนุษย์: แม้ระบบจะเปลี่ยนเป็นดิจิทัล แต่ยังคงต้องพึ่งพาการป้อนข้อมูลผ่านแบบฟอร์มโดยพนักงาน ซึ่งอาจมีความล่าช้าหากเกิดเหตุวิกฤตพนักงานที่พนักงานไม่สามารถบันทึกข้อมูลได้ทันที

2) ปัจจัยทางอารมณ์และนามธรรม: การประเมินผลยังไม่ได้ครอบคลุมปัจจัยเชิงคุณภาพ เช่น ความพึงพอใจเชิงลึกของพนักงาน เป็นต้น

3) ขอบเขตกรณีศึกษา: ผลการวิจัยเป็นข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมเพียงแห่งเดียว ซึ่งอาจมีปัจจัยด้านวัฒนธรรมองค์กรหรือทักษะทางดิจิทัลของพนักงานที่แตกต่างจากอุตสาหกรรมอื่น

5.4 ข้อเสนอแนะ

1) การพัฒนาสู่ระบบอัตโนมัติ (IoT Integration): ในอนาคตควรมีการขยายผลโดยการเชื่อมต่อเซนเซอร์จากเครื่องจักรเข้าสู่ระบบโดยตรง เพื่อลดการพึ่งพาพนักงานในการบันทึกข้อมูลและเพิ่มความรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูล

2) การใช้เทคโนโลยีวิเคราะห์เชิงพยากรณ์: ควรนำฐานข้อมูลที่จัดเก็บไว้ไปต่อยอดด้วยระบบพยากรณ์แนวโน้มการเกิดของเสียหรือการหยุดชะงักของเครื่องจักรล่วงหน้า

3) การประเมินความคุ้มค่าเชิงลึก: ควรมีการวิเคราะห์ผลประโยชน์ทางอ้อม และการคำนวณมูลค่าในอนาคตเพิ่มเติมเพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางของ Pshychenko [7] ในการประเมินโครงการดิจิทัลระดับองค์กรขนาดใหญ่

References

- [1] Office of Industrial Economics. Quarterly and annual industrial situation report [Internet]. 2567 [cited 2026 Apr 12]. Available from: <https://shorturl.asia/tiN0z>. (In Thai).
- [2] Clausen P. Towards the Industry 4.0 agenda: practitioners' reasons why a digital transition of shop floor management visualization boards is warranted. Digital Business 2023;3(2):100063. doi: 10.1016/j.digbus.2023.100063.
- [3] Schmitt T, Viklund P, Sjolander M, Hanson L, Amouzgar K, Urenda Moris M. Augmented reality for machine monitoring in industrial manufacturing: framework and application development. Procedia CIRP 2023;120:1327-32. doi: 10.1016/j.procir.2023.09.171.

- [4] Kumbhar M, Ng Amos HC, Bandaru S. A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks. *Journal of Manufacturing Systems* 2023;66:92-106. doi: 10.1016/j.jmsy.2022.11.016.
- [5] Sorour A, Atkins AS. Big data challenge for monitoring quality in higher education institutions using business intelligence dashboards. *Journal of Electronic Science and Technology* 2024;22(1):100233. doi: 10.1016/j.jnlest.2024.100233.
- [6] International Organization for Standardization. ISO 9241-210:2019 Ergonomics of human-system interaction-part 210: human-centred design for interactive systems. Geneva: ISO; 2019.
- [7] Pshychenko D. Methodology for calculating ROI to assess the effectiveness of implementing digital solutions in production systems taking into account operating and capital expenditures. *European Journal of Economic and Financial Research* 2025;9(5):46-57. doi: 10.46827/ejefr.v9i5.2061.
- [8] Ploypanichcharoen K. TQM: Total quality management. Bangkok: TPA Publishing; 2014. (In Thai)
- [9] Rungrattanaubol J. Data mining techniques. Phitsanulok: Naresuan University Publishing House; 2023 (In Thai).
- [10] Intujunyong S. Business Intelligence with management, planning, and decision making. *Journal of Business Administration* 2013;36(137):3-7. (In Thai)
- [11] Jaisue P, Sirioran P. Reducing search time for quality documents using ECRS techniques and developing a systematic document storage database. *Thai Industrial Engineering Network Journal* 2024;10(2):74-83. (In Thai)
- [12] Klomjit P. Productivity improvement: principle and practice. Bangkok: SE-EDUCATION; 2014. (In Thai).
- [13] Thantilage RD, Le-Khac NA, Kechadi M-T. Healthcare data security and privacy in data warehouse architectures. *Informatics in Medicine Unlocked* 2023;39:101270. doi: 10.1016/j.imu.2023.101270.
- [14] Wongdee P. Statistics for fundamental research. Bangkok: Chulalongkorn University Press; 2024 (In Thai).

ประวัติผู้เขียนบทความ

กรกนก ยิ้มพลาย นักศึกษาปริญญาโทหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อ.เมือง จ.นครปฐม 73000 โทรศัพท์ 063-6630756 Email: Kornkanok.yimpany@gmail.com



กวินธร สัยเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อ.เมือง จ.นครปฐม 73000 โทรศัพท์ 098-2493951 Email: saicharoen_k@silpakorn.edu



ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ เลขที่ 6 ถนนราชมรรคาใน อ.เมือง จ.นครปฐม 73000 โทรศัพท์ 089-7221410 Email: saelem_s@silpakorn.edu

Article History:

Received: February 15, 2026

Revised: June 10, 2026

Accepted: June 11, 2026

อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงลม INFLUENCE OF ROW CONFIGURATION OF SOLAR PANELS ON WIND LOAD COEFFICIENTS

จิรวัดน์ จันทรเรือง¹ และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ^{2*}

¹อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{2*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, bvirote@engr.tu.ac.th

Jirawat Junruang¹ and Virote Boonyapinyo^{2*}

¹Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{2*}Lecturer, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering, Thammasat University,
99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District, Pathumthani 12120, Thailand,
bvirote@engr.tu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบในอุโมงค์ลมและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในสภาวะคงตัวแบบ 2 มิติด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน k- ω SST เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่อโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและแบบเรียงแถวชนิดติดตั้งบนพื้นดินในเขตที่โล่ง ผลการศึกษาพบว่าโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวมีสัมประสิทธิ์แรงดันสูงสุดที่มุมเอียง (θ) 40 องศา โดยในช่วงมุมเอียง 15 ถึง 40 องศา มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 เล็กน้อยถึงปานกลาง กรณีแบบเรียงแถวพบว่าสัมประสิทธิ์แรงลมและโมเมนต์มีค่าต่ำกว่าแผงเดี่ยวในทุกมุมเอียง โดยเฉพาะแผงด้านในที่ได้รับอิทธิพลจากการกำบัง ส่งผลให้ความเร็วลมและการแยกตัวของกระแสลมลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ผลวิเคราะห์จาก CFD พบความคลาดเคลื่อนจากผลทดสอบในอุโมงค์ลมร้อยละ 5-17 เนื่องด้วยข้อจำกัดของการจำลองสภาวะคงตัวของแบบจำลอง 2 มิติที่ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมการแยกตัวของกระแสลมแบบ 3 มิติที่ซับซ้อนได้อย่างสมบูรณ์ งานวิจัยนี้ช่วยสร้าง

ความเข้าใจต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศ เพื่อนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างรับแรงลมของระบบโซลาร์เซลล์ให้มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: อุโมงค์ลม, แผงโซลาร์เซลล์, สัมประสิทธิ์แรงลม, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ABSTRACT

This study utilizes wind tunnel testing and 2D steady-state Computational Fluid Dynamics (CFD) employing the k- ω SST turbulence model to evaluate the wind force coefficients acting on ground-mounted solar panels in single and row configurations situated in open terrain. Results indicate that single panels exhibit maximum normal force at a 40° tilt, slightly to moderately exceeding JIS C 8955 standards between 15° and 40°. In contrast, row configurations show significantly lower coefficients due to the shielding effect, particularly on inner panels where flow separation is reduced. Additionally, the CFD analysis revealed a 5–17% discrepancy compared to the wind tunnel test results. This deviation is attributed to the inherent limitations of 2D steady-state simulations, which cannot fully replicate complex 3D flow separation behaviors. These findings provide critical insights for optimizing the structural safety and efficiency of solar array designs against wind loads.

KEYWORDS: wind tunnel test, solar panels, aerostatic coefficients, computational fluid dynamic

1. บทนำ

ปัจจุบันการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อน ไปจนถึงการผลิตกระแสไฟฟ้า โซลาร์เซลล์จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากลักษณะของโซลาร์เซลล์ที่ต้องติดตั้งกลางแจ้งจึงได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เช่น ลม และแผ่นดินไหวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากแรงลม ในอดีตแผงโซลาร์เซลล์มักติดตั้งบนหลังคาหรือดาดฟ้าของที่พักอาศัย [1-4] ส่งผลให้มีการการศึกษาผลของแรงลมที่มีต่อแผงโซลาร์เซลล์พบว่าพฤติกรรมของแรงลมเมื่อกระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์แล้ว เกิดการไหลของกระแสลมบริเวณผิวหลังคาและระยะระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ ส่งผลต่อกระแสลมจากแผงหนึ่งไปยังอีกแผงหนึ่ง และส่งผลให้ลักษณะการปะทะของแรงลมเปลี่ยนแปลงไปจากกรณีการพิจารณาแผงโซลาร์เซลล์แบบอิสระ [3] นอกจากนี้ยังพบว่ามาตรฐาน ASCE 7-16 [5] ประเมินแรงดูดต่ำเกินไปถึง 34% ในกรณีการวางแผงแบบทั่วไป ในทางกลับกัน สำหรับแผงที่ติดตั้งบริเวณมุมหลังคาตามมาตรฐาน ASCE 7-16 [5] กลับประเมิน

แรงดูดสูงไปถึง 32% นอกจากนั้น Aly and Bitsuamlak [2] เสนอให้เลี่ยงการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ บริเวณมุมหลังคา

การติดตั้งโซลาร์เซลล์แบบเรียงเป็นแถวนั้น ทิศทางลม มุมเอียง ระยะห่าง และความสูงของแผง ล้วนส่งผลกระทบต่อรูปแบบการไหลของกระแสลมอย่างมีนัยสำคัญ ในปี ค.ศ. 2012 Ikeda et al [6] ทำการทดสอบโซลาร์เซลล์จัดเรียงเป็นกลุ่ม (สูงสุด 3 แถว 8 คอลัมน์) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลม สูงสุดเมื่อกระแสลมพัดเข้าทำมุม 30 องศา กับทิศทางด้านหน้าของกลุ่มแผง โดยตำแหน่งที่รับ แรงลมสูงสุดคือแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณมุมสุดฝั่งด้านหน้าที่ปะทะลม สอดคล้องกับผลการ ทดสอบในอุโมงค์ลมของ Ma et al [7] พบว่าการรบกวนของมุมเอียงต่อกระแสลมเหนือพื้นผิวแผง จะเพิ่มขึ้นตามองศาการติดตั้ง ในประเด็นของระยะห่างระหว่างแถว Shademan et al [8] ใช้ พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ในการศึกษา พบว่าเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยของแรงลม กระทำต่อโครงสร้างโดยรวมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนระยะห่าง โดย Sun et al [9] พบว่าภายใต้ ความเร็วลมต่ำ แรงต้านทานสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมเอียง 35 องศาและระยะห่าง 3 เมตรระหว่างกลุ่มแผง นอกจากนี้ Xu et al [10] เสนอว่าระยะห่างมีอิทธิพลอย่างมากต่อขนาดของกระแสน้ำวนด้านท้ายลม โดยระยะห่างที่น้อยจะบีบอัดกระแสน้ำวนจากแผงด้านหลัง ในขณะที่ระยะห่างที่กว้างขึ้นจะไม่ส่งผลต่อ ขนาดและรูปร่างของกระแสน้ำวนจากแผงหน้าอีกต่อไป ในส่วนของความสูง Smith et al [11] พบว่า การเพิ่มความสูงในการติดตั้งส่งผลต่อความเร็วของการไหลด้านล่างที่สูงขึ้น ซึ่งกระทบต่อกระแสน้ำวน ด้านหลังกลุ่มแผง ส่งผลให้ความเร็วลมเหนือพื้นผิวแผงด้านหลังเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเรียง แผงซ้อนกันยังก่อให้เกิดผลของการกำบัง โดยแรงลมกระทำแผงหน้าจะลดลง 10-15% เนื่องจากการ มีอยู่ของแผงหลัง [6] และแผงแถวแรกจะช่วยลดแรงลมกระทำต่อแผงแถวที่สอง [1, 6]

ในปัจจุบันประเทศไทย มีการติดตั้งโซลาร์เซลล์ในลักษณะจัดเรียงเป็นแถว (รูปที่ 1) ซึ่ง หากเกิดความเสียหายในจุดใดจุดหนึ่ง อาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทั้งหมด โดย ความเสียหายส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นที่บริเวณข้อต่อและจุดยึดแผง การศึกษาในอดีตมุ่งเน้นไปที่แรงลม ที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ซึ่งติดตั้งบนหลังคาอาคารเป็นหลัก ในขณะที่การศึกษาเกี่ยวกับ กลุ่มแผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนพื้นดินในลักษณะของฟาร์มโซลาร์เซลล์ยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้ปัจจุบันมาตรฐานแรงลมของประเทศไทยยังไม่ครอบคลุมถึงการออกแบบแผงโซลาร์ เซลล์ งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการทดสอบโซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและแบบที่จัดเรียงเป็นแถว ชนิดติดตั้งบนพื้นดินด้วยอุโมงค์ลม TU-AIT เพื่อศึกษาผลจากแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ รวมทั้งใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2 มิติเพื่ออธิบายกลไกการไหลของกระแสลมผ่าน โซลาร์เซลล์แบบแผงเดี่ยวและจัดเรียงเป็นแถวเพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ตัวอย่างแผงโซลาร์เซลล์แบบจัดเรียงแถว ในประเทศไทย

2. การทดลองและระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การทดสอบในอุโมงค์ลมแบบชั้นบรรยากาศ (boundary layer wind tunnel)

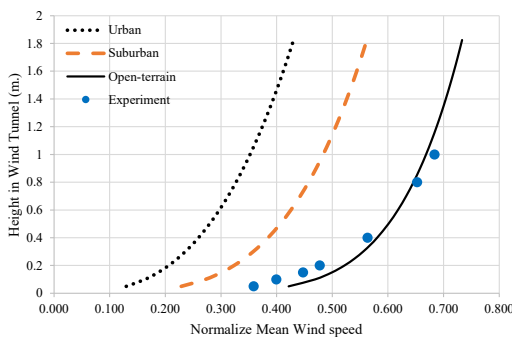
ก่อนทำการติดตั้งแบบจำลองโซลาร์เซลล์ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจำลองสภาวะชั้นบรรยากาศด้วยอุโมงค์ลม TU-AIT มีขนาด 2.5×2.5 เมตร และมีความยาว 25.5 เมตร (รูปที่ 2(ก)) สามารถสร้างความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 20 เมตรต่อวินาที และทำการตรวจวัดคุณลักษณะของกระแสลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (Hot-wire anemometer) แบบ 1 มิติ (รูปที่ 2(ข)) ด้วยอัตราการจับเก็บข้อมูล 1000 ข้อมูล/วินาที โดยทำการตรวจวัดโปรไฟล์ความเร็วลมแนวตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแท่นหมุน ผลการตรวจวัดความเร็วลมเฉลี่ยของงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานสภาพภูมิประเทศ ASCE 7-05 [12] ดังแสดงในรูปที่ 2(ค) ซึ่งสอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศแบบที่ 1 ในส่วนความเข้มความปั่นป่วนนั้น เนื่องจากแบบจำลองสเกล 1:20 มีขนาดค่อนข้างใหญ่ความเข้มความปั่นป่วนในชั้นบรรยากาศไม่สามารถจำลองในอุโมงค์ลมได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขนาดความยาวเฉลี่ย (integral scale) ของลมปั่นป่วนในอุโมงค์ลมมีค่ามากกว่า 2 ถึง 3 เท่าของมิติที่ใหญ่ที่สุดของแบบจำลอง ผลกระทบจากสเกลความปั่นป่วนจึงคาดว่าจะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ [13] เนื่องจากความเข้มชั้นของความปั่นป่วน ที่ได้จากการทดสอบกับการจำลองความปั่นป่วนในอุดมคติต่างกันไม่มาก ดังนั้นผลกระทบที่เกิดจากความเข้มชั้นของความปั่นป่วนจึงน่าจะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น พังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของความปั่นป่วนตามแนวยาวถูกเปรียบเทียบกับสเปกตรัม Von Karman ในรูปที่ 2(ง) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องที่ดี ดังนั้นการไหลที่จำลองในอุโมงค์ลม TU-AIT จึงเหมาะสมสำหรับการศึกษผลกระทบแรงลมในครั้งนี้



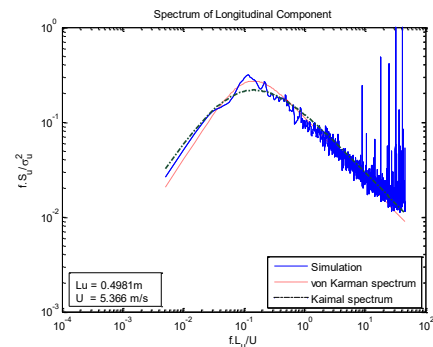
(ก)



(ข)



(ค)

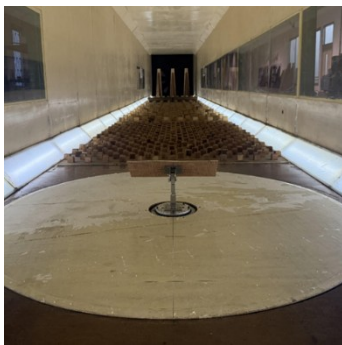


(ง)

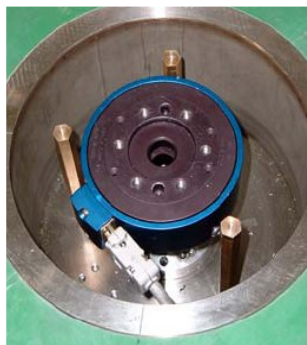
รูปที่ 2 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะกระแสลมในอุโมงค์ลมของงานวิจัยกับทฤษฎีและมาตรฐาน (ก) อุโมงค์ลม TU-AIT (ข) เครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน (ค) โปรไฟล์ความเร็วลมเฉลี่ยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASCE 7-05 [12] และ (ง) สเปกตรัมของความปั่นป่วนตามแนวยาว ณ ระดับความสูง 30 เซนติเมตร เปรียบเทียบกับสเปกตรัม Von Karman

แบบจำลองโซลาร์เซลล์ที่มีสเกล 1:20 สร้างขึ้นโดยใช้แบบจำลองที่แข็งแรงและมีน้ำหนักเบาทำจากไม้อัดมีขนาด 206 x 509 x 7 mm (ลึก(L) x กว้าง(W) x ความหนา(t)) เสารองรับทำจากเหล็กกล่องสูง 230 mm พร้อมกลไกที่สามารถปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์ได้แสดงในรูปที่ 3 จากนั้นทำการติดตั้งบนเซ็นเซอร์วัดแรง ซึ่งยึดติดบนแท่นหมุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เมตร ซึ่งสามารถจำลองทิศทางลมใด ๆ ได้โดยการหมุนแบบจำลองไปยังมุมที่เหมาะสมภายในอุโมงค์ลม จากนั้นปล่อยกระแสลมไหลผ่านด้วยความเร็วลม 7.61 m/s (ที่ความสูงเฉลี่ยโซลาร์เซลล์, H) มีค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) เท่ากับ 1.01×10^5 เมื่อคำนวณจากความยาวคอर्ड (L) ของแบบจำลอง แม้ว่าค่า Re ในการทดสอบจะต่ำกว่าสภาวะการใช้งานจริง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์มีลักษณะทางอากาศพลศาสตร์เป็นวัตถุด้านแหลมขอบเหลี่ยม (sharp-edged bluff body) จุดแยกตัว

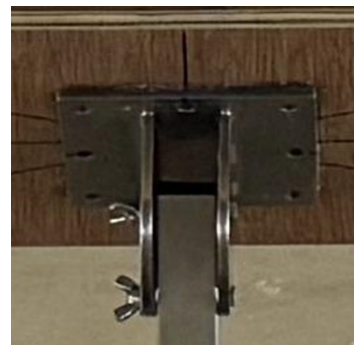
ของการไหลเกิดขึ้นที่ขอบแฉ่งอย่างชัดเจน ทำให้ลักษณะการไหลและค่าสัมประสิทธิ์แรงลมไม่ขึ้นกับค่าเรย์โนลด์ในสภาวะที่ $Re > 10^4$ ผลการทดสอบจึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของพฤติกรรมแรงลมในสภาวะจริงได้อย่างเหมาะสม จากนั้นทำการบันทึกค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกจากอุปกรณ์วัดแรงในทิศทางแกน X และ Z และ โมเมนต์รอบแกน Y ด้วยอัตราการจัดเก็บ 1000 ข้อมูลต่อ 1 วินาทีจัดเก็บเป็นระยะเวลา 60 วินาที ต่อ 1 มุมเอียงโดยมีรูปแบบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้ในแต่ละความเร็วลมถูกแปลงเป็นค่าแรงเฉลี่ย โดยการคูณกับเมทริกซ์การสอบเทียบของอุปกรณ์วัดแรงซึ่งได้จากการสอบเทียบแยกต่างหาก



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3 (ก) แบบจำลองโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว ขนาด 1:20 (ข) อุปกรณ์วัดแรงติดตั้งที่ฐานแบบจำลอง และ (ค) กลไกปรับมุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์

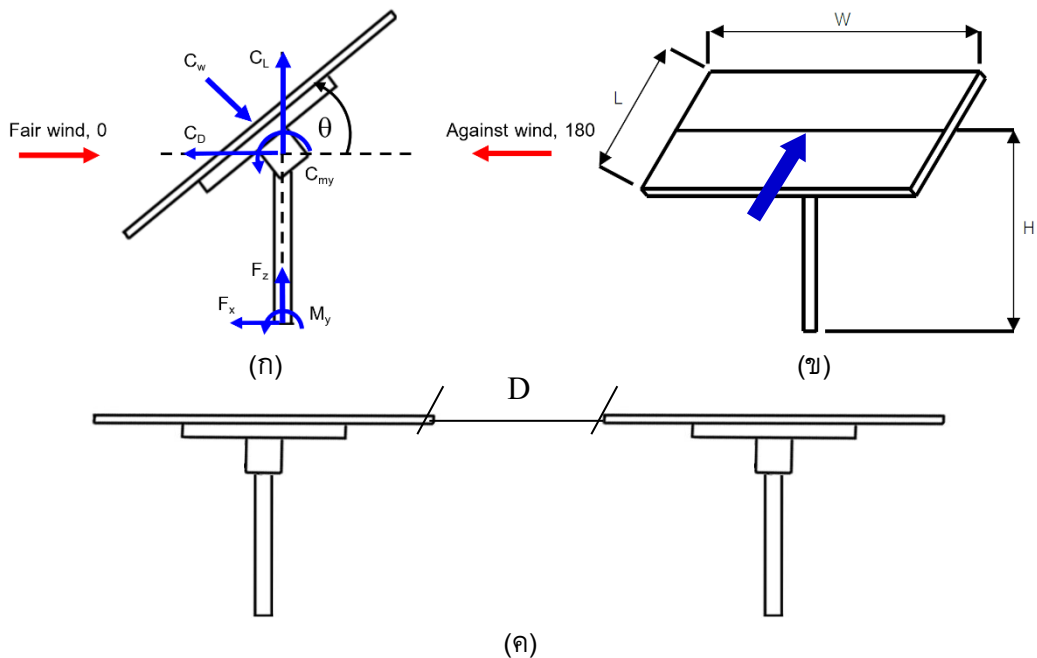
ตารางที่ 1 รูปแบบการทดสอบแผงโซลาร์เซลล์ในอุโมงค์ลม

จำนวนแผงโซลาร์เซลล์	มุมบิดโซลาร์เซลล์
แผงเดี่ยว	40, 30, 25, 20, 15, 10, 5, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -40
ต้นลม 1 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 2 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 3 แผง	0, 15, 30
ต้นลม 4 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 1 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 2 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 3 แผง	0, 15, 30
ท้ายลม 4 แผง	0, 15, 30

การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงอากาศพลศาสตร์ส่วนเฉลี่ย ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) สามารถหาได้จากการตรวจวัดโดยตรง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ (C_w) สามารถหาได้จากแรงลัพธ์ระหว่างแรง F_x และ F_z ที่กระทำต่อแบบจำลองที่ฐานโซลาร์เซลล์ตามรูปที่ 3 จากนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงอากาศพลศาสตร์ (aerostatic force coefficients) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$C_D = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 A_n}, C_L = \frac{F_z}{0.5\rho U^2 A_n}, C_w = \frac{F_w}{0.5\rho U^2 A_n}, C_{my} = \frac{M_y - (F_x H)}{0.5\rho U^2 A_n L} \quad (1)$$

โดยที่ A_n คือพื้นที่รวมของแผงโซลาร์เซลล์, F_x คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางแกน X, F_z คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางแกน Z, F_w คือค่าแรงเฉลี่ยในทิศทางตั้งฉาก (normal direction), M_y คือโมเมนต์รอบแกน Y, U คือความเร็วลมเฉลี่ยในอุโมงค์ลม ณ ระดับความสูงเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์, L คือความยาวคอร์ดในทิศทางลม ของแบบจำลอง ρ คือความหนาแน่นของอากาศ นิยามทิศทางรวมไปถึงขนาดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ข้อตกลงเรื่องสัญลักษณ์ (ก) ทิศของมุมเอียง แรง และโมเมนต์ (ข) ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณและ (ค) ระยะห่างระหว่างแผง

2.2 การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

2.2.1 สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์

สมการค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์นาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Average Navier-Stokes: RANS) คือ สมการการเคลื่อนที่สำหรับของไหลที่ผ่านการหาค่าเฉลี่ยเชิงเวลา โดยสมการ RANS นี้ถูกใช้ควบคุมตัวแปรความเร็วเฉลี่ยและความดัน แนวคิดของสมการคือ การแยกตัวประกอบเรย์โนลด์ซึ่งเป็นการแยกปริมาณขณะใดขณะหนึ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยเชิงเวลา และส่วนของการผันผวน สำหรับการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนด้วยวิธีหาค่าเฉลี่ยแบบเรย์โนลด์นี้ ความไม่คงที่ของการไหลเกือบทั้งหมดจะถูกคำนวณผ่านแบบจำลอง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ของการไหลเฉลี่ยจะถูกคำนวณหาคำตอบโดยตรง ทั้งนี้สมการ RANS ถือเป็นการพัฒนาต่อยอดมาจากสมการการเคลื่อนที่ของนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equations) สำหรับของไหลนิวโทเนียนที่อัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

โดยที่ปริมาณต่าง ๆ แบ่งออกเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนปั่นป่วนมีรายละเอียดดังนี้

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p' \quad (3)$$

เมื่อทำการแทนค่าพจน์ต่าง ๆ ลงในสมการนาเวียร์-สโตกส์ จะได้สมการดังนี้

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + 2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right] \quad (4)$$

โดยที่ $\bar{S}_{ij}$ คือ เทนเซอร์อัตราการเปลี่ยนรูปร่างเฉลี่ย (mean rate of strain tensor)

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ u , $\bar{u}$ และ u' แทนพจน์ของความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง ความเร็วเฉลี่ย และความเร็วปั่นป่วน ตามลำดับ, ν คือความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) และ f_i คือเวกเตอร์แรงภายนอก

2.2.2 เทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์

ในการหาคำตอบของสมการ RANS เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการไหลเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ (reynolds stress tensor) คือ $\rho \overline{u_i' u_j'}$ หรือ τ_{ij} ซึ่งเป็นเทนเซอร์สมมาตรอันดับสองที่มีองค์ประกอบอิสระจำนวน 6 ส่วน สำหรับการไหลสามมิติทั่วไป จะมีตัวแปรไม่ทราบค่าของคุณลักษณะการไหลเฉลี่ยจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็ว 3 แนวแกน และความดัน เมื่อรวมองค์ประกอบอิสระ 6 ส่วนของเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์เข้ากับคุณลักษณะการไหลเฉลี่ยทั้ง 4 ตัวแปร ส่งผลให้มีตัวแปรไม่ทราบค่ารวม 10 ตัวแปร อย่างไรก็ตามสมการการอนุรักษ์มวล และสมการการอนุรักษ์โมเมนตัมทั้ง 3 แนวแกน ให้สมการสำหรับการหาคำตอบเพียง 4 สมการเท่านั้น เพื่อที่จะหาค่าของตัวแปรไม่ทราบค่าทั้ง 10 ตัวแปร ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องใช้สมมติฐานเพิ่มเติมเพื่อแก้ระบบสมการดังกล่าว สมมติฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือ สมมติฐานความหนืดเอ็ดดี้ของบัสสินเนสก์ (Boussinesq) [14] โดยสมมติฐานนี้สำคัญต่อแบบจำลองชนิดสองสมการ (two-equation models) ทั้งหมด และมีสมมติฐานว่าเทนเซอร์ความเค้นเรย์โนลด์ τ_{ij} มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเทนเซอร์อัตราการเปลี่ยนรูปเฉลี่ย $\overline{S_{ij}}$

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

$$k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2} \quad (7)$$

โดยที่ μ_t คือสมบัติสเกลาร์ที่เรียกว่าความหนืดเอ็ดดี้ (Eddy viscosity) ซึ่งโดยปกติคำนวณได้จากตัวแปรการส่งผ่านสองตัวแปร ส่วนพจน์สุดท้ายที่ปรากฏนั้นถูกรวมไว้เพื่อใช้จำลองการไหลที่อัดตัวไม่ได้ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับนิยามของพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ k จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขสมการ (7)

สมมติฐานของบัสสินเนสก์ มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบบจำลองความปั่นป่วนชนิดสองสมการ สมมติฐานดังกล่าวช่วยลดรูปปัญหาลงได้อย่างมาก โดยช่วยให้สามารถพิจารณาผลกระทบของความปั่นป่วนที่มีต่อการไหลเฉลี่ยได้ในลักษณะเดียวกันกับที่ความหนืดระดับโมเลกุลส่งผลกระทบต่อการไหลแบบลามินาร์ นอกจากนี้ สมมติฐานนี้ยังทำให้สามารถนำตัวแปรความปั่นป่วนในรูปสเกลาร์ที่เข้าใจได้ง่ายมาใช้ได้ เช่น พลังงานจลน์ความปั่นป่วน และการสลายตัว รวมถึงยังสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับตัวแปรเชิงกายภาพที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

เช่น ความเข้มข้นของความปั่นป่วน (turbulence intensity) และ มาตรฐานความยาวความปั่นป่วน (turbulence length scale)

2.2.3 แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω

ภายในกลุ่มแบบจำลอง RANS นั้น แบบจำลอง k- ω จัดเป็นแบบจำลองชนิดสองสมการ ซึ่ง จะทำการหาคำตอบของสมการการส่งผ่าน ผ่านตัวแปรพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน $k = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2}$ และอัตราการสลายตัวจำเพาะ $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ โดยแบบจำลองนี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ เพื่อให้ได้ผลการทำนายแรงบริเวณใกล้เคียงที่มีความแม่นยำสูง [15] ทั้งนี้ ค่าพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน (k) และอัตราการสลายตัวจำเพาะ (ω) สามารถคำนวณได้จากสมการการส่งผ่าน ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

โดยที่ G_k แทนพจน์การผลิตพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน อันเนื่องมาจากความชันของความเร็วเฉลี่ย, G_ω แทนพจน์การผลิตของ ω , ในขณะที่ S_k และ S_ω คือพจน์ต้นกำเนิดที่กำหนดโดยผู้ใช้, Y_k และ Y_ω แทนพจน์การสลายตัวและ τ_ω กับ แทนค่าสภาพแพร่ประสิทธิผลของ k และ ω อันเนื่องมาจากความปั่นป่วน ซึ่งกำหนดโดยสมการดังนี้

$$\tau_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \tau_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (10, 11)$$

โดยที่ σ_k และ σ_ω คือ เลขพρανต์ความปั่นป่วน (turbulent prandtl numbers) สำหรับ k และ ω ตามลำดับ และ μ คือความหนืดความปั่นป่วน (turbulence viscosity) ทั้งนี้

2.2.4 แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน SST

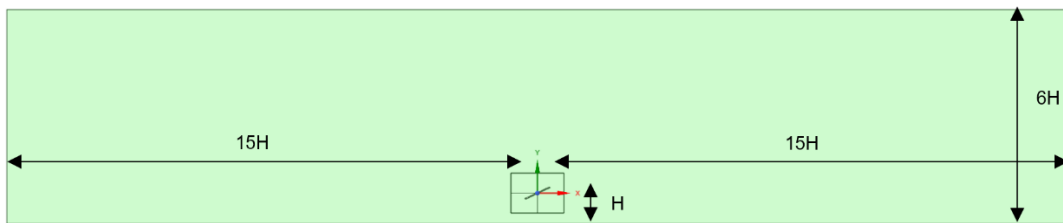
แบบจำลอง k- ω ช่วยให้สามารถจัดการกับการไหลบริเวณใกล้เคียงได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากลักษณะของชั้นขอบเขต จะได้รับอิทธิพลจากธรรมชาติของการไหล ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมี

การสร้างกริดแบบละเอียดในบริเวณใกล้ผนัง อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยประการหนึ่งของแบบจำลองนี้คือความไวต่อค่าในกระแสไหลอิสระ แบบจำลองการส่งผ่านความเค้นเฉือน (Shear Stress Transport: SST) $k-\omega$ เป็นอีกหนึ่งแบบจำลองชนิดสองสมการที่ถูกพัฒนาโดย [16] ซึ่งเป็นการรวมจุดเด่นด้านความแข็งแกร่ง และความแม่นยำของแบบจำลอง $k-\omega$ ในบริเวณใกล้ผนัง เข้ากับคุณสมบัติการไม่ขึ้นต่อค่ากระแสไหลอิสระของแบบจำลอง $k-\epsilon$ ในบริเวณสนามไกล เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว แบบจำลอง $k-\epsilon$ จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลอง $k-\omega$ นอกจากนี้แบบจำลอง SST ยังคำนึงถึงการส่งผ่านของความเค้นเฉือนความปั่นป่วนภายในชั้นขอบเขต โดยการปรับแก้ฟังก์ชันความหนืดเอ็ดดี้ความปั่นป่วน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายลักษณะการไหลที่มีความชันความดันย้อนกลับสูง ตลอดจนการไหลที่มีการแยกตัวของชั้นขอบเขตเนื่องจากความดัน

2.2.5 การตั้งค่าที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษานี้ได้ดำเนินการจำลองเชิงตัวเลขแบบสภาวะคงตัวด้วยสมการเรย์โนลด์เฉลี่ยนาเวียร์-สโตกส์ (Steady Reynolds-Averaged Navier-Stokes: 2D SRANS) แบบ 2 มิติ เพื่อวิเคราะห์การไหลของลมผ่านชุดแผงโซลาร์เซลล์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิดความเค้นเฉือนแบบถ่ายโอน $k-\omega$ (Shear Stress Transport: SST $k-\omega$) ทั้งนี้ ชุดแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการศึกษา (รูปที่ 3) ซึ่งอ้างอิงตามรายละเอียดจาก EA Solar Lampang Co. Ltd. โดยแผงโซลาร์เซลล์วางทำมุมเอียง 30 องศา กับแนวราบ โดเมนของการคำนวณ (computational domain) (รูปที่ 5) ประกอบด้วยบริเวณพื้นด้านล่างของโดเมนถูกกำหนดให้เป็นแบบผนังขรุขระ (rough wall) โดยมีการระบุค่าความสูงความขรุขระ และค่าคงที่ความขรุขระ ให้มีความสอดคล้องกับรูปแบบของชั้นขอบเขต สำหรับผนังด้านข้างของโดเมนกำหนดให้เป็นแบบสมมาตร (symmetry) ในขณะที่ขอบเขตด้านบนของโดเมนได้กำหนดค่าความเร็วและคุณสมบัติความปั่นป่วนตามค่าจากส่วนบนสุดของรูปแบบทางเข้า (inlet) ส่วนพื้นผิวของแผงโซลาร์เซลล์ถูกกำหนดให้เป็นแบบผนัง (wall) และที่บริเวณทางออกของโดเมน (outlet) ได้ใช้สภาวะขอบเขตแบบเกรเดียนต์เป็นศูนย์ (zero gradient boundary condition)

ใช้โปรแกรม Ansys2024 ในการวิเคราะห์โดยเลือกจำลองที่สภาวะคงตัว (steady state) แบบ 2 มิติของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ โดยใช้อัลกอริทึม Coupled (coupled pressure-velocity coupling algorithm) โดยกำหนดเกณฑ์การลู่เข้า (convergence criteria) ไว้ที่ 10^{-6} สำหรับทุกตัวแปร ในส่วนของการทำดิสครีไทเซชันได้เลือกใช้รูปแบบ Least Square Cell Based, Green-Gauss Cell Based และ Second Order Upwind



รูปที่ 5 โดเมนของอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์

3. ผลจากการทดสอบในอุโมงค์ลม

การทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อหาสัมประสิทธิ์แรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์ ทั้งกรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว มีอัตราส่วนระยะห่างระหว่างขอบถึงขอบ/ความยาวคอร์ด ($D/L = 224/206$) คือ 1.08 แบบติดตั้งบนพื้นดิน การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมภายใต้การไหลรูปแบบชั้นบรรยากาศ เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ทั้งกรณีติดตั้งแบบเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว และยังทำการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่ออธิบายพฤติกรรมของกระแสลมที่มีต่อแผงโซลาร์เซลล์ทั้งในกรณีติดตั้งแบบเดี่ยวและแบบจัดเรียงเป็นแถว ผลการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

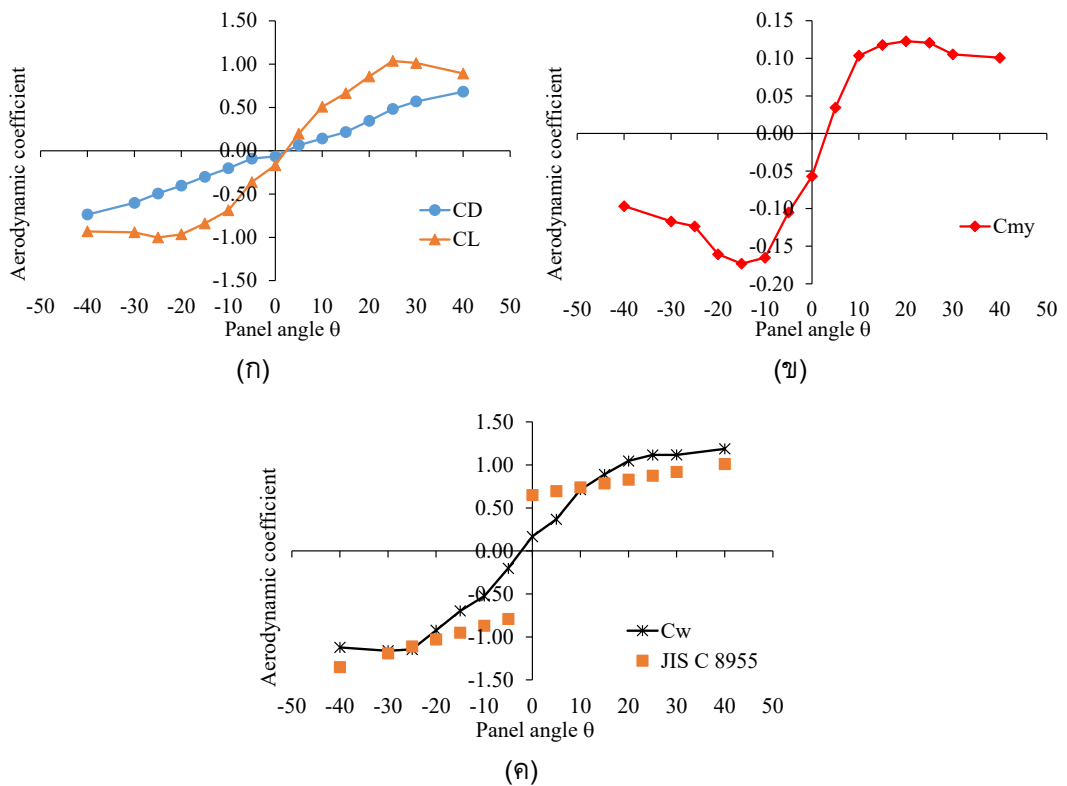
3.1 กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยว

3.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient) สัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (Moment coefficient) (มีข้อตกลงเรื่องสัญลักษณ์ดังแสดงในรูปที่ 4(ก)) ของแผงโซลาร์เซลล์ตามการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง (θ) แสดงในรูปที่ 6 ผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงที่เพิ่มขึ้นทั้งทางบวกและทางลบ พบว่ามีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 40 องศากรณีลมปะทะด้านหน้า (0 องศา) และลมปะทะด้านหลัง (180 องศา) มีค่าเท่ากับ 0.68 และ 0.74 ตามลำดับซึ่งใกล้เคียงกัน

3.1.2 สัมประสิทธิ์แรงยก

สัมประสิทธิ์แรงยกกรณีมุมเอียงทางบวกและลบสูงสุดที่มุมเอียง 25 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า 25 องศา พบว่าแรงยกลมปะทะด้านหน้ามีค่าสูงกว่าทิศทางลมด้านหลัง 4% ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีสาเหตุมาจากแรงจากอากาศ (F_x , F_z) ที่ได้รับอิทธิพลจากทิศทางลมตามแนวการไหลมากกว่าทิศทางลมด้าน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์เดี่ยวกับมุมเอียงของแผง (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยก (ข) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ค) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์

3.1.3 สัมประสิทธิ์โมเมนต์

สัมประสิทธิ์โมเมนต์มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์แรงยก กรณีองศาการปะทะทางบวกสูงสุดที่มุมเอียง 25 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า 25 องศา ส่วนองศาการปะทะทางลบสูงสุดที่ -15 องศาและลดลงที่การเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงมากกว่า -15 องศา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของจุดแยกตัวของการไหลที่องศาการบิดที่มีค่ามากกว่าองศาการบิดวิกฤติส่งผลให้จุดศูนย์กลางแรงดันมีการขยับเข้าใกล้จุดหมุนส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลง

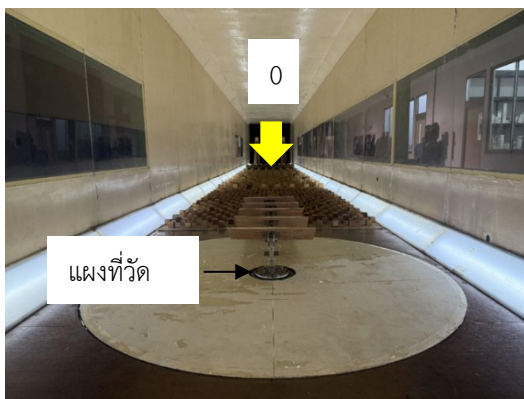
3.1.4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์

สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากของแผงโซลาร์เซลล์ มีการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกันทั้งในทิศทาง 0 องศา และ 180 องศา เนื่องจากค่า F_x ที่นำมาใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงใน

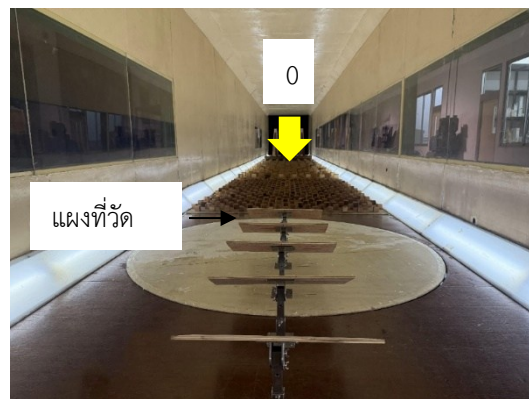
แนวตั้งฉากนั้น ได้รับผลกระทบจากลักษณะการไหลของอากาศอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความขรุขระของพื้นผิวในอุโมงค์ลมน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน JIS C 8955 [17] พบว่าในกรณีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางบวก 0 ถึง 5 องศา และการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางลบ -20 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 [17] ส่วนการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงทางบวก ตั้งแต่ 15 ถึง 40 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่ามาตรฐาน JIS C 8955 [17] เล็กน้อยถึงปานกลาง

3.2 กรณีติดตั้งแบบจัดเรียงเป็นแถว

หัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์เมื่อจัดเรียงเป็นแถวซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าแผงเดี่ยวเนื่องจากอิทธิพลของการรบกวนระหว่างแผง (Interference effects) เพื่อศึกษาผลดังกล่าวงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดกรณีทดสอบออกเป็น กรณีที่ 1) การเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมแสดงในรูปที่ 7(ก) และกรณีที่ 2) การเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมแสดงในรูปที่ 7(ข) โดยมีการเพิ่มแผงโซลาร์เซลล์ที่ละ 1 แผงจนครบ 4 แผงในทุก ๆ มุมบิด รูปแบบการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงลมในแต่ละตำแหน่งบนแผงโซลาร์เซลล์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมบิดแผงโซลาร์เซลล์กับค่าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์แบบเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การจัดวางกลุ่มแผงโซลาร์เซลล์ ภายในอุโมงค์ลม (ก) ติดตั้งแผงจำนวน 4 ชุด ไว้ด้านต้นลม และ (ข) ติดตั้งแผงจำนวน 4 ชุด ไว้ด้านท้ายลม

3.2.1 อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม

รูปที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับ ประกอบไปด้วยมุมเอียง 0 15 และ 30 องศาตามลำดับ ในกรณีที่มุมเอียงเพิ่มขึ้นด้านต้นลม ในภาพรวมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง ผลการศึกษาเชิงลึกสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

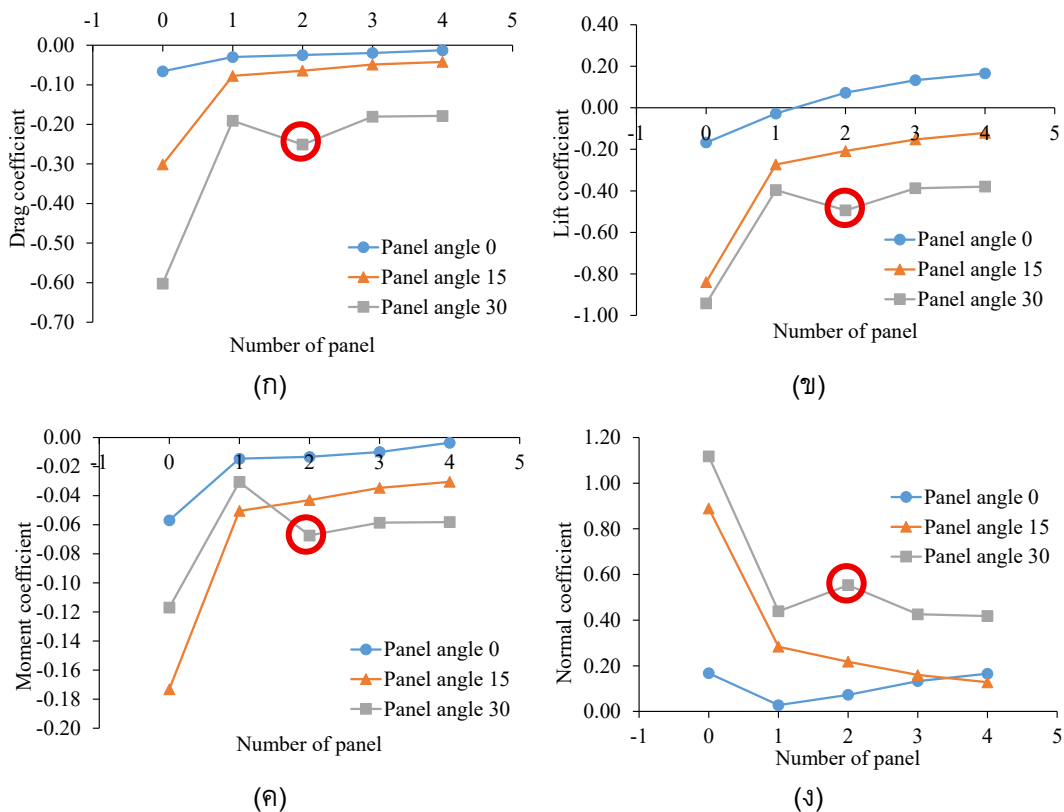
รูปที่ 8(ก) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมพบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.60 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเหลือ 0.18 ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 70% 86% และ 81% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ข) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงยกของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้านคือ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลมพบว่า สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น แต่กรณีมุมบิด 0 องศาพบว่า โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวและการมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 1 แผงส่งผลให้เกิดแรงกดแต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์เป็น 2 3 และ 4 ส่งผลให้เกิดเป็นแรงยก โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.94 (แรงกด) เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกลดลงเหลือ 0.38 (แรงกด) ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 60% และ 86% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 และ 15 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ค) พบว่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงยก แต่สัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่มุมบิด 15 มีค่ามากกว่า 30 องศา เนื่องจากสัมประสิทธิ์โมเมนต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปะทะเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับภาระการกระจายตัวของแรงดันรอบหน้าตัด หากการเพิ่มองศาทำให้ลมเกิดการแยกตัวหรือปั่นป่วนจนแรงดันบนและล่างเริ่มหักล้างกันเอง ค่าโมเมนต์ก็จะไม่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 2 แผงเป็นต้นไปส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ของมุมบิด 30 มีค่ามากกว่า 15 องศา ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 15 องศา มีค่าเท่ากับ 0.17 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลงเหลือ 0.03 ผลจากการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงสามารถลดสัมประสิทธิ์โมเมนต์ได้ถึง 50% 82% และ 94% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 8(ง) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของโซลาร์เซลล์แผงเดี่ยวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดี่ยวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศาเท่ากับ 1.12 จากการศึกษาพบว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 เกิดสัมประสิทธิ์แรง

ตั้งฉาก แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์มากกว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 2 สามารถอธิบายได้ด้วยพฤติกรรมการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ เมื่อกระแสลมปะทะแผงแถวที่ 1 จะเกิดการแยกตัวของ การไหลบริเวณขอบบนของแผงก่อให้เกิดชั้นเฉือนที่แยกตัวซึ่งมีความปั่นป่วนและพลังงานจลน์สูง พัดผ่านไปด้านหลัง ภายใต้ระยะห่างระหว่างแถวที่ใช้ในการศึกษานี้ชั้นเฉือนดังกล่าวได้ตกลงมา ปะทะตรงเข้าหาแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดความดันสูงสุด แบบเฉพาะที่ และทำให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากในแถวที่ 3 มีค่ามากกว่าแผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 2 จากนั้นเมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านต้นลม 4 แผงส่งผลสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากเหลือ 0.42 สามารถลด สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากได้ถึง 63% และ 86% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 และ 15 องศา ตามลำดับ ส่วนกรณีมุมบิด 0 องศาการมีแผงโซลาร์เซลล์ต้นลม 1 แผงช่วยลดสัมประสิทธิ์แรง ตั้งฉาก แต่เมื่อเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ต้นลมกลับส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากเพิ่มขึ้น แต่ ยังคงต่ำกว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดี่ยว



รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับเปรียบเทียบกับจำนวนแผงที่อยู่ต้นลม (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (ข) สัมประสิทธิ์แรงยก (ค) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ง) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับผิว

3.2.2 อิทธิพลของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม

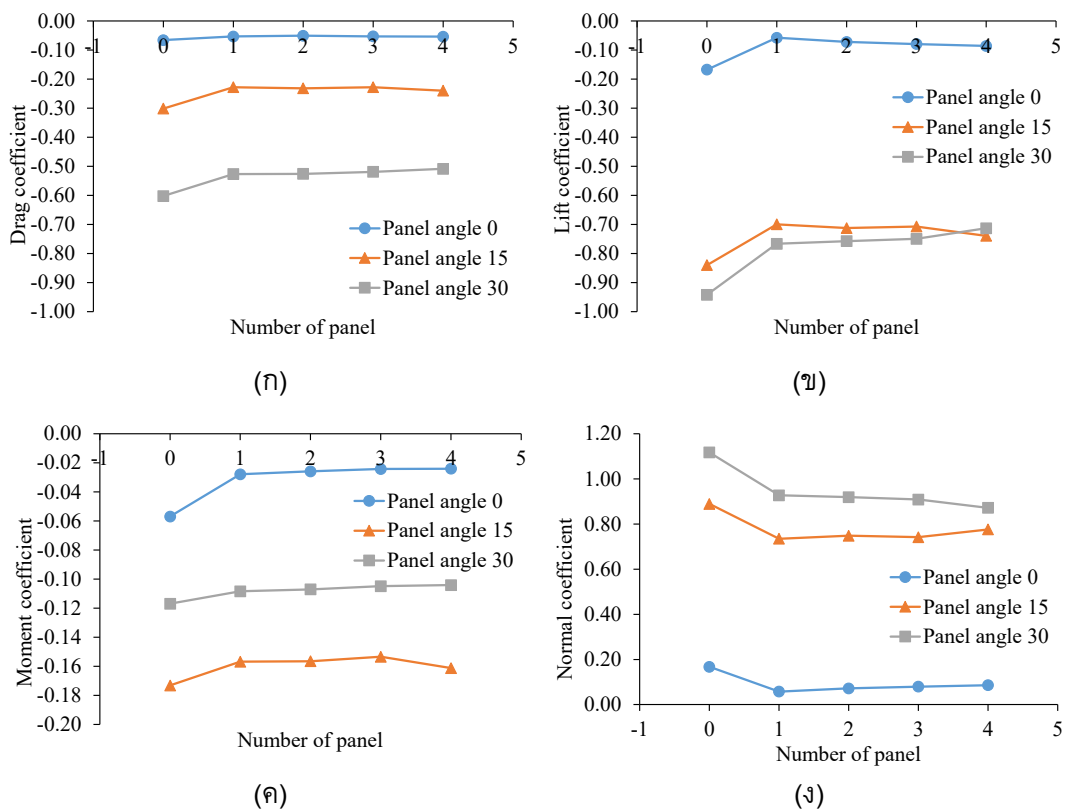
รูปที่ 9 ในกรณีที่มีแผงโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นด้านท้ายลม ในภาพรวมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของโซลาร์เซลล์แถวเดียวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง ผลการศึกษาเชิงลึกสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

รูปที่ 9(ก) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของโซลาร์เซลล์แถวเดียวมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแบบแถวในทุกมุมเอียง จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมพบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มพฤติกรรมดังกล่าวอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.60 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงต้านลดลงเหลือ 0.51 สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 16% 20% และ 18% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ข) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงยกของโซลาร์เซลล์แถวเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้านคือ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลมพบว่า สัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าลดลงตามจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมบิด 30 องศา มีค่าเท่ากับ 0.94 (แรงกด) เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกลดลงเหลือ 0.71 (แรงกด) สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ถึง 24% 12% และ 49% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ค) พบว่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของโซลาร์เซลล์แถวเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน และแรงยก แต่สัมประสิทธิ์โมเมนต์ที่มุมเอียง 15 มีค่ามากกว่า 30 องศา เนื่องจากสัมประสิทธิ์โมเมนต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปะทะเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับกระจายตัวของแรงดันรอบหน้าตัด หากการเพิ่มองศาทำให้ลมเกิดการแยกตัวหรือปั่นป่วนจนแรงดันบนและล่างเริ่มหักล้างกันเอง ค่าโมเมนต์ก็จะไม่เพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 15 องศา มีค่าเท่ากับ 0.17 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์โมเมนต์ลดลงเหลือ 0.16 สามารถลดสัมประสิทธิ์โมเมนต์ได้ถึง 11% 7% และ 58% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ

รูปที่ 9(ง) พบว่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของโซลาร์เซลล์แถวเดียวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากของแผงเดียวมีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 30 องศา มีค่าเท่ากับ 1.12 เมื่อมีแผงโซลาร์เซลล์ด้านท้ายลม 4 แผงส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากลดลงเหลือ 0.87 สามารถลดสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากได้ถึง 22% 13% และ 49% ในแผงโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 15 และ 0 องศาตามลำดับ



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ภายใต้มุมเอียง 3 ระดับเปรียบเทียบกับจำนวนแผงที่อยู่ท้ายลม (ก) สัมประสิทธิ์แรงต้าน (ข) สัมประสิทธิ์แรงยก (ค) สัมประสิทธิ์โมเมนต์ (ง) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉากกับผิว

4. ผลการวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

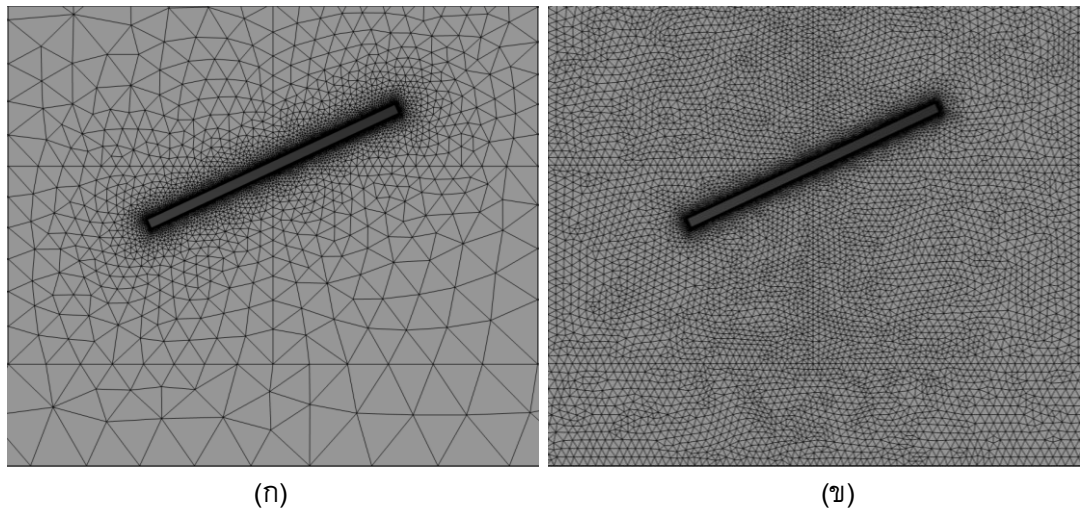
จากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่อโซลาร์เซลล์ที่จัดเรียงเป็นแถวมีความซับซ้อนมากกว่าแผงเดี่ยวเนื่องจากอิทธิพลของการรบกวนระหว่างแผงซึ่งทำให้เกิด 1) ผลจากการบังลม 2) ผลเนื่องจากความปั่นป่วนของกระแสลม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยพิจารณาเฉพาะผลจากแผงโซลาร์เซลล์เท่านั้น ไม่นำผลจากฐานรองรับมาร่วมพิจารณา โดยแบ่งรูปแบบการจำลองดังตารางที่ 2 จากการศึกษาสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 รูปแบบการจำลองแผงโซลาร์เซลล์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

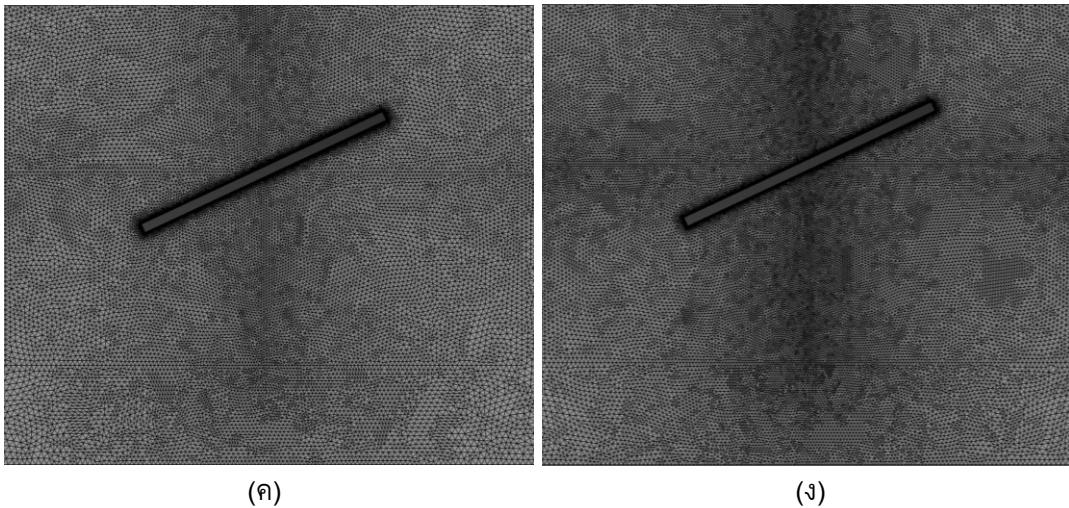
จำนวนแผงโซลาร์เซลล์	มุมเอียงโซลาร์เซลล์	ทิศทางลมกระทำ
โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว	30	ต้นลม, ท้ายลม
โซลาร์เซลล์เรียง 3 แถว	30	ต้นลม, ท้ายลม

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงลม และสัมประสิทธิ์โมเมนต์โดย CFD

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม โดยพิจารณากรณีแผงเดี่ยวที่มุมเอียง 30 องศาเป็นกรณีศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 4 ระดับความละเอียด ได้แก่ หยาบ (3.69×10^5 เอลิเมนต์) ปานกลาง (7.72×10^5 เอลิเมนต์) ละเอียด (1.67×10^6 เอลิเมนต์) และละเอียดมาก (2.77×10^6 เอลิเมนต์) ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยรักษาค่าความสูงของเซลล์แรกให้มีความสูงเท่ากับ 0.0001 เมตรสอดคล้องกับค่า y^+ เท่ากับ 2.8 ในทุกกรณี เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST ที่ต้องการให้เซลล์แรกอยู่ในขอบเขต Viscous sublayer ($y^+ < 5$)



รูปที่ 10 ระดับความละเอียดของเอลิเมนต์ 4 ระดับสำหรับการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม (ก) เอลิเมนต์แบบหยาบ (ข) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (ค) เอลิเมนต์แบบละเอียด และ(ง) เอลิเมนต์แบบละเอียดมาก

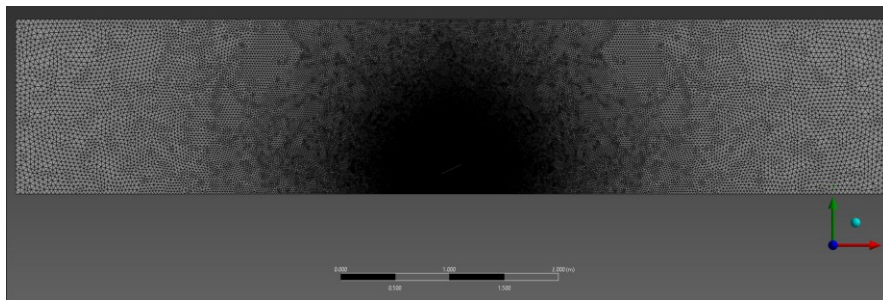


รูปที่ 10 ระดับความละเอียดของเอลิเมนต์ 4 ระดับสำหรับการตรวจสอบขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงลม (ก) เอลิเมนต์แบบหยาบ (ข) เอลิเมนต์แบบปานกลาง (ค) เอลิเมนต์แบบละเอียด และ(ง) เอลิเมนต์แบบละเอียดมาก (ต่อ)

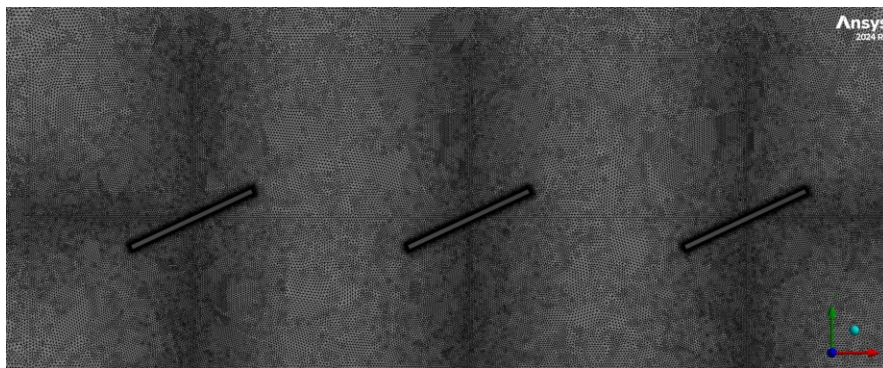
ผลการจำลองด้วย CFD ในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดจากระดับหยาบมาระดับปานกลาง ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน สัมประสิทธิ์แรงยก และสัมประสิทธิ์โมเมนต์ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงจากระดับละเอียด และละเอียดมากมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าของคำตอบ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากอุโมงค์ลมพบที่มีความแตกต่างในช่วง 11-14% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โครงข่ายระดับละเอียดมากที่มีจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 2.77×10^6 และ 3.14×10^6 เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์โซลาร์เซลล์แผงเดี่ยว และ 3 แถวเรียงดังแสดงในรูปที่ 11

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงลมแผงโซลาร์เซลล์มุมเอียง 30° แผงเดี่ยวกรณีจำลอง 4 ระดับความละเอียด

สัมประสิทธิ์แรงลม	ผลการทดสอบจากอุโมงค์ลม	จำนวนเอลิเมนต์			
		3.69×10^5	7.72×10^5	1.67×10^6	2.77×10^6
C_d	0.568	0.483	0.501	0.502	0.503
C_L	1.012	1.215	1.137	1.118	1.120
C_M	0.105	0.075	0.080	0.090	0.091



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 รูปแบบการสร้างกริดในการวิเคราะห์ (ก) โดเมนการไหลทั้งหมด (ข) ภาพขยายโซลาร์เซลล์เรียง 3 แถว

ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน แรงยก และโมเมนต์ สำหรับการจำลองด้วย CFD กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและ 3 แถว ทิศทางลม 0 และ 180 องศา แสดงไว้ในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณากรณีแผงเดี่ยวที่มุมเอียง 30 องศา พบความแตกต่างระหว่างผลการทดสอบในอุโมงค์ลมและการจำลอง CFD ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จากการจำลอง CFD เท่ากับ 0.503 ซึ่งต่ำกว่าผลทดสอบที่ 0.568 ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของแรงดูดในบริเวณอับลม ในสภาพแวดล้อมจริง (3 มิติ) โครงสร้างของ wake vortex มีการหมุนตัวที่ซับซ้อนและมีการดึงกระแสลมจากด้านข้างเข้ามาผสมซึ่งทำให้อากาศด้านหลังแผงมีความปั่นป่วนและเกิดแรงดูดที่รุนแรงกว่าการจำลองแบบ 2 มิติที่ไม่สามารถจับพฤติกรรมโครงสร้าง 3D vortex เหล่านี้ได้ แม้ว่าแบบจำลอง k- ω SST มีประสิทธิภาพสูงในการทำนายจุดแยกตัวของการไหล แต่การประมวลผลภายใต้สมมติฐานสถานะคงตัว (steady-state) ไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการหลุดตัวของกระแสวนที่ไม่คงที่ (unsteady vortex shedding) และความปั่นป่วนที่ซับซ้อนภายในเขตอับลมขนาดใหญ่บริเวณด้านหลังแผงได้อย่างสมบูรณ์ การเฉลี่ยค่าความดันเชิงเวลา (time-averaging) จึงทำให้การทำนายแรงดูดด้านหลังแผงคลาดเคลื่อน

สัมประสิทธิ์แรงยกที่ได้จากการจำลอง CFD เท่ากับ 1.120 ซึ่งสูงกว่าผลจากอุโมงค์ลมที่ 1.012 เกิดจากการที่แบบจำลอง 2 มิติมีสมมติฐานให้แผงมีความยาวเป็นอนันต์ กระแสลมความดันสูงบริเวณด้านหน้าจึงไม่สามารถไหลระบายออกทางขอบด้านข้างได้ มวลอากาศจึงถูกบังคับให้เร่งความเร็วผ่านขอบบนและขอบล่างเท่านั้น ส่งผลให้ความแตกต่างของแรงดันสถิตในแนวตั้งเพิ่มสูงขึ้นเกินความเป็นจริง

การกระจายตัวของแรงดันบนพื้นผิวในสภาวะ 3 มิติได้รับอิทธิพลอย่างมากจากกระแสลมหมุนวนบริเวณปลายแผง เมื่อแบบจำลอง 2 มิติละเลยผลกระทบส่วนนี้ ทำให้ลักษณะการกระจายแรงดันและตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงดัน คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง ส่งผลให้ค่า C_M ที่ได้จาก CFD มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ (0.091 เทียบกับ 0.105) แม้ว่าข้อจำกัดในการจำลองพฤติกรรมแบบ 3 มิติและโครงสร้าง wake vortex จะส่งผลต่อความแม่นยำของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมเชิงปริมาณ แต่การวิเคราะห์ 2D ในศึกษานี้ยังคงมีประสิทธิภาพอย่างยิ่งในเชิงคุณภาพ สำหรับการแสดงให้เห็นภาพพฤติกรรมการก้ำบัง และทิศทางกระเป๋ียงเบนของกระแสลมในกรณีที่มีการจัดเรียงแผงแบบหลายแถว

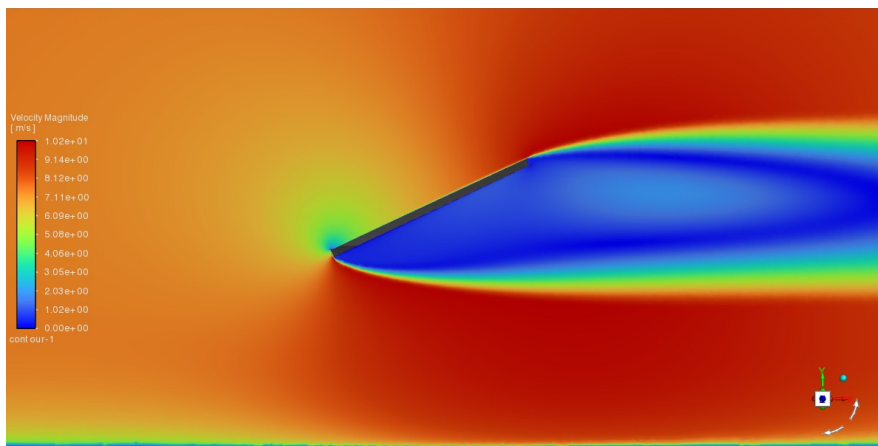
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์ระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมและพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยวและจัดเรียง 3 แถว

รูปแบบการจัดเรียงแผงโซลาร์เซลล์	ประเภทการวิเคราะห์	สัมประสิทธิ์แรงลม		
		C_D	C_L	C_M
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา แผงเดี่ยว	อุโมงค์ลม	0.568	1.012	0.105
	CFD	0.503	1.120	0.091
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 12%	สูงกว่า 11%	ต่ำกว่า 14%
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา 2 แผงท้ายลม	อุโมงค์ลม	-0.526	-0.758	-0.107
	CFD	-0.442	-0.650	-0.125
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 16%	ต่ำกว่า 14%	สูงกว่า 17%
โซลาร์เซลล์มุมเอียง 30 องศา 2 แผง ต้นลม	อุโมงค์ลม	-0.251	-0.494	-0.067
	CFD	-0.238	-0.414	-0.058
% ความแตกต่าง		ต่ำกว่า 5%	ต่ำกว่า 16%	ต่ำกว่า 15%

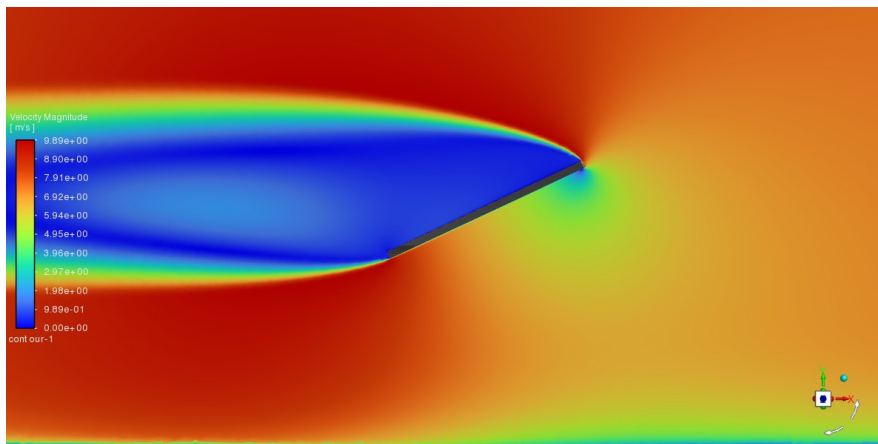
ในกรณีที่มีการจัดเรียงแบบหลายแถวซึ่งพบความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงลมตั้งแต่ 5% ไปจนถึง 17% อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณทำให้เห็นภาพการไหลของกระแสลมและเข้าใจได้ดีขึ้น และมีราคาถูกกว่าการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

4.2 อากาศพลศาสตร์ของแผงโซลาร์เซลล์ กรณีติดตั้งแบบแผงเดี่ยว

แรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์เกิดจากกระแสลมปะทะด้านหน้า และผลต่างของแรงดันระหว่างด้านหน้า (แรงดันบวก/แรงผลัก) และด้านหลัง (แรงดันลบ/แรงดูด) กรณีลมพัดมาจากทิศ 0 องศาจากรูปที่ 12(ก) สังเกตได้ว่าที่บริเวณด้านปะทะของแผงไม่เกิดการแยกตัวของกระแสลม แต่กระแสลมมีการเร่งความเร็วขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวด้านบนของแผงเกิดจุดแยกลมที่บริเวณขอบบนและล่างของแผงโซลาร์เซลล์ส่งผลให้ด้านหลังแผงโซลาร์เซลล์เกิดระลอกลมหมุนวนเป็นวงใหญ่ทำให้เกิดแรงดูดที่รุนแรง ส่วนกรณีลมพัดมาจากทิศ 180 องศาจากรูปที่ 12(ข) พบว่ามีพฤติกรรมคล้ายคลึงกันเพียงแต่กระแสลมมีการเร่งความเร็วขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ไปตามพื้นผิวปะทะด้านล่าง



(ก)



(ข)

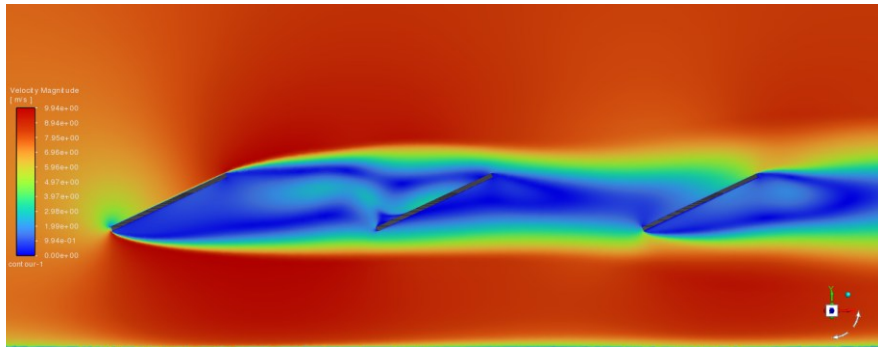
รูปที่ 12 สหามการการไหลของกระแสลมโดยรอบแผงโซลาร์เซลล์แบบเดี่ยวมุมบิต 30 องศา (ก) ลมพัดเข้าทาง 0 องศา (ข) ลมพัดเข้าทาง 180 องศา

4.3 ผลการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ ของการจัดเรียงแถวของแผงโซลาร์เซลล์

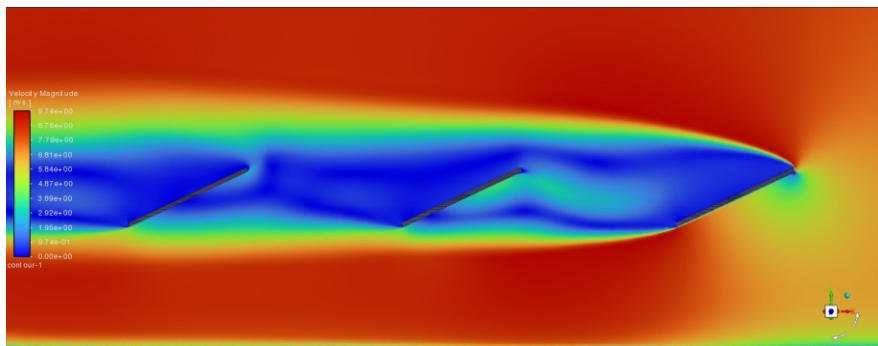
ในกรณีแผงโซลาร์เซลล์เรียงกันเป็นแถว ลมพัดมาจากทิศ 0 องศาแสดงในรูปที่ 13(ก) เมื่อกระแสลมไหลผ่านแผงโซลาร์เซลล์ต้นลมหน้าทำหน้าที่เป็นสิ่งที่กีดขวางส่งผลให้กระแสลมถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางลอยข้ามขอบบนของแผงไป การมีแผงวางเรียงกันเป็นแถว จะทำให้กระแสลมมีพฤติกรรมเสมือนกระทำกับพื้นผิวที่ต่อเนื่องกันมากขึ้น ทำให้ลมม้วนตัวลงใต้แผงหน้าทำได้ยากขึ้น หรือสร้างความปั่นป่วนทันทีที่พ้นขอบแผงแรก แผงที่สองจะขวางทางให้กระแสลมไหลข้ามผ่านช่องว่างไปอย่างราบเรียบขึ้น พฤติกรรมนี้ช่วยลดการแยกตัวของกระแสลมที่ขอบบนของแผงหน้า ทำให้แรงต้านที่เกิดจากความปั่นป่วนลดลง ปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้พื้นที่ด้านหลังแผงแรก กลายเป็นพื้นที่อับลม แรงดูดที่กระทำต่อด้านหลังของแผงหน้าจึงลดลง ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงลมโดยรวมของแผงหน้าลดลงตามไปด้วย (ดูรูปที่ 13 และตารางที่ 4) เมื่อลมไหลผ่านด้านล่างน้อยลง แรงดันบวกที่สะสมอยู่ใต้แผง (ซึ่งพยายามยกแผงขึ้น) ก็อาจจะลดลงในบางมุมการปะทะ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแผงหน้าลดลง (ดูรูปที่ 13 และตารางที่ 4) ผลกระทบนี้จะชัดเจนที่สุดเมื่อช่องว่างระหว่างขอบถึงขอบแผงโซลาร์เซลล์ต่อความกว้างในทิศทางลมของกรณีศึกษา ($D/L = 224/206 = 1.08$) แคบพอที่แผงหลังจะส่งผลต่ออากาศด้านหลังแผงหน้าได้ ถัดไปสังเกตได้ว่าความเร็วลมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผงที่ 2 และแผงที่ 3 มีค่าต่ำแรงดันทั้งสองฝั่งใกล้เคียงกัน ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงลมกรณีเรียงเป็นแถวมีค่าต่ำกว่าแบบแผงเดี่ยว ในกรณีลมพัดมาจากทิศ 180 องศาแสดงในรูปที่ 13(ข) ก็มีพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน

จากผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์แรงลมในการจัดเรียงหลายแถว พบประเด็นทางอากาศพลศาสตร์ที่น่าสนใจกล่าวคือ แผงโซลาร์เซลล์แถวที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากสูงกว่าแผงแถวที่ 2 ปรากฏการณ์นี้มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระยะห่างระหว่างแถวที่กำหนดในงานวิจัย ซึ่งสามารถอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวได้ด้วยกลไกการเกิดเขตหมุนวน (recirculation zone) และการเกาะกลับของกระแสนวน (vortex reattachment) รูปที่ 13(ก) เมื่อกระแสลมปะทะโซลาร์เซลล์แถวแรกและเกิดการแยกตัวของกระแสลมจะสร้างเขตอับลมและเขตหมุนวนหลักขึ้นบริเวณด้านหลัง แผงแถวที่ 2 ซึ่งตั้งอยู่ภายในเขตหมุนวนนี้พอดี จะได้รับอิทธิพลจากการกำบังอย่างเต็มที่ (shielding effect) และปะทะกับกระแสลมที่มีโมเมนตัมต่ำมาก ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมลดลงต่ำ อย่างไรก็ตามชั้นเฉือนที่แยกตัวออก (separated shear layer) จะมีการขยายตัวและเกิดการเกาะกลับ (reattachment) ลงสู่ระดับโครงสร้างเมื่อเคลื่อนที่ไปด้านหลังภายใต้ระยะห่างระหว่างแถวที่ใช้ในการศึกษานี้ จุดเกาะกลับของกระแสลม (reattachment point) ได้เกิดขึ้นในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งของแผงแถวที่ 3พอดี การเกาะกลับนี้ได้นำเอาโมเมนตัมและพลังงานจลน์จากกระแสลมอิสระด้านบนกลับเข้ามาปะทะกับโครงสร้าง ส่งผลให้ความดันและสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากบนแผงแถวที่ 3 เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผงแถวที่ 2 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวขึ้นอยู่กับ 1) อัตราส่วนระหว่าง D/L 2) ระยะห่างระหว่างพื้นดินกับตัวแผง 3) มุมบิดของโซลาร์เซลล์ ดังจะเห็นได้จาก

ผลการทดสอบว่าไม่พบพฤติกรรมดังกล่าวในกรณีมุมบิด 15 องศาและกรณีที่ลมพัดมาจากทิศ 180 องศาของโซลาร์เซลล์ที่มีมุมเอียง 30 องศาตั้งรูปที่ 13(ข) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าแรงลมที่กระทำต่อแผงโซลาร์เซลล์แผงเดียว



(ก)



(ข)

รูปที่ 13 สหามการการไหลของกระแสลมโดยรอบแผงโซลาร์เซลล์แบบเรียง 3 แถว (ก) ลมพัดเข้าทาง 0 องศา (ข) ลมพัดเข้าทาง 180 องศา

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการจัดเรียงแถวและมุมเอียงที่มีต่อสัมประสิทธิ์แรงลมของแผงโซลาร์เซลล์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ด้วยการทดสอบในอุโมงค์ลมสถานะชั้นบรรยากาศรวมกับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 2 มิติที่สภาวะคงตัว จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) โซลาร์เซลล์แบบแผงเดียวมีสัมประสิทธิ์แรงดันจากสูงสุดที่มุมเอียง (θ) 40 องศา โดยในช่วงมุมเอียง 15 ถึง 40 องศา มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน JIS C 8955[16] เล็กน้อยถึงปานกลาง

2) ในรูปแบบการจัดเรียงแบบแถว แผงแถวหน้าสุดจะได้รับผลกระทบจากแรงลมสูงสุดในขณะที่แผงตั้งแต่แถวที่ 2 เป็นต้นไป จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงลมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อันเป็นผลมาจากการถูกบดบังและอยู่ในเขตอับลม

3) ที่มุมเอียง 30 องศา พบปรากฏการณ์ที่แผงที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงตั้งฉากสูงกว่าแผงแถวที่ 2 อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเกาะกลับของกระแสลม (vortex reattachment) ของชั้นเนื้อที่แยกตัวออกมาจากแผงแถวแรก

4) การใช้แบบจำลอง 2D SRANS ควบคู่กับสมการความปั่นป่วน $k-\omega$ SST พบความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณเมื่อเทียบกับผลทดสอบในอุโมงค์ลม (โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์) เนื่องจากข้อจำกัดในการประเมินพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติ แต่แบบจำลองดังกล่าวยังคงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแสดงภาพโครงสร้างการไหลและอธิบายกลไกการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ในการศึกษาครั้งต่อไปควรพิจารณาอัตราส่วนระยะห่างระหว่างแถว (D/L) และระยะสูงจากพื้น เนื่องจากปัจจัยทั้งสองนี้มีความสำคัญต่อพฤติกรรมการแยกตัวของกระแสลม การขยายตัวของเขตอับลม และตำแหน่งการเกาะกลับของกระแสลม ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการรบกวนทางอากาศพลศาสตร์ระหว่างแถว นอกจากนี้ควรดำเนินการทดสอบทั้งในอุโมงค์ลมสภาวะชั้นบรรยากาศควบคู่กับการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 3 มิติ (3D CFD) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อประเมินพฤติกรรมการไหลแบบ 3 มิติที่สมบูรณ์ และสร้างฐานข้อมูลที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบโซลาร์เซลล์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ นอกจากนี้ผู้นิพนธ์ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก (มทร.ตะวันออก) และ EA Solar Lampang Co. Ltd. สำหรับการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Radu A, Axinte E, Theohari C. Steady wind pressures on solar collectors on flat-roofed buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1986;23:249-58.

- [2] Aly AM, Bitsuamlak G. Wind-induced pressures on solar panels mounted on residential homes. *Journal of Architectural Engineering* 2014;20(1):04013003. doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000132.
- [3] Banks D. The role of corner vortices in dictating peak wind loads on tilted flat solar panels mounted on large, flat roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2013;123(Pt A):192-201.
- [4] Geurts C, Blackmore P. Wind loads on stand-off photovoltaic systems on pitched roofs. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2013;123(Pt A):239-49.
- [5] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston (VA): ASCE; 2016.
- [6] Ikeda H, Kimura K, Kobayashi T, Kato K, Kubo Y, Ikeda K. A study on the effects of wind direction on the wind force coefficient of solar panels arranged in rows for a solar panel power plant. *Journal of Structural Engineering* 2012;58A:559-66. doi: 10.11532/structcivil.58A.559. (In Japanese)
- [7] Ma W, Zhang W, Zhang X, Chen W, Tan Q. Experimental investigations on the wind load interference effects of single-axis solar tracker arrays. *Renewable Energy* 2023;202:566-80. doi: 10.1016/j.renene.2022.11.112.
- [8] Shademan M, Balachandar R, Barron RM. Detached eddy simulation of flow past an isolated inclined solar panel. *Journal of Fluids and Structures* 2014;50:217-30.
- [9] Sun J, He Y, Li X, Lu Z, Yang X. CFD simulations for layout optimal design for ground-mounted photovoltaic panel arrays. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2023;242:105558.
- [10] Xu A, Ma W, Yuan H, Lu L. The effects of row spacing and ground clearance on the wind load of photovoltaic (PV) arrays. *Renewable Energy* 2024;220:119627. doi: 10.1016/j.renene.2023.119627.
- [11] Smith SE, Viggiano B, Ali N, Silverman TJ, Obligado M, Calaf M, Cal RB. Increased panel height enhances cooling for photovoltaic solar farms. *Applied Energy* 2022;325:119819. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119819.
- [12] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-05. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston (VA): ASCE; 2005.
- [13] Bearman PW. An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics* 1971;46(1):177-98. doi: 10.1017/S0022112071000478.

- [14] Schmitt FG. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity. *Comptes Rendus Mécanique* 2007;335(9-10):617-27. doi: 10.1016/j.crme.2007.08.004.
- [15] Wilcox DC. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA journal* 1988;26(11):1299-310. doi: 10.2514/3.10041.
- [16] Menter FR. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal* 1994;32(8):1598-605. doi: 10.2514/3.12149.
- [17] Japanese Industrial Standards Committee. JIS C 8955:2011. Design guide on structures for photovoltaic array. Tokyo: Japanese Standards Association; 2011.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ดร.จิรวัดน์ จันทรเรือง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: jirawat_ju@rmutto.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ศ.ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก Yokohama National University, Email: bvirate@engr.tu.ac.th

ความเชี่ยวชาญ: ผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และโครงสร้างเหล็ก

Article History:

Received: January 24, 2026

Revised: June 13, 2026

Accepted: July 8, 2026

การทำนายลักษณะเฉพาะการไหลแบบปั่นป่วนของเจ็ตพุ่งชนแบบหลายช่อง
โดยใช้หัวฉีดกลม

PREDICTION OF TURBULENT FLOW CHARACTERISTICS OF
THE MULTI-CHANNEL IMPINGING JETS USING CIRCULAR NOZZLES

เมืองแก้ว ยูตัน

อาจารย์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี
248 ซอยเพชรเกษม 110 ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพมหานคร 10160,
ting_yutan@yahoo.com

Muangkaew Yutan

Lecturer, Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University,
248 Soi Petkasem 110 Khet Nong Khaem, Bangkok 10160, Thailand,
ting_yutan@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการทำนายการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ที่มีการฉีดของไหลของเจ็ตพุ่งชนที่อัดตัวไม่ได้เข้ากระทบบนพื้นที่จำกัด (confined impinging jet) โดยนำวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (finite volume) ร่วมกับแบบจำลองความปั่นป่วน standard $k-\varepsilon$ model และ reynolds stress model (RSM) ในการวิเคราะห์ เป็นปัญหา 2 มิติแบบสมมาตร โดยมีการคำนวณใช้โปรแกรม computational fluid dynamics (CFD) ansys fluent 2024 r1 โดยใช้รูปแบบผลต่างอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งมาคำนวณ คือ first order upwind (FOU) scheme เพื่อศึกษาผลลัพธ์การทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกน เส้นทางการไหล ลักษณะเวกเตอร์ความเร็ว และทิศทางการหมุนของช่องการไหล 2 แบบที่ขนาดหัวฉีด $d = 10$ และ 13.3 มม แล้วถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองที่มีอยู่แล้วซึ่งวัดโดย วิธี hot-wire anemometer ผลจากการทำนายและวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ที่ขนาดหัวฉีด $d = 10$ มม แบบ standard $k-\varepsilon$ model ทำนายได้เฉลี่ย 89.67% ส่วน RSM 87.43% และขนาดหัวฉีด $d = 13.3$ มม ได้เฉลี่ย 93.97% ส่วน RSM 91.31% เมื่อเทียบกับผลการทดลอง แสดงว่า standard $k-\varepsilon$ model มีความสอดคล้องแม่นยำได้ใกล้เคียงดีกว่า RSM บนความเร็วตามแนวแกน

คำสำคัญ: เจ็ตพุ่งชน พลศาสตร์การคำนวณเชิงตัวเลข แบบจำลองความปั่นป่วน มาตรฐาน $k-\varepsilon$ โมเดล RSM โมเดล

ABSTRACT

This paper presents the prediction of a mathematical model for the simulations of turbulent flow in steady incompressible flow of confined multiple impinging jets. A finite volume method with standard $k-\varepsilon$ turbulence model including a Reynolds stress model (RSM) is used in predicting the impinging jet flows together with a first order upwind (FOU) Scheme. 2D axisymmetric to numerical schemes on the prediction by the computational fluid dynamics (CFD) program ansys fluent 2024 r1, to study the predicted results of the characteristics of axial velocity, velocity path way, vector velocity profiles and direction of rotation of the flow channel in 2 types at nozzle sizes $d = 10$ and 13.3 mm. are compared with hot-wire anemometer experimental data. The computations and analysis results show that at nozzle size $d = 10$ mm, the standard $k-\varepsilon$ model predicts an average of 89.67% , while the RSM 87.43% , and at nozzle size $d = 13.3$ mm, the average is 93.97% , while the RSM 91.31% . When compared with the measurement results, it shows that the standard $k-\varepsilon$ model performs close better accuracy than the RSM on axial velocity.

KEYWORDS: impinging jets, computational fluid dynamics, turbulence model, standard $k-\varepsilon$ model, RSM model.

1. บทนำ

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการใช้เจ็ตพุ่งชนและทำให้เกิดการไหลหมุนวนหรือสร้างความปั่นป่วนของการไหล โดยใช้กลุ่มของอากาศไหลปะทะผนังด้านใน ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูง เพื่อระบายความร้อนในระบบการทำงาน ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรม เช่น แผงระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การอบแห้งสิ่งทอและพื้นผิวที่เปียกอื่น ๆ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อน Lee et al [1, 2] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและลักษณะการไหลที่มองเห็นแบบพื้นที่จำกัด ของการพุ่งชนเป็นกลุ่มแบบราบเรียบในระดับขนาดสเกลมิลลิเมตร มีการการตรวจสอบขณะที่พุ่งชนกับผนังที่มีอุณหภูมิคงที่เป็นวิธีเชิงทดลองและเชิงตัวเลขของลักษณะการไหลที่แตกต่างกัน Nuntadusit et al [3] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยกลุ่มเจ็ตหมุนควงพุ่งชนโดยการใส่แผ่นบิตที่อัตราส่วน 3×3 ที่อัตราการบิต y/W ระยะห่างระหว่างปากท่อเจ็ตถึงผนังพุ่งชน L/D ที่ค่าเลขเรย์โนลด์เท่ากับ $20,000$ ระยะห่างระหว่างท่อเจ็ตกับท่อเจ็ต S/D เท่ากับ $2, 4, 6$ และ 8 ผลของระยะห่างของท่อเจ็ตกับท่อเจ็ต S/D เท่ากับ 4 จะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด Caggese et al [4] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนสำหรับการพุ่งชนผนังแบบพื้นที่จำกัด โดยจำลอง การทดสอบประกอบด้วยการกำหนด

ช่องแคบรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสของ $X/D = Y/D = 5$ ซึ่งทดสอบที่ระยะห่างระหว่างช่องแคบที่แตกต่างกันสามแบบ ($Z/D = 0.5, 1$ และ 1.5) ได้รับการกระจายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั่วพื้นผิวสำหรับแผ่นที่ถูกพองขึ้นด้วยวิธีแบบจำลอง CFD โดยใช้เทคนิคผลึกเหลวชั่วคราว Yousefi-Lafouraki et al [5] ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขของการสร้างเอนโทรปีเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานของไหลดำเนินการบนเจ็ตพองขึ้นแบบพื้นที่จำกัด ผลการวิจัยพบว่าการสร้างเอนโทรปีส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ที่พื้นผิวการพองขึ้นปะทะ การสร้างเอนโทรปีทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนของปริมาตรที่เพิ่มขึ้นและมุมที่มาบรรจบกัน Alabdaly and Ahmed [6] ศึกษาวิธีเชิงตัวเลขการถ่ายเทความร้อนแบบการพาโดยไหลแบบลามินาร์ของกลุ่มเจ็ตที่พองขึ้นปะทะที่พื้นที่จำกัดด้วยนาโนฟลูอิดได้รับการตรวจสอบเชิงตัวเลขตลอดในช่วงของเลขเรย์โนลด์ที่ 200-1,000 มีช่วงกลมสองซึ่งถูกติดตั้งบนพื้นผิวเป้าหมายด้านล่าง ซึ่งหนึ่งตั้งอยู่ตรงจุดหยุดนิ่ง (stagnation point) ด้านขวาและอีกซึ่งหนึ่งตั้งอยู่ตรงจุดหยุดนิ่งทางด้านซ้าย ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าเลข nusselt เฉลี่ย ส่งผลต่อด้านประสิทธิภาพ การสร้างเอนโทรปีและตลอดถึงแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนปริมาตรอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้น Kempers et al [7] ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะการทดลองของไมโครเจ็ตแบบไฮบริดที่กระทบกับฮีตซิงก์ไมโครแชนแนลที่ผลิตขึ้นโดยใช้สารเติมแต่งโลหะปริมาณมากในการผลิต การศึกษานี้ได้มีการสร้างและทดสอบฮีตซิงก์ต้นแบบที่อัตราการไหลความร้อนสูงเกินถึง $1,000 \text{ W/cm}^2$ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่างการทำนายเชิงตัวเลขและผลการทดลอง เมื่อพิจารณาจากสมรรถนะเชิงความร้อนไฮดรอลิก โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถมีค่าการนำความร้อนโดยรวมได้ประมาณ $330 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$ มีแรงดันตก 160 kPa ที่อัตราการไหล 0.5 L/min สำหรับน้ำเข้าที่ 20°C และฮีตซิงก์ไมโครเจ็ตแบบไฮบริดยังแสดงอัตราส่วนการเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 6 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแลกเปลี่ยนความร้อนไมโครแชนแนลที่มีการออกแบบที่สมดุล Diop et al [8] ศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยเจ็ตพองขึ้นในปริมาณหมอกเพียงไม่กี่หยด เพื่อใช้การทำความเย็นและการทำให้แห้ง ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มีการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ มากมายที่มีผลต่อความร้อนและความเข้มข้นของมวลที่รูปแบบต่าง ๆ เช่น $X/D = 4, 7, 9$ ที่ความเร็ว 15 m/s ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอัตราค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น 21% และ 32% ในกรณีของ $M = 3 \text{ mg/s}$ และ 6 mg/s ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติมหมอก Selimefendigil et al [9] ศึกษาการระบายความร้อนด้วยเจ็ตพองขึ้นของนาโนเจ็ตหลายช่องของพื้นผิวร้อนรูปไซน์โดยใช้กระบอกสูบหมุนที่ทำงานภายใต้สนามแม่เหล็ก กระบอกสูบหมุนคู่ที่ให้การทำความเย็นเพิ่มเติมจะถูกนำมาใช้ในขณะที่ใช้วิธีไฟน์ดเอนเมนต์ที่เลือกที่มีน้ำหนักของ Galerkin เพื่อแก้สมการควบคุม ผลกระทบของ Re (Re ของการหมุน ระหว่าง -1000 ถึง 1000), Ha (ความแรงของ MG-F ระหว่าง 0 ถึง 30), ความเอียงของ MG-F (ระหว่าง 0 ถึง 90) และอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เย็นลงของกระบอกสูบที่ทำงาน (dT ระหว่าง 0 ถึง 10) ต่อประสิทธิภาพการทำความเย็น ผลกระทบของการทำความเย็น

ต่ำกว่าปกติจะมีประสิทธิภาพมากเมื่อการหมุนทำงานในขณะที่ Nu เพิ่มขึ้นถึง 37.9% ที่ $Rew = -1000$ เมื่อไม่มีกระบอกสูบการใช้ MG-F จะลดค่าเฉลี่ย Nu ลงประมาณ 15.4% กรณีประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ดีที่สุดในกรณีที่ไม่มี MG-F กับกระบอกสูบจะได้ที่ $Rew = -1000$ และ $dT = 10$ Ajeel et al [10] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการลดลงของความดันในเจ็ตที่พุ่งชนหลายตัวโดยใช้ของไหลนาโนไฮบริดที่เป็นนวัตกรรมใหม่โดยพิจารณาใช้การพุ่งชนแนวเฉียงในโครงสร้างเจ็ตพุ่งชนหลายลำด้วย Al_2O_3-Cu น้ำ ใช้เป็นของไหลทำงาน ที่มีเศษส่วนปริมาตรต่างกัน เช่น 0.1%, 0.33%, 0.75% และ 1.0% มีค่าเรย์โนลด์สของเจ็ตแตกต่างกันไปตั้งแต่ 8,000 ถึง 24,000 และมีมุมเจ็ต 5 แบบ ($\beta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) และความสูงของเจ็ตที่ขยายออกมี 3 แบบ $E_j = 0.2H, 0.4H$ และ $0.6H$ ถูกนำมาใช้ ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลงของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่มีการศึกษาทั้งแบบวิธีเชิงตัวเลขและทดลอง โดยการใช้หัวฉีดที่เป็นแบบกลุ่มเจ็ตหรือเจ็ตเดี่ยวพุ่งชนผนังแบบพื้นที่จำกัด มีลักษณะรูปแบบและทิศทางมุมและชนิดของของไหลการฉีดแตกต่างกัน ที่จะให้สมรรถนะเชิงความร้อนมากขึ้นและสิ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของผลการศึกษา จะขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulence models) โดยแบบจำลองความปั่นป่วนในปัจจุบันมีหลายแบบ เช่น $(k-\varepsilon)$ Spalart and Allmaras $(k-\omega)$ reynolds stress models (SST $k-\omega$) (RNG $k-\varepsilon$) และ large eddy simulation (LED) มีอธิบายในเอกสาร [11] เป็นต้น แบบจำลองความปั่นป่วนที่เป็นที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันคือ $k-\varepsilon$ ซึ่งให้ค่าความถูกต้องผลในการคำนวณเป็นที่น่าพอใจ ใช้ระยะเวลาในการคำนวณไม่มาก และง่ายกว่าในการตั้งค่าและใช้คำนวณไม่ซับซ้อนใช้งานการไหลทั่วไป ส่วนแบบจำลอง (SST $k-\omega$) ได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาใหม่ด้วยการผสมผสานข้อดีระหว่าง $k-\varepsilon$ และ $k-\omega$ และส่วนแบบจำลอง reynolds stress model (RSM) ใช้งานการไหลซับซ้อน มีการหมุน การไหลหลายแกน และมีความแม่นยำสูง

จากหลักการดังกล่าวในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะทำการประเมินผลของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\varepsilon$ ในลักษณะของผลการศึกษาต่าง ๆ เทียบกับแบบจำลองความปั่นป่วน RSM เพื่อค้นหาเพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ที่มีความซับซ้อนมากกว่าต่อผลการทดลองจริง ดังนั้นจึงได้นำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขศึกษาพฤติกรรมลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนถึงผลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดต่างกัน (d) สัดส่วนระยะห่างระหว่างหัวฉีด (S/d) และสัดส่วนระยะห่างระหว่างปากทางออกของหัวฉีดเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน (H/d) ของพื้นที่จำกัดที่จะให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ว่ามีผลต่อการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้ง 2 model คือ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่จะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนอย่างไร นำมาใช้ในการศึกษา

ตัวแปรต่าง ๆ ภายในขอบเขตที่กำหนดผ่านโปรแกรม [11] โดยอาศัยการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบสองมิติ ผลการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 1 รายการสัญลักษณ์

XD ตำแหน่งใด ๆ ที่ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชนต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, x/d	v' fluctuating velocities in direction x, m/s $\overline{\rho u'_i u'_j}$ reynolds stresses
HD ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชนต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, H/d	u time-averaged velocity in r-direction, m/s v time-averaged velocity in x-direction, m/s
SH ระยะห่างระหว่างเจ็ตต่อระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน, S/H	t_{ij} viscous stress tensor x axial co-ordinate, m
SD ระยะห่างระหว่างเจ็ตต่อขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, S/d	Greek Symbols δ_{ij} kronecker delta tensor ε dissipation Φ generalized dependent variable Γ_ϕ exchange coefficient μ, μ_t dynamic viscosity, eddy-viscosity, kg/s-m μ_e effective viscosity, ($= \mu_t + \mu$) ρ ความหนาแน่น, kg/m^3 σ_ϕ schmidt หรือ prandtl numbers ของค่า ϕ τ_{ij} reynolds stress tensor
H ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน, m	
S ระยะห่างระหว่างเจ็ต, m	
d ขนาดเส้นศูนย์กลางของเจ็ต, (หัวฉีด), m	
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ constants in the dissipation rate equation	
C_μ ค่าคงที่ใน $k-\varepsilon$ turbulence model	
G stress generation	
k turbulence kinetic energy	Subscripts e effective t turbulence i, j, k cartesian indices
ΔP_0 stagnation pressure relative to ambient, Pa	
P ความดันเฉลี่ย, Pa	
P_e Pelect number ($(\rho u \delta x / \Gamma_\phi)$)	Superscripts and Overbars $'$ fluctuating quantity in time-averaging — mean quantity
r radial co-ordinate, m	
Re_D reynolds number	
s general source term	
u' fluctuating velocities in direction r, m/s	

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ของการไหล

การคำนวณเชิงตัวเลขของการไหล มีสมมติฐานดังนี้ เป็นการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วน และอัดตัวไม่ได้, ไม่มีการถ่ายเทความร้อน, ไม่คิดผลของแรงโน้มถ่วง เป็นการไหลแบบมีความหนืด มีสมการที่ใช้อยู่คือสมการความต่อเนื่อง และสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยเขียนสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของเวลา (time-averaged) ซึ่งแสดงในรูปแบบ tensor ดังนี้

สมการความต่อเนื่อง

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{t}_{ij} + \tau_{ij}) \quad (2)$$

ค่าความเค้นเฉลี่ยเนื่องจากความหนืด, $\bar{t}_{ij}$ จะประมาณเป็น

$$\bar{t}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

โดย μ คือ laminar viscosity ส่วนค่าความเค้นเฉลี่ยของ reynolds stress, τ_{ij} จะเขียนอยู่ในรูป

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} \quad (4)$$

ค่า τ_{ij} ซึ่งยังไม่ทราบค่า ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง standard $k-\varepsilon$ model ในการหาค่า τ_{ij}

ใน standard $k-\varepsilon$ model เทอม reynolds stresses จะถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ mean strain rate โดย eddy-viscosity ที่ซึ่งค่า eddy-viscosity จะกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับ turbulent kinetic energy (k) และ dissipation rate (ε) โดยใช้ Boussinesq's approximation [12,13] คือ

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3}\delta_{ij}(\rho k) + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

โดยที่ $\mu_t = \rho C \mu k^2 / \varepsilon$ คือ turbulent eddy-viscosity

สมการของ turbulent kinetic energy (TKE) k จะอยู่ในรูป [12,13]

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (6)$$

สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy [12,13] จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

ซึ่ง G แทน generation rate of turbulent kinetic energy ขณะที่ $\rho \varepsilon$ เป็น destruction rate โดย G จะเป็น

$$G = \mu_e \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$

ค่าขอบเขตสำหรับค่าต่างๆ ของ turbulent ที่ใกล้เคียงสามารถหาได้จาก wall function โดยมีค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับสมการต่างๆ ที่ผ่านมามีดังนี้คือ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ และ $C_\mu = 0.09$ เป็นค่าคงที่ ซึ่งโดย $\mu_e = \mu_t + \mu$

2.2 Reynolds stress model (RSM)

จาก Reynolds-averaged transport equations สามารถแก้หาค่าสำหรับ τ_{ij} [12,13] แล้วจัดรูปของสมการต่าง ๆ ได้ใหม่เป็น

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial (u_k \tau_{ij})}{\partial x_k} = -G_{ij} - \Phi_{ij} + D_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

$$G_{ij} = \rho P_{ij} = - \left(\overline{\rho u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{\rho u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (10)$$

$$\Phi_{ij} = -C_1 \frac{\rho \varepsilon}{k} \left(\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(G_{ij} - \frac{2}{3} G \delta_{ij} \right) \quad (11)$$

$$D_{ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\frac{\mu_e}{\sigma_T} \right) \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{ij} \quad (13)$$

โดยที่ G_{ij} = local production, Φ_{ij} = local pressure strain, D_{ij} = net diffusive transport, ε_{ij} = local dissipation tensor โดย $C_1 = 2.5$, และ $C_2 = 0.55$ เป็นค่าคงที่ [12]

2.3 รูปแบบทั่วไปของสมการควบคุม

จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นทุกสมการสามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานที่ประกอบด้วยเทอม convection, diffusion, และ source terms [14,15] สำหรับการไหลในสองมิติได้ดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ใน turbulence model มีค่าดังนี้โดยที่ $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\mu_e = \mu_t + \mu$

$$G = \mu_e \left(2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} (r \rho v \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi x} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (15)$$

โดยที่ ϕ เป็นค่าตัวแปรใด ๆ ตามสมการ $\Gamma_{\phi x}$ และ $\Gamma_{\phi r}$ จะเปลี่ยนแปลงตามค่า ϕ และ S_ϕ เป็น source term สำหรับรายละเอียดของค่า $\Gamma_{\phi x}$, $\Gamma_{\phi r}$ และ S_ϕ ที่ค่า ϕ ต่าง ๆ จะถูกแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสรุปของสมการควบคุม

Conservation of	ϕ	$\Gamma_{\phi x}$	$\Gamma_{\phi r}$	S_ϕ
Mass	1	0	0	0
R-momentum	u	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} pk \right) - \frac{2\mu_e u}{r^2}$
	v	μ_e	μ_e	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{2}{3} pk \right)$
Turbulent kinetic energy	k	μ_e / σ_k	μ_e / σ_k	$G - \rho \varepsilon$
TKE dissipation Rate	ε	$\mu_e / \sigma_\varepsilon$	$\mu_e / \sigma_\varepsilon$	$(C_{\varepsilon 1} G) \frac{\varepsilon}{k} - (C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$

2.4 Discretization ของสมการ

Discretization สมการข้างต้นได้โดยการอินทิเกรตสมการควบคุมตลอดทั้งปริมาตรควบคุม ที่มีการแบ่งออกเป็นกริด ทำให้ได้ระบบสมการอย่างง่ายดังต่อไปนี้

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + S \quad (16)$$

สมการที่ (11) นี้จะได้มาจากสมการ discretised diffusion term ของสมการควบคุม โดยใช้ central differencing scheme ของสมการควบคุมนั้นจะไม่สามารถ discretise ได้โดยตรงในการวิเคราะห์นี้ต้องอาศัย upwind scheme [15] เข้าช่วย

Upwind scheme เป็นการประมาณค่า convection flux ที่ผิวของปริมาตรควบคุมโดยการใช้ค่าที่ upstream สามารถเขียนเป็นรูปของสมการเชิงเส้นได้เป็น

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \rho u_e > 0 \\ \phi_E & \rho u_e < 0 \end{cases} \quad (17)$$

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

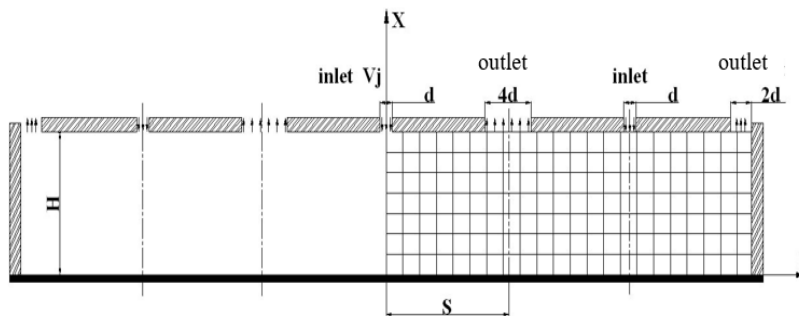
3.1 ลักษณะขอบเขตของการแก้ปัญหา

ปัญหาที่นำมาวิเคราะห์นี้ได้มาจากการทดลอง ซึ่งเป็นการทดลองโดยการฉีดของไหลจากหัวฉีดหลายช่องพุ่งชนของ Saad et al [16] หาค่าต่าง ๆ จากในรูปที่ 1 โดยของไหลที่ฉีดคืออากาศที่อุณหภูมิ 26 °C ความเร็วเฉลี่ยของการฉีด $V_j = 16.576$ m/s มีค่า $Re = 11,000$ $\rho = 1.225$

kg/m^3 และ $\mu = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$, ในการจำลองกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ต (d) = 10, 13.3 mm. ระยะห่างระหว่างเจ็ต (S) = 80, 79.8 mm, ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเจ็ตถึงผนังที่เจ็ตพุ่งชน (H) = 160, 212.8 mm, เมื่อคิดเป็นสัดส่วนเทียบกันจะได้ดังต่อไปนี้, $SD = S/D = 8, 6$, $HD = H/d = 16, 16$, $SH = S/H = 0.5, 0.375$ ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าขนาดพิกัดที่ใช้ในการทดลอง

d(mm)	S/d	H/d	S/H
10	8	16	0.5
13.3	6	16	0.375



รูปที่ 1 ลักษณะของการฉีดของกลุ่มเจ็ตพุ่งชน และ Computational Domain

ในการวิเคราะห์จำลองการไหลในที่นี่จะใช้เงื่อนไขของ symmetry แบบ 2 มิติ ที่ทางเข้าเป็นแบบป้อนค่าความเร็ว (velocity inlet) ทางออกเป็นแบบความดันบรรยากาศ เงื่อนไขขอบที่ผนังท่อผนังด้านข้าง ผนังด้านบนและล่างเป็นแบบไม่ลื่นไถล ความเร็ว u และ v ตามผนังทั้ง 4 ด้านมีค่าเป็นศูนย์และใช้ wall function ในการประมาณค่าตำแหน่งที่ใกล้ผนัง และมีการใช้ mesh สำหรับ $y+ \approx 1.6$ ที่ติดกับบริเวณใกล้ผนัง เพื่อแก้ปัญหาชั้นความหนาแบบราบเรียบ ($y+ < 5$) ดังแสดงในรูปที่ 1 ฉะนั้น computational domain จะใช้เพียงครึ่งเดียว โดเมนและเมชที่ใช้ในการคำนวณจำนวน 38,400 เมช ในที่นี้จะสนใจการจำลองในช่วงจุด $x/d = 0$ ถึง 12 และ $v/V_j = 0$ ถึง 1.2 ซึ่งผลที่ได้จะเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง [16] และยังแสดงผลของ contour plot เป็น stream function และของ vector plot ด้วย

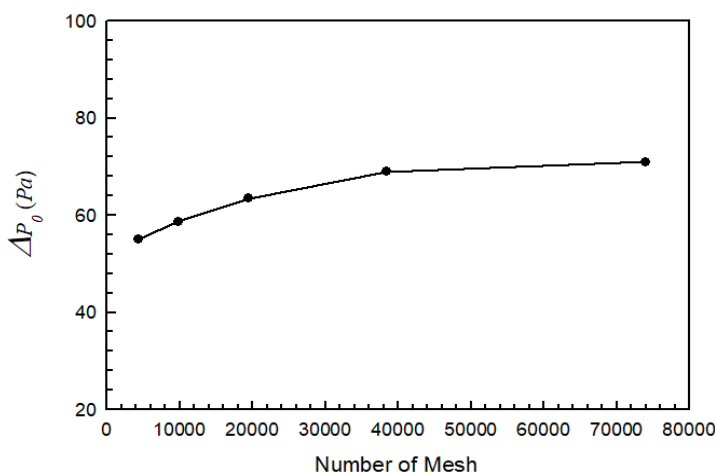
3.2 กระบวนการหาคำตอบ

การคำนวณในที่นี้ สมการค่าเฉลี่ยของเวลา (time averaged Navier-Stokes) ในสมการที่ (1), (2) สมการ turbulent kinetic energy (TKE) ในสมการที่ (6), สมการ dissipation rate ของ turbulent kinetic energy ในสมการ (7), สมการ (4) สำหรับ standard $k-\varepsilon$ model หรือสมการ (9) สำหรับ RSM จะถูกแก้สมการโดยอาศัยวิธีการเชิงตัวเลขที่เรียกว่า วิธีการปริมาตรสืบเนื่อง โดยใช้ SIMPLE algorithm [14,15] ในการแยกความสัมพันธ์ที่มีต่อกันระหว่างความดันกับความเร็ว และยังใช้ในกระบวนการทำซ้ำ ส่วน upwind scheme จะใช้ในการ discretise เทอม convection และ เทอม diffusion จะถูก discretise โดย central differencing scheme บนกริดที่แบ่งแบบ staggered ในการแก้ระบบสมการที่เกิดขึ้นจะใช้เทคนิคของวิธีการ TDMA (tri diagonal matrix algorithm) แบบ line by line sweeping ในการหาคำตอบ [12,15] คอมพิวเตอร์ที่ใช้ Gen 12th Intel(R) core i7 processor (14 threads) 20 core CPU 2.70 GHz RAM 16 GB

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

4.1 การตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเมช

ทำได้โดยการเพิ่มจำนวนเมชไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งการเพิ่มจำนวนเมชไม่ส่งผลต่อค่าที่วิเคราะห์ จากแบบจำลองซึ่งในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความดัน ΔP_0 (Pa) ที่จุด stagnation pressure เมื่อใช้จำนวนเมช 5 ค่าคือ 4,293 เมช 9,825 เมช 19,494 เมช 38,400 เมชและ 74,000 เมช จากผลการเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าความดัน ΔP_0 (Pa) มีค่าความแตกต่างน้อยลงเมื่อใช้จำนวนเมชมากขึ้น สรุปได้ว่าการเลือกใช้จำนวนเมช 38,400 ก็เพียงพอสำหรับการจำลอง

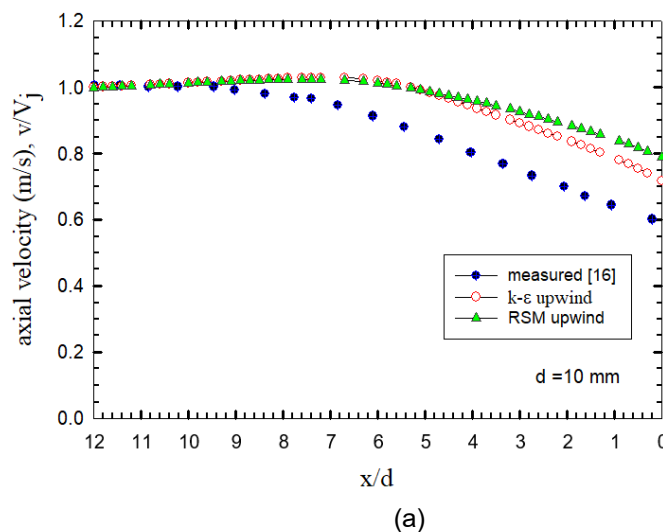


รูปที่ 2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของจำนวนเมชที่ใช้สำหรับค่าความดัน ΔP_0 (Pa)

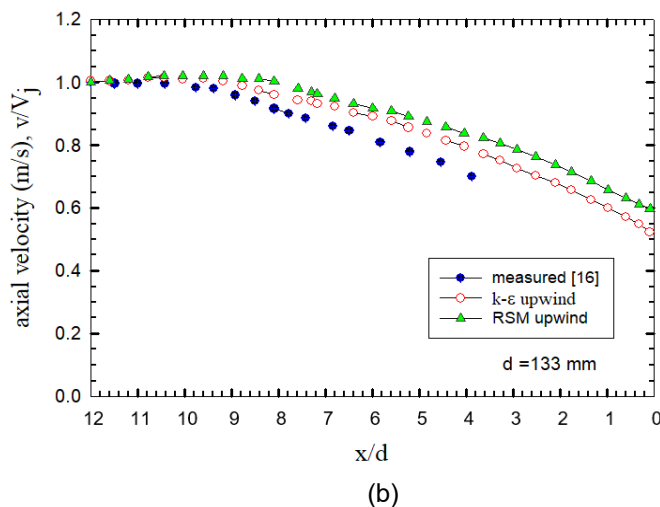
ผลจากการวิเคราะห์การไหลแบบปั่นป่วนที่มีการไหลเจ็ตพุ่งชนโดยอาศัยสมการเชิงตัวเลขร่วมกับ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ถูกนำมาแสดงในรูปของโปรไฟล์ความเร็วตามแนวแกนกลาง v/V_j ที่กรณีขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d = 8$, $H/d = 16$, $s/H = 0.5$ และกรณีขนาด $d = 13.3$ mm, ที่ $s/d = 6$, $H/d = 16$, $s/H = 0.375$ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (x/d) กับระยะความสูง (H) ของช่องการไหลออกที่แตกต่างกัน ($2d, 4d$) และมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณความเร็วเฉลี่ย u/V_j ตามแนวรัศมี (r/d) ดังที่จะแสดงต่อไป

รูปที่ 3(a), (b) ผลการทำนายระหว่าง standard $k-\varepsilon$ model และ RSM เทียบกับผลการทดลองที่ใช้ upwind scheme ร่วมกันทำนาย โดยพิจารณากรณีขนาด $d = 10$ และ 13.3 mm จากรูปที่ 3(a) กรณี $d = 10$ mm แสดงโปรไฟล์ของความเร็วทางออกของเจ็ตจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวค่าของผลจากการทำนาย standard $k-\varepsilon$ model และ RSM ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนผิดพลาดจากผลการทดลองทั้ง 2 models แต่ standard $k-\varepsilon$ model ให้ผลการทำนายใกล้เคียงสอดคล้องกับผลการทดลองในช่วงระยะ $x/d = 10 - 12$ ซึ่งความเร็ว v/V_j ที่ออกมาจากแกนกลางหัวเจ็ตยังมีค่าขนาดคงที่สม่ำเสมอ เมื่อผ่านบริเวณนี้ไปค่าความเร็วจะให้เส้นกราฟเบี่ยงเบนห่างออกจากผลการทดลองและจากนั้นยังห่างเพิ่มมากขึ้นอีกตามลำดับจนถึงตลอดค่าที่ช่วงของความเร็วค่อยๆ ลดลงจนถึงที่ $x/d = 0$ ซึ่งที่จุดนี้มีค่าความเร็ว $v/V_j = 0.715$ และของ RSM $v/V_j = 0.78$ ส่วนการทดลองได้ $v/V_j = 0.6$ และในส่วนนี้ จากรูปที่ 4(a),(b) และ 5(a),(b) เส้นแสดงการไหล stream function และ vector ของความเร็วที่พุ่งออกมาจากหัวเจ็ตคู่ที่ผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงและเกิดการกระจายแยกออกด้านข้างก่อนที่จะพุ่งชนกระทบผนังด้านล่างและยังทำให้เส้นสายธารกระแสการไหลหมุนวนไม่เป็นระเบียบของสนามการไหล มาประกอบในการวิเคราะห์สันนิษฐานว่าคงเนื่องมาจากคือจากจุดตำแหน่งความเร็วที่หัวเจ็ตทำการฉีดของไหลพุ่งตรงไปเป็นความเร็วตามแนวแกนกลางออกไปบริเวณพื้นที่โล่งซึ่งของไหลทำการไหลได้อย่างสะดวกและอิสระ มีการแยกตัวของการไหลไม่มากและด้วยความเร็วที่สูงก็เพียงพอใช้ได้เฉพาะกับการไหลที่ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์ของ standard $k-\varepsilon$ model ดีกับการไหลห่างจากผนัง แต่ไม่แม่นยำบริเวณใกล้ผนัง โดยที่ใช้ในการคำนวณผลเพียงแค่ 2 สมการเท่านั้น ส่วนแบบ RSM ใช้กับการไหลที่ซับซ้อนมีการไหลกระแสความเร็วหมุนเวียนสูง ตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส คำนวณโดยใช้ความเค้นเรย์โนลด์ส (reynolds stress) โดยทั่วไป 7 สมการ ดังนั้นจากรูปแบบลักษณะปัญหาแบบนี้และผลที่ได้จากการจำลองทั้ง 2 model จะเห็นได้ว่าผลการจำลองโดยของ standard $k-\varepsilon$ model ค่าความเร็วจะมีความแม่นยำสอดคล้องใกล้เคียงเฉลี่ย 89.67% ส่วน RSM 87.43% เมื่อเทียบกับผลการทดลอง [16] และรูปที่ 3(b) กรณี $d = 13.3$ mm โปรไฟล์ความเร็วแกนกลางของเจ็ตหลังจากที่เริ่มต้นการฉีดออกมา จะให้ค่าความผิดพลาดเพิ่มมากขึ้นทั้ง 2 models จากช่วงระยะ $x/d = 0 - 12$ แต่เมื่อข้อมูลจากการทดลองที่มีอยู่แค่ช่วง $x/d = 0 - 4$ โดยที่ตำแหน่ง $x/d = 4$ ค่าความเร็วของ

$k-\varepsilon$, $v/V_j = 0.8$ และ RSM, $v/V_j = 0.84$ ส่วนการทดลองได้ $v/V_j = 0.7$ และจากรูปที่ 6(a),(b) และ 7(a),(b) เส้นแสดงการไหล stream function และ vector ของความเร็วที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงที่มีขนาดใหญ่และเกิดการกระจายแยกออกด้านข้างไม่ค่อยเป็นระเบียบก่อนที่จะพุ่งชนกระทบผนังด้านล่างมากกว่ากรณีแรก จากการวิเคราะห์ก็ควรจะสันนิษฐานจากสมการการคำนวณของโมเดลเหมือนกรณีแรกและส่วนหนึ่งคงเนื่องจากขนาด d ระยะ S และ H ที่มากกว่ากรณีแรก ทำให้ระยะการฉีดจากหัวฉีดมายังผนังที่ถูกฉีดกระทบที่ไกลกว่าเดิมซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีผลต่อพฤติกรรมของลักษณะการไหลของของไหลของสนามการไหล และอีกเหตุผลหนึ่งคงเพราะการสร้างเมชที่มีความละเอียดมากขึ้น จำนวนจุดต่อมากขึ้นผลต่างที่เกิดขึ้นจากตัวแปรอิสระ (DOF) จะสามารถแก้ปัญหาได้ผลลัพธ์ที่ลู่เข้าสู่คำตอบได้ดีมากกว่าจำนวนเมชที่หยาบกว่า จากผลการจำลองทั้งสองแบบจำลองความปั่นป่วนทำให้เห็นถึงรูปแบบและลักษณะของรูปแบบการไหลของของไหลก่อนเข้าและออกสู่สภาวะบรรยากาศของตลอดจนโปรไฟล์การไหลของของไหลที่เกิดการหมุนวนเป็นวงกลมตลอดจนการแยกตัวของเวกเตอร์การไหลภายในพื้นที่จำกัด และพบว่าผลการจำลองของ standard $k-\varepsilon$ model จะมีความแม่นยำสอดคล้องใกล้เคียงเฉลี่ย 93.97% ส่วน RSM 91.31% เมื่อเทียบกับการทดลอง [16]



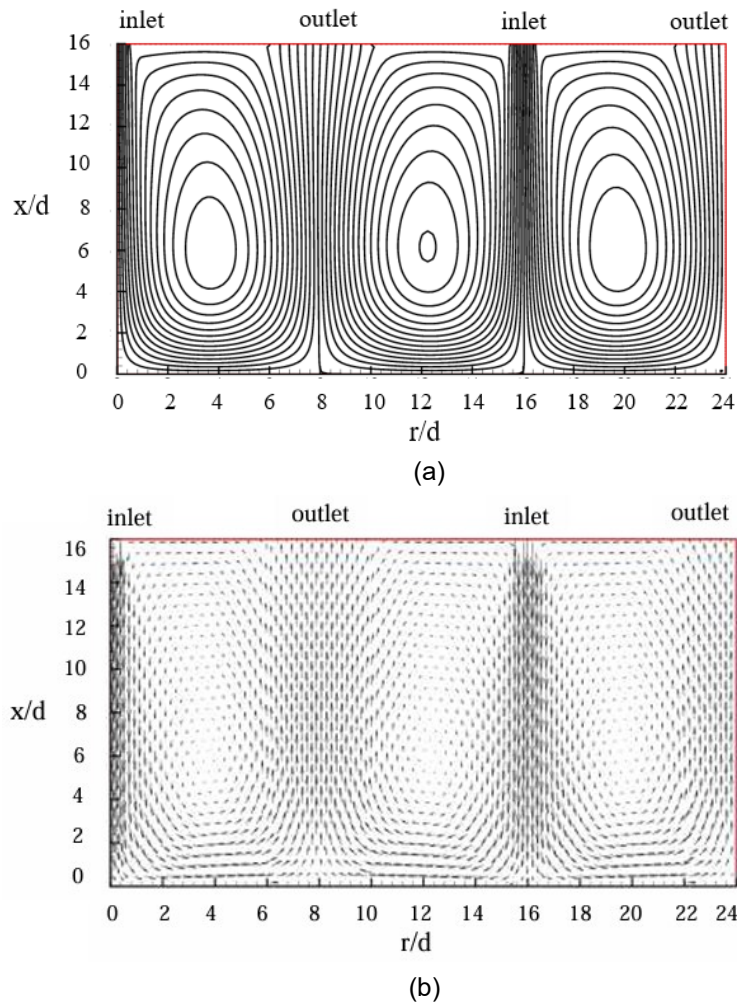
รูปที่ 3 กราฟแสดงโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนกลางของเจ็ต ผลจากการคำนวณของ standard $k-\varepsilon$ model และ RSM เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง[16] โดย (a) ขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$ (b) ขนาด $d = 13.3$ mm, $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$



รูปที่ 3 กราฟแสดงโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็วตามแนวแกนกลางของเจ็ต ผลจากการคำนวณของ **standard $k-\epsilon$ model** และ **RSM** เปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง[16] โดย (a) ขนาด $d = 10$ mm, ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$ (b) ขนาด $d = 13.3$ mm, $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$ (ต่อ)

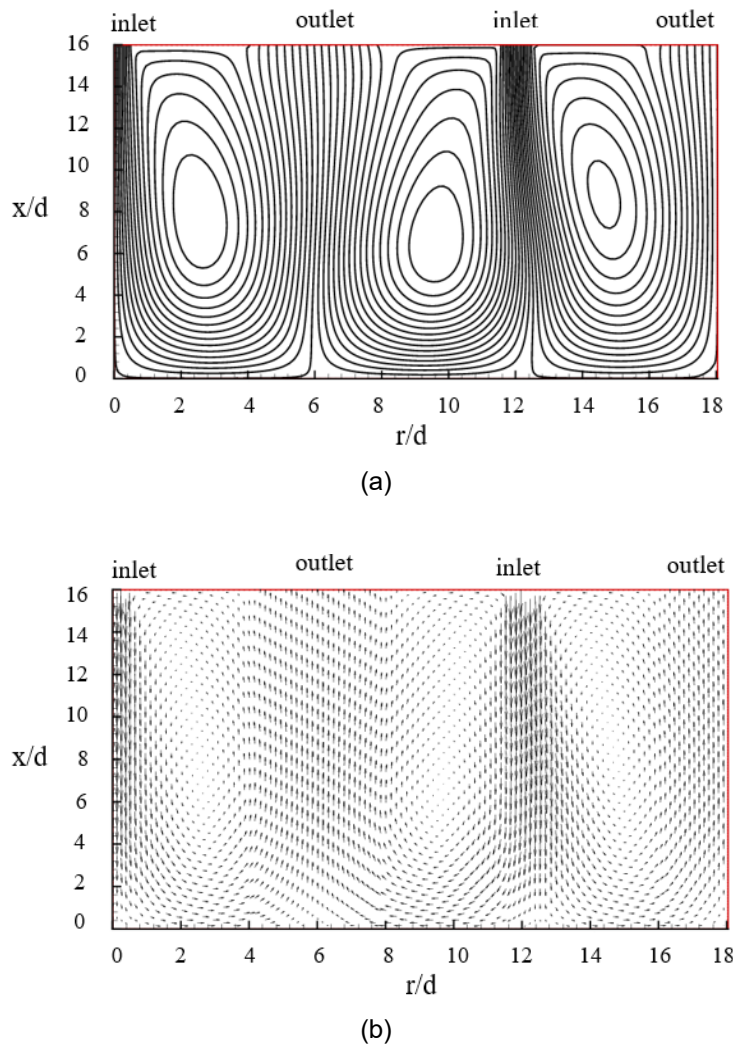
เส้นแสดงการไหล stream function และ vector plot ของความเร็วรูปที่ 4(a), (b) ถึงรูปที่ 7(a), (b) ที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผิวผนังด้านบน มีทิศทางแนวแกนกลางไม่เป็นแนวเส้นตรงก่อนที่จะพุ่งชนกระบอกผนังด้านล่างฝั่งตรงข้ามและยังทำให้เส้นสายธารกระแสน้ำไหลหมุนวนไม่เป็นระเบียบทั้ง 3 วง จะมีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนแตกต่างกัน เนื่องมาจากการไหลของเจ็ตออกมาจากหัวฉีดแล้วพุ่งชนพื้นผิวที่จุดศูนย์กลาง(stagnation point) เกิดขึ้นอย่างรุนแรง หลังจากนั้นเจ็ตจะไหลบนพื้นผิวรอบจุดหยุดนิ่ง ภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของเจ็ตอย่างกะทันหันหลังจากการชนและเกิดกระแสไหลออกไปด้านข้างและจะเกิดการชนกันของเจ็ตผนังที่ติดกันเนื่องจากหัวฉีดมี 2 หัวและจะรวมตัวกันเปลี่ยนเป็นการไหลย้อนขึ้นไปผนังด้านบนมีทางออก 2 ช่องทาง ส่วนกระแสไหลที่ออกไม่ได้จะเกิดกระแสไหลวนที่จะเข้ามาผสมกับการไหลของเจ็ตก่อนพุ่งชนพื้นผิวอีกครั้ง

รูปที่ 4(a), (b) เส้นสายธารกระแสน้ำไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็วเป็นผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\epsilon$ model ขนาดที่ $d = 10$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 6.4$, 6.3 , 6.42 ที่ $r/d = 3.6$, 12.2 , 19.7



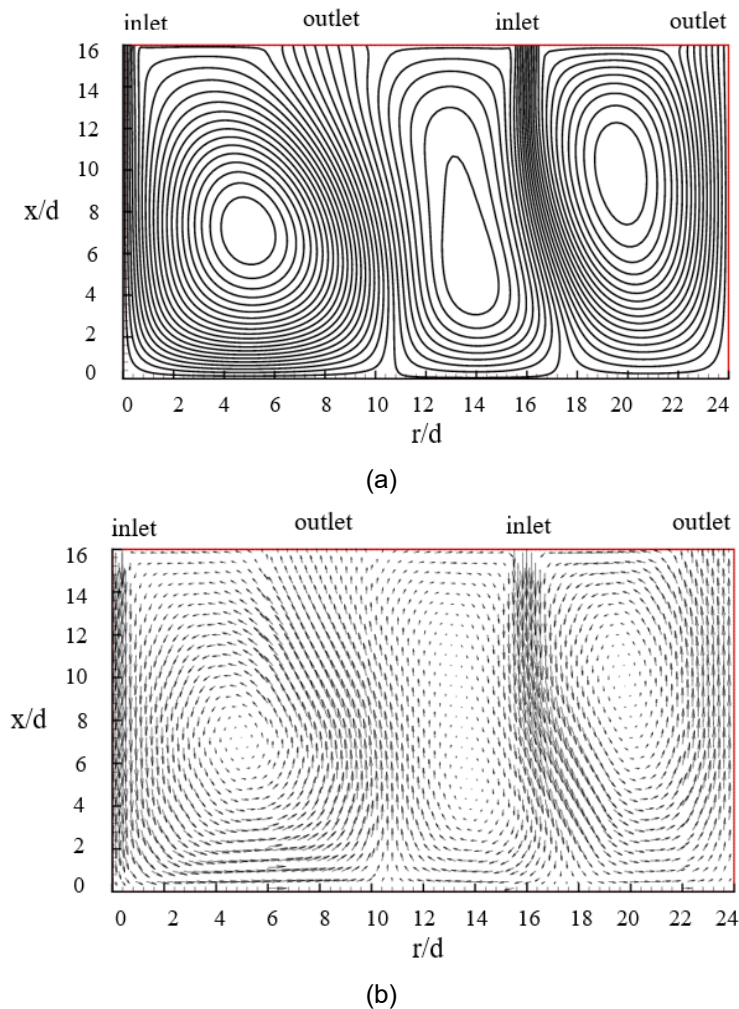
รูปที่ 4 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\varepsilon$ model ขนาด $d = 10$ mm ที่ $s/d=8$, $H/d=16$, $s/H=0.5$

รูปที่ 5(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\varepsilon$ model ขนาดที่ $d = 13.3$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 8, 7, 8.82$ ที่ $r/d = 2.41, 9.6, 14.6$



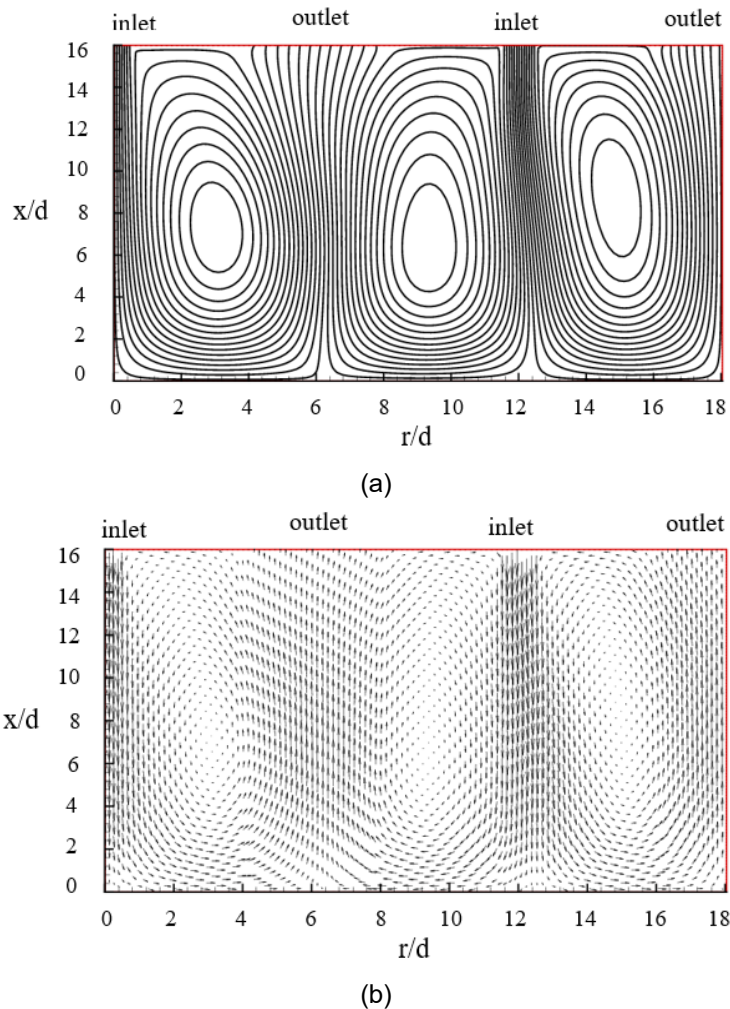
รูปที่ 5 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ standard $k-\varepsilon$ model ขนาด $d = 13.3$ mm ที่ $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$

รูปที่ 6(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาดที่ $d = 10$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 7.3, 6.4, 10$ ที่ $r/d = 4.81, 13.6, 19.6$



รูปที่ 6 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาด $d = 10$ mm ที่ $s/d = 8$, $H/d = 16$, $s/H = 0.5$

รูปที่ 7(a), (b) เส้นสายธารการไหลของ steam function และ vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาดที่ $d = 13.3$ mm จะมีการหมุนวนหลักทั้ง 3 วง มีจุดศูนย์กลางตำแหน่งการหมุนวนอยู่ที่ประมาณ $x/d = 7.4, 6.7, 8.8$ ที่ $r/d = 3, 9.4, 14.82$



รูปที่ 7 (a) contour plot ของ stream function (b) vector plot ของความเร็ว ผลจากการคำนวณโดย FOU scheme และ RSM ขนาด $d = 13.3 \text{ mm}$ ที่ $s/d=6$, $H/d=16$, $s/H=0.375$

จากรูปที่ 4(a), (b) ถึง 7(a), (b) กระแสการไหลของ steam function และ vector plot ที่พุ่งออกมาจากหัวฉีดคู่ที่ผิวผนังด้านบน มีทิศทางเส้นสายธารสำหรับการไหลเป็นกลุ่มกระจายลงมาตามแนวแกนกลางและพุ่งชนกระแทกผนังด้านล่างทำให้เส้นสายธารเกิดการกระจายแยกออกไปด้านข้างเป็น 2 กระแสทิศทาง ผังด้านซ้ายจะไหลไปตามผนังด้านล่างและไปปะทะชนกับกระแสการไหลอีกฝั่งหนึ่งที่มีทิศการไหลตรงข้ามกันของอีกหัวฉีดหนึ่ง ทำให้เกิดการผสมกันของของไหลระหว่างบริเวณผิวผนังและการไหลย้อนออกห่างจากผิวผนังขึ้นไปทิศทางข้างบน อีกทั้งยังเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการผสมกระแสการไหลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นไหลออกไปยังช่อง

ทางออกผิวผนังผนังด้านบน ส่วนที่ไหลออกไปทันทีจะวนกลับมารวมกับกระแสสายธารที่ออกจากหัวฉีดต่อไป ส่วนกระแสการไหลฝั่งด้านขวาจะไหลไปปะทะชนผิวผนังด้านข้างและถูกบังคับให้กระแสการไหลมีทิศทางไหลขึ้นไปข้างบนไหลออกไปยังช่องทางออกผิวผนังผนังด้านบน ดังนั้นจะเกิดปรากฏการณ์กระแสการไหลแบบหมุนวนหลายวงรอบจุดศูนย์กลางเหมือนกันทั้ง 2 model กรณีที่ $d = 10$ และ 13.3 mm .

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขทางด้านพลศาสตร์ของไหลของเจ็ตพุ่งชนของแบบจำลองความปั่นป่วนทั้งสองชนิด แบบความปั่นป่วน RSM จะให้คลาดเคลื่อนมากกว่า $k-\varepsilon$ model ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลอง [16]

5. สรุปผลการวิจัย

การเสนอการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองความปั่นป่วน สำหรับการทำนายการไหลโดย standard $k-\varepsilon$ model และ RSM กรณีที่ $d = 10$ และ 13.3 mm เทียบกับผลการทดลอง แบบกลุ่มเจ็ตพุ่งชนในภาพรวมดังต่อไปนี้

1) พบว่าแบบจำลองการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ให้ค่าผลการทำนายสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k-\varepsilon$ model สอดคล้องใกล้เคียงดีกว่า RSM

2) สังเกตได้ว่าบริเวณก่อนและหลังจุดกระทบของการไหล กรณี $d = 10 \text{ mm}$ แบบ standard $k-\varepsilon$ model จะให้เส้นสายธารกระแสการไหลพุ่งตามแนวแกนกลางตรงจากหัวฉีดและช่องทางออกได้ตรงตำแหน่งเข้าออกขอบเขตระบบและเกิดการไหลแบบหมุนวนซึ่งยังเพิ่มการไหลแบบปั่นป่วนได้ดีกว่าแบบ RSM

3) กรณี $d = 13.3 \text{ mm}$ บริเวณก่อนและหลังจุดกระทบของการไหล ทั้ง 2 model จะให้เส้นสายธารกระแสการไหลพุ่งกระจายตอนปลายไม่ตรงตามแนวแกนจากหัวฉีดและเกิดกระแสการไหลแบบหมุนวนหลายวงขนาดไม่เท่ากันมีตำแหน่งศูนย์กลางจำนวน 3 จุด ซึ่งจะส่งผลต่อการหล่อเย็นบริเวณตำแหน่งพื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน

4) แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ standard $k-\varepsilon$ model สอดคล้องได้ใกล้เคียงดีกว่า RSM ที่ช่วงจุดบริเวณตามแนวแกนสันนิษฐานว่าคงเนื่องมาจากคือจุดวางตำแหน่งที่หัวฉีดทำการฉีดของไหลพุ่งตรงไปเป็นความเร็วตามแนวแกนกลางออกไปบริเวณพื้นที่โล่งซึ่งมีความซับซ้อนหรือการแยกตัวของการไหลไม่มากและด้วยความเร็วที่สูงเพียงพอใช้ได้เฉพาะกับการไหลที่ปั่นป่วนอย่างสมบูรณ์เท่านั้นของ standard $k-\varepsilon$ model ที่ใช้แก้สมการพลังงานจลน์ k และการกระจายของความปั่นป่วน ε ส่วนแบบ RSM ใช้กับการไหลที่ซับซ้อนมีการไหลกระแสวนเร็วหมุนเวียนสูงตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส คำนวณโดยใช้ความเค้นเรย์โนลด์ส (reynolds stress) โดยตรง และการคำนวณอาศัยสมการการขนส่ง (transport equations) สำหรับความเค้นเรย์โนลด์สแต่ละส่วน

References

- [1] Lee DH, Bae JR, Park HJ, Lee JS, Ligrani P. Confined, milliscale unsteady laminar impinging slot jets and surface nusselt numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011;54(11-12): 2408-18. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.021.
- [2] Lee DH, Park HJ, Ligrani P. Milliscale confined impinging slot jets Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate. *Milliscale confined impinging slot jets Laminar heat transfer characteristics for an isothermal flat plate* 2012;55(9-10): 2249-60. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.041.
- [3] Nuntadusit C, Wea-hayee M, Bunyajitraduya A, Eiamsa-aed S. Heat transfer enhancement by multiple swirling impinging jet with twister tape swirl generator. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2012;39(1):102-7. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.10.003.
- [4] Caggese O, Gnaegi G, Hannema G, Terzis A, Ott P. Experimental and numerical investigation of a fully confined impingement round jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013;65: 873-82. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.06.043.
- [5] Yousefi-Lafouraki B, Ramiar A, Mohsenian S. Entropy generation analysis of a confined slot impinging jet in a converging channel for a shear thinning nanofluid. *Applied Thermal Engineering* 2016;105: 675-85. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.067.
- [6] Alabdaly IK, Ahmed MA. Numerical investigation on the heat transfer enhancement using a confined slot impinging jet with nanofluid. *Propulsion and Power Research* 2019;8(4):351-61. doi: 10.1016/j.jprr.2019.06.004.
- [7] Kempers R, Colenbrander J, Tan W, Chen R, Robinson AJ. Experimental characterization of a hybrid impinging microjet-microchannel heat sink fabricated using high-volume metal additive manufacturing. *International Journal of Thermofluids* 2020; 5-6:100029. doi: 10.1016/j.ijft.2020.100029.
- [8] Diop SN, Dieng B, Warore A, Mbodj S. A study on heat transfer characteristics by impinging jet within a few amounts of mist. *International Journal of Thermofluids* 2022; 13:100130. doi: 10.1016/j.ijft.2021.100130.
- [9] selimefendugil F, Ghachem K, Alwadai N, Alshammari BM, Kolsi L. Multiple slot nano-jet impingement cooling of a sinusoidal hot surface by using active rotating cylinders under magnetic field. *Case Studies in Thermal Engineering* 2023;47:103007. doi: 10.1016/j.csite.2023.103007.

- [10] Ajeel RK, Fayyadh SN, Ibrahim A, Sultan SM, Najeh T. Comprehensive analysis of heat transfer and pressure drop in square multiple impinging jets employing innovative hybrid nanofluids. *Results in Engineering* 2024;21:101158. doi: 10.1016/j.rineng.2024.101858.
- [11] ANSYS, Inc. Ansys fluent tutorial guide 2024 R1. Canonsburg (PA): ANSYS, Inc.; 2024.
- [12] Wilcox DC. Turbulent modeling for CFD. California: DCW Industries; 1993.
- [13] Gatski TB. Turbulent flows: model equations and solution methodology. In: Peyret R, editors. *Handbook of Computational Fluid Mechanics*. London: Academic Press; 1996. p. 339-415.
- [14] Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. Washington D.C.: Hemisphere; 1980.
- [15] Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the volume method. Harlow: Longman Scientific & Technical; 1995.
- [16] Saad NR, Polat S, Douglas WJM. Confined multiple impinging slot jets without crossflow effects. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 1992;13(1): 2-14.

ประวัติผู้เขียนบทความ



เมืองแก้ว ยุตัน อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี โทรศัพท์ 087-5155965
E-mail: ting_yutan@yahoo.com
งานวิจัยที่สนใจ: Computational Fluid Dynamics Heat exchanger
Combustion การออกแบบเครื่องจักรกล และ พลังงาน

Article History:

Received: June 22, 2025

Revised: June 30, 2026

Accepted: July 10, 2026

การปรับปรุงกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมอาหารโดยการประยุกต์ใช้ ดีเอ็มเอไอซีและระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล: กรณีศึกษาการผลิตปูอัด ในประเทศไทย

PROCESS IMPROVEMENT IN THE FOOD INDUSTRY THROUGH DMAIC AND DIGITAL AUTOMATION: A CASE STUDY OF SURIMI CRAB STICK PRODUCTION IN THAILAND

คมกริช วีรวัฒนา¹ ประยูทธ์ ฤทธิเดช^{2*} และ สุภรัชชัย วรรัตน์³

¹บัณฑิตศึกษา สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210,
khomgrich.w@gmail.com

^{2,3}อาจารย์ประจำหลักสูตร, สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถนนประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210,
^{2*}prayuth.rit@dpu.ac.th, ³vorarat@dpu.ac.th

Khomgrich Weerawatthana¹, Prayuth Rittidatch^{2*} and Suparatchai Vorarat³

¹Graduate Program in Engineering Management, College of Engineering and Technology,
Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road, Lak Si District, Bangkok 10210,
Thailand, khomgrich.w@gmail.com

^{2,3}Faculty Member, Program in Engineering Management, College of Engineering and
Technology, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road, Lak Si District,
Bangkok 10210, Thailand, ^{2*}prayuth.rit@dpu.ac.th, ³vorarat@dpu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร โดย
ประยุกต์ใช้แนวคิด Lean Six Sigma ร่วมกับระบบดิจิทัลและระบบอัตโนมัติภายใต้กรอบแนวคิด
DMAIC การวิจัยใช้รูปแบบ Single-Case Embedded Action Research ในโรงงานกรณีศึกษาทำ
การวิเคราะห์กระบวนการผลิตด้วย Value Stream Mapping 4.0 เพื่อระบุความสูญเสียใน
กระบวนการและกำหนดตัวชี้วัดสำคัญของกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่าการปรับปรุง

กระบวนการผลิตโดยการนำระบบอัตโนมัติมาช่วยเพิ่มผลิตภาพขึ้น 430.87% สามารถลดเวลารอคอยจาก 39.50 วินาทีเหลือ 10.80 วินาที เวลาการนำผลิตลดลง 56.25% และเพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิต (Cpk) จาก 0.40 เป็น 1.55 ได้อย่างมีนัยสำคัญ การนำระบบอัตโนมัติและการเชื่อมโยงข้อมูลแบบดิจิทัลมาใช้ในการดำเนินงานยังช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของการไหลของกระบวนการผลิตและลดความสูญเสียในระบบ นอกจากนี้การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของทางเลือกในการปรับปรุงกระบวนการโดยใช้ตัวชี้วัดทางการเงิน ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) แสดงให้เห็นว่าการลงทุนในการปรับปรุงกระบวนการมีความเหมาะสมให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่า NPV 22.20 ล้านบาท IRR 30.70% และคืนทุนภายใน 2.64 ปี งานวิจัยนี้เสนอแนวทางเชิงบูรณาการสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรมที่มีลักษณะกระบวนการคล้ายคลึงกัน

คำสำคัญ: ดีเอ็มเอไอซี, ลีน-ซิกส์ ซิกมา, ระบบอัตโนมัติดิจิทัล, ผลิตภาพ, อุตสาหกรรมอาหาร

ABSTRACT

This research aims to improve the efficiency of the production process in the food industry by applying Lean Six Sigma concepts along with digital systems and automation under the DMAIC framework. The research employed a single-case embedded action research design in the case study factory, analyzing the production process using Value Stream Mapping 4.0 to identify losses in the process and establish key performance indicators. The study found that improving the production process by incorporating automation increased productivity by 430.87%, reduced waiting time from 39.50 seconds to 10.80 seconds, decreased lead time by 56.25%, and significantly increased the production process capability (Cpk) from 0.40 to 1.55. The implementation of automation and digital data integration in operations also enhanced the continuity of the production process flow and reduced system losses. Additionally, an economic feasibility analysis of process improvement options using financial indicators such as net present value (NPV), internal rate of return (IRR), and payback period showed that the investment in process improvement was justified, yielding a worthwhile return with an NPV of 22.20 million baht, an IRR of 30.70%, and a payback period of 2.64 years. This research presents an integrated approach for developing production process efficiency, which can be applied as a model for industries with similar processes.

KEYWORDS: DMAIC, Lean Six Sigma, Digital Automation, Productivity, Food Industry

1. บทนำ

อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารเป็นหนึ่งในภาคอุตสาหกรรมหลักที่มีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางเศรษฐกิจและความมั่นคงด้านอาหารของประเทศ ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมกำลังเผชิญกับแรงกดดันจากต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น การแข่งขันที่รุนแรง และความต้องการของผู้บริโภคที่เพิ่มขึ้นทั้งในด้านคุณภาพ ความปลอดภัย และความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ [1] ส่งผลให้องค์กรจำเป็นต้องนำแนวคิดการผลิตสมัยใหม่และเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน แนวคิดอุตสาหกรรม 4.0 ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าเป็นกลไกสำคัญในการยกระดับประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โดยอาศัยการบูรณาการทางเทคโนโลยีสารสนเทศ ระบบอัตโนมัติและการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง [2,3] การนำเทคโนโลยีมาใช้โดยไม่มีกรอบการปรับปรุงกระบวนการที่เป็นระบบ อาจไม่ก่อให้เกิดผลลัพธ์เชิงประสิทธิภาพอย่างแท้จริง แนวคิด Lean Six Sigma จึงถูกนำมาใช้ควบคู่กันเพื่อมุ่งลดความสูญเปล่า ลดความแปรปรวน และเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิต [4,5] โดยเฉพาะระเบียบวิธี DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการแก้ปัญหาที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลอย่างเป็นระบบ [6] การประยุกต์ใช้แผนที่สายธารคุณค่า ยังช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของกระบวนการผลิตและระบุจุดคอขวดได้อย่างชัดเจน [7,8] ในอุตสาหกรรมอาหาร การผสมผสานแนวคิด Lean Six Sigma และอุตสาหกรรม 4.0 เข้าด้วยกัน ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถยกระดับทั้งประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพผลิตภัณฑ์และความยั่งยืนขององค์กร [9,10]

งานวิจัยในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่มีรายงานผลการปรับปรุงกระบวนการในลักษณะเชิงพรรณนา หรือมุ่งเน้นการใช้เครื่องมือ Lean Six Sigma แยกส่วนซึ่งยังขาดงานวิจัยที่บูรณาการกรอบ DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และการตัดสินใจลงทุนระบบอัตโนมัติโดยเชื่อมโยงผลลัพธ์ด้านสมรรถนะกระบวนการกับการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมอย่างเป็นระบบ [11]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตปูอัด โดยการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล ซึ่งมุ่งหมายในการเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนการผลิต
- 2) เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม และความคุ้มค่าของการลงทุนในกระบวนการผลิตอัตโนมัติที่นำมาใช้

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1) การบูรณาการ DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลสามารถเพิ่มผลิตภาพได้หรือไม่

2) ผลลัพธ์ด้านสมรรถนะกระบวนการ ค่าดัชนี Cpk สามารถใช้เป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจลงทุนด้านระบบอัตโนมัติในเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมได้หรือไม่

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยด้านการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารได้ให้ความสำคัญกับการลดความสูญเปล่าและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดย Wang et al [12] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ IoT เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตอย่างเป็นระบบ และ Utama and Abirfatin [13] ได้พัฒนากรอบแนวคิด Sustainable Lean Six Sigma เพื่อสนับสนุนการเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนขององค์กร การประยุกต์ใช้ระบบไซเบอร์-กายภาพ (Cyber-Physical Systems) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดย Meudt et al [14] ได้นำเสนอแนวคิด Value Stream Mapping 4.0 เพื่อเพิ่มความโปร่งใสของข้อมูลและการวิเคราะห์กระบวนการผลิตในระบบอัจฉริยะ และ Sanders et al [15] ชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยี Industry 4.0 มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนระบบการผลิตแบบ Lean ในด้านการวิเคราะห์กระบวนการ ขณะที่ McDonald et al [16] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ Simulation ร่วมกับ Value Stream Mapping เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิต ส่งผลให้เกิดการพัฒนา Value Stream Mapping 4.0 ซึ่ง Kolberg and Zuhlke [17] นำเสนอแนวคิด Lean Automation เพื่อบูรณาการข้อมูลและการผลิตอัจฉริยะอย่างเป็นระบบ ด้าน Lean Six Sigma และ DMAIC งานวิจัยของ Antony et al [18] อธิบายพัฒนาการของ Lean Six Sigma และการประยุกต์ใช้ในยุคปัจจุบัน และ Yu et al [19] ได้พัฒนาแบบจำลอง DMAIC สำหรับการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตแบบหลายคุณลักษณะ ขณะที่ Chiarini and Kumar [20] แสดงให้เห็นถึงการบูรณาการ Lean Six Sigma กับ Industry 4.0 เพื่อยกระดับ Operational Excellence

สำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิต Sahoo and Yadav [21] ได้ศึกษาแนวทาง Lean Production Practices ในภาคการผลิต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ Lean ในการลดความสูญเสียนและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ ขณะที่ Sreedharan et al [22] ได้ศึกษาความพร้อมในการประยุกต์ใช้ Lean Six Sigma โดยใช้แบบจำลองประเมินความพร้อม นอกจากนี้ เทคโนโลยีสนับสนุน เช่น Digital Twin [23] การออกแบบการทดลอง (DoE) [24] และ Machine Learning [25] ได้ถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตในระยะยาว

ตารางที่ 1 การสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

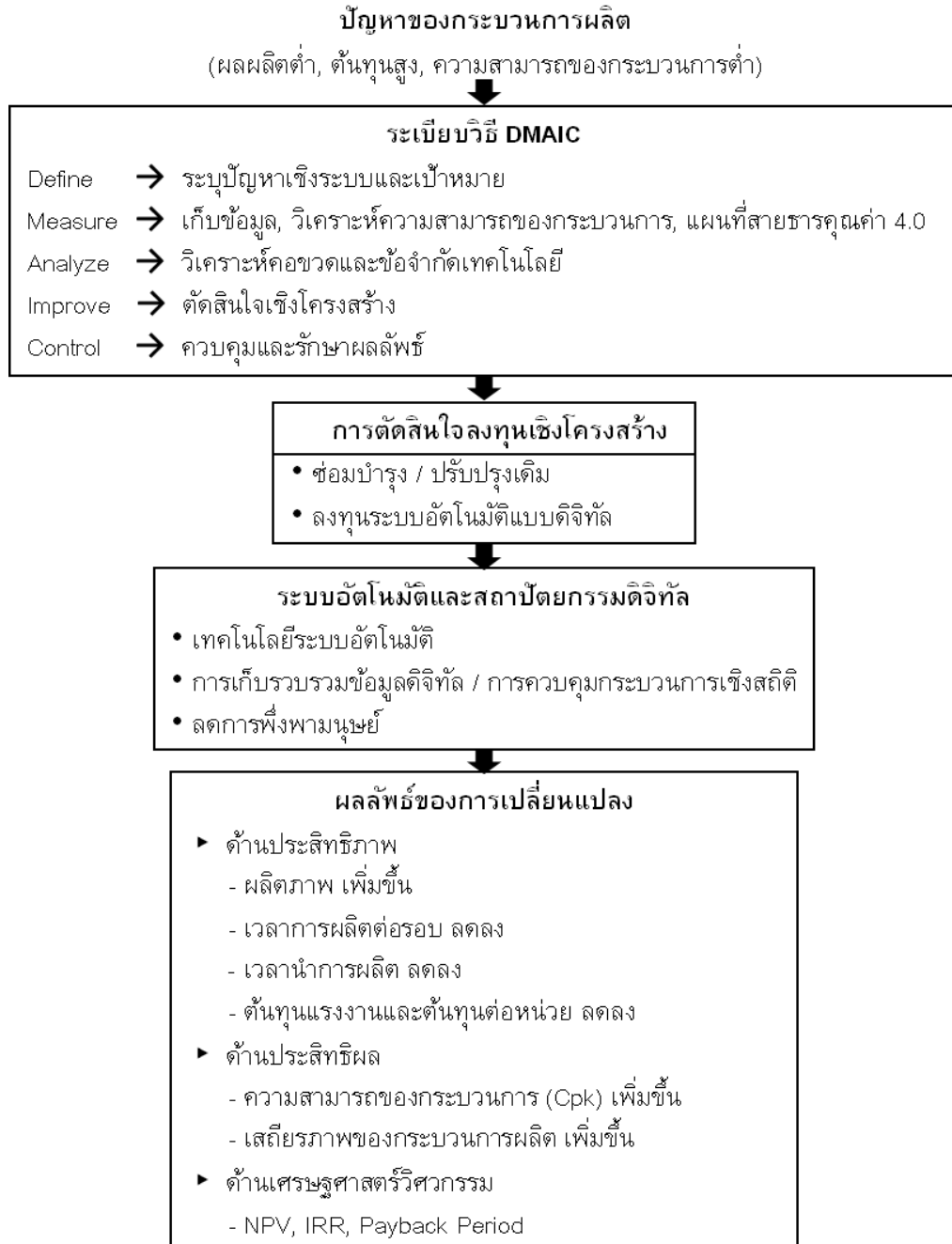
ผู้วิจัย	อุตสาหกรรม	แนวคิด/ เครื่องมือหลัก	ผลลัพธ์	ข้อจำกัดของ งานวิจัย
Wang et al [12]	การผลิต พลังงาน	IoT-enabled energy efficiency / Industry 4.0	การปรับปรุง ประสิทธิภาพพลังงาน และการลดการใช้ พลังงานใน กระบวนการผลิตแบบ real-time monitoring	ยังไม่เชื่อมโยงกับ Lean Six Sigma และไม่มี การวิเคราะห์ Cpk
Utama and Abirfatin [13]	การผลิต	Sustainable Lean Six Sigma Framework	พัฒนารอบแนวคิด เพื่อสนับสนุนการเพิ่ม ประสิทธิภาพและ ความยั่งยืนของ องค์กร	เป็นกรอบแนวคิด เชิงทฤษฎี ยังขาด การประยุกต์ใช้ จริงใน อุตสาหกรรม
Meudt et al [14]	การผลิตทั่วไป	Value Stream Mapping 4.0	แสดงให้เห็นว่าการใช้ VSM 4.0 ช่วยเพิ่ม ความโปร่งใสของ ข้อมูลและลดความ สูญเปล่าใน สายการผลิต	ไม่ได้บูรณาการ DMAIC และไม่มี การวิเคราะห์เชิง สถิติ
Sanders et al [15]	การผลิตทั่วไป	Industry 4.0	เพิ่มประสิทธิภาพของ กระบวนการผลิต	ขาดการวิเคราะห์ ความสามารถ กระบวนการเชิง สถิติ (เช่น Cpk)
Kolberg and Zuhlke [17]	การผลิตทั่วไป	แผนที่สายธาร คุณค่า 4.0	เสนอแนวคิดการบูร ณาการข้อมูลแบบ เรียลไทม์ในระบบการ ผลิตอัจฉริยะ	เป็นโมเดลเชิง แนวคิด ยังไม่มี การพิสูจน์ผลเชิง ปริมาณ

ตารางที่ 1 การสังเคราะห์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้วิจัย	อุตสาหกรรม	แนวคิด/ เครื่องมือหลัก	ผลลัพธ์	ข้อจำกัดของ งานวิจัย
Antony et al [18]	การบริการ และ สาธารณสุข	Six Sigma / DMAIC	การประยุกต์ใช้ DMAIC ในการลดข้อบกพร่อง และปรับปรุงคุณภาพ	ไม่ได้เน้น อุตสาหกรรม อาหารและระบบ อัตโนมัติ
Yu et al [19]	การผลิตทั่วไป	DMAIC	ลดความแปรปรวนและ เพิ่มความสามารถของ กระบวนการ	ยังไม่บูรณาการ กับเทคโนโลยี ดิจิทัลและ Industry 4.0
Chiarini and Kumar M [20]	SMEs	DMAIC	เพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการและลดของ เสียในองค์กรขนาด กลางและเล็ก	ขาดการควบคุม กระบวนการเชิง สถิติระยะยาว
Sahoo and Yadav [21]	การผลิตทั่วไป	Lean Production Practices และ Lean Bundles	สนับสนุนการเพิ่ม ประสิทธิภาพการ ดำเนินงาน ลดความ สูญเสีย และปรับปรุง กระบวนการผลิต	เป็นการวิเคราะห์ เชิงเปรียบเทียบ จากข้อมูลสำรวจ ไม่มีการติดตาม ผลการปรับปรุง ในระยะยาว
Sreedharan et al [22]	อาหาร	Lean Six Sigma	การลด Lead Time และปรับปรุง กระบวนการใน กรณีศึกษา	ขาดการสนับสนุน ระบบดิจิทัลและ การเชื่อมต่อ ข้อมูลแบบ เรียลไทม์

จากตารางที่ 1 พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมาแม้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตได้ แต่
ยังขาดการบูรณาการระหว่าง DMAIC แผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และการประเมินการลงทุนระบบ
อัตโนมัติด้วยเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแนวทางบูรณาการเพื่อเชื่อมโยง

ผลลัพธ์ด้านผลิตภาพ ความสามารถของกระบวนการ และความคุ้มค่าทางการเงินภายใต้กรอบการตัดสินใจเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการบูรณาการ DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล

จากรูปที่ 1 กรอบแนวคิดของงานวิจัย แสดงการบูรณาการระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงโครงสร้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิต และเชื่อมโยงไปสู่ผลลัพธ์ด้านประสิทธิผลและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในอุตสาหกรรมอาหาร

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้การวิจัยเชิงกรณีศึกษาแบบกรณีเดียวร่วมกับการวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Single-Case Embedded Action Research Design) เพื่อศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตปุ๋ยอัดแห้งหนึ่ง โดยผู้วิจัยมีส่วนร่วมในการวิเคราะห์และพัฒนากระบวนการผลิตจริงภายในองค์กร ภายใต้กรอบแนวคิดการปรับปรุงคุณภาพตามวัฏจักร DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) หน่วยวิเคราะห์หลักประกอบด้วยผลผลิตภาพของกระบวนการผลิต ผลผลิตภาพแรงงาน ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) ต้นทุนการผลิต และเสถียรภาพของกระบวนการผลิต

3.2 ขอบเขตและระยะเวลาดำเนินการ

การวิจัยดำเนินการระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมระยะเวลา 8 เดือน ครอบคลุมการเก็บข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อประเมินผลลัพธ์เชิงปริมาณของการปรับปรุงกระบวนการ

3.3 การวิเคราะห์สถานการณ์การปรับปรุงกระบวนการ

เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในการปรับปรุงกระบวนการผลิต งานวิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์สถานการณ์ (Scenario Analysis) โดยเปรียบเทียบสองทางเลือก ได้แก่

- 1) การซ่อมบำรุงและปรับปรุงเครื่องจักรเดิม
- 2) การลงทุนในระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล

ผลการวิเคราะห์พบว่าการลงทุนในระบบอัตโนมัติสามารถเพิ่มกำลังการผลิต ลดเวลานำของกระบวนการ และลดการพึ่งพาแรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญมากกว่าการปรับปรุงเครื่องจักรเดิม การตัดสินใจลงทุนจึงได้รับการประเมินเพิ่มเติมด้วยเครื่องมือทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

3.4 หน่วยมาตรฐานและตัวชี้วัดของกระบวนการ

เพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความสอดคล้องกัน งานวิจัยกำหนดหน่วยมาตรฐานของตัวชี้วัดหลักดังนี้

- 1) อัตราการผลิตและผลิตภาพ: กก./นาที่
- 2) เวลาในกระบวนการผลิต: วินาที
- 3) น้ำหนักผลิตภัณฑ์: กก.
- 4) ผลิตภาพแรงงาน: กก./นาที่/คน

ตัวชี้วัดหลักของกระบวนการประกอบด้วย ผลิตภาพการผลิต เวลาการผลิตต่อรอบ เวลานำการผลิต งานระหว่างทำ (Work-in-Process: WIP) ความสามารถของกระบวนการ (Cpk) และต้นทุนต่อหน่วย

3.5 การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

เพื่อให้ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ งานวิจัยได้ตรวจสอบระบบการวัดตามแนวทาง Measurement System Analysis: MSA เครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลได้รับการตรวจสอบสภาพและการสอบเทียบก่อนการเก็บข้อมูล ข้อมูลการผลิตที่ใช้ในการวิเคราะห์ยังได้รับการตรวจสอบความสอดคล้องกับบันทึกข้อมูลจากระบบดิจิทัลของโรงงาน เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ

3.6 กรอบการดำเนินงานตามวัฏจักร DMAIC

การวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการผลิตดำเนินการตามขั้นตอนของ DMAIC ดังนี้

Define: ระบุปัญหาหลักของกระบวนการผลิต ได้แก่ ผลิตภาพต่ำ ความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพ และการสะสมของงานระหว่างกระบวนการ โดยกำหนดตัวชี้วัดหลักของกระบวนการ เช่น ผลิตภาพ เวลาการผลิตต่อรอบ เวลานำ และค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ

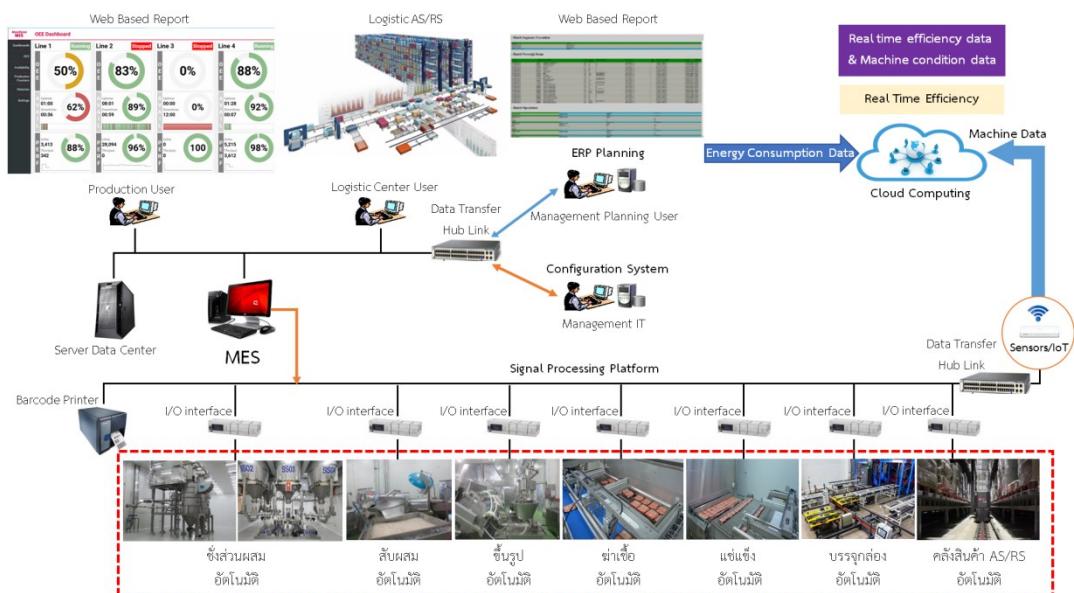
Measure: เก็บข้อมูลกระบวนการผลิตเดิมและวิเคราะห์ตัวชี้วัดของกระบวนการ เช่น อัตราการผลิต ผลิตภาพแรงงาน และความสามารถของกระบวนการ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบการผลิตเดิม

Analyze: วิเคราะห์สาเหตุของความสูญเสียในกระบวนการโดยใช้แผนที่สายธารคุณค่า 4.0 (Value Stream Mapping 4.0) เพื่อระบุจุดขาดของกระบวนการผลิต ทั้งในด้านเวลา เครื่องจักร และการใช้แรงงาน

Improve: ออกแบบกระบวนการผลิตใหม่โดยนำระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมาใช้ พร้อมปรับปรุงรูปแบบการไหลของกระบวนการผลิตเป็นแบบ One-Piece Flow เพื่อลดเวลารอคอยและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิต

Control: กำหนดมาตรการควบคุมเพื่อรักษาประสิทธิภาพของกระบวนการที่ปรับปรุงแล้ว โดยใช้ระบบติดตามผลผ่าน Manufacturing Execution System: MES การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) และการทบทวนประสิทธิภาพของกระบวนการอย่างสม่ำเสมอ

3.7 สถาปัตยกรรมดิจิทัล

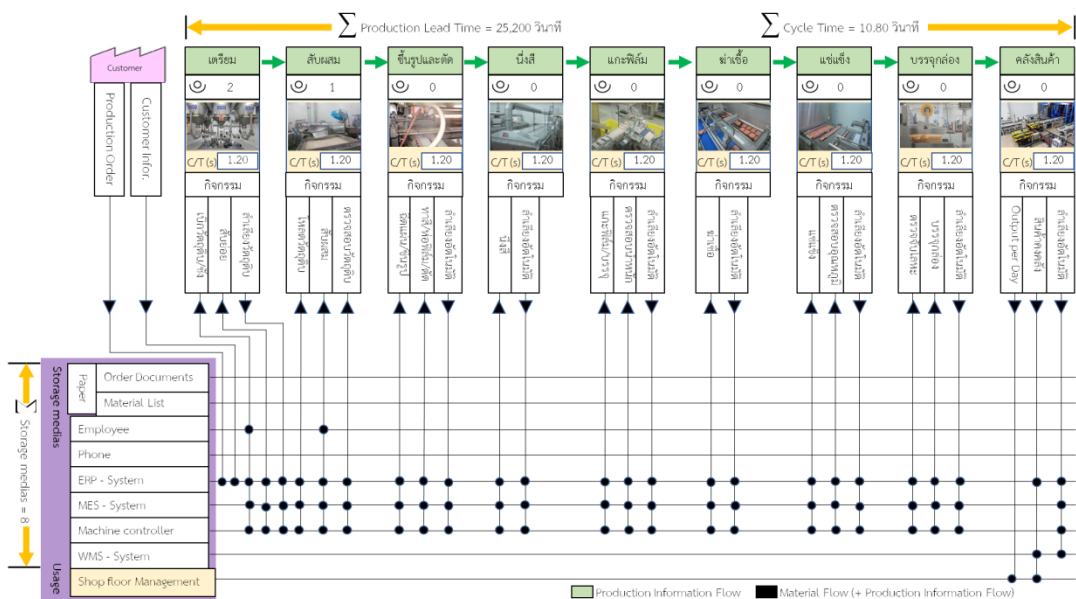


รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมการเชื่อมโยงเครื่องจักรของกระบวนการผลิต

จากรูปที่ 2 ซึ่งพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา แสดงสถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อเครื่องจักรของกระบวนการผลิต โดยเป็นการบูรณาการระบบอัตโนมัติในระดับปฏิบัติการ (Operation System) โดยเครื่องจักรแต่ละสถานีเชื่อมต่อผ่าน I/O Interface เข้าสู่ Signal Processing Platform และส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ Manufacturing Execution System: MES ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างระบบ Enterprise Resource Planning: ERP กับพื้นที่การผลิตจริง การไหลของข้อมูลเริ่มจากระบบ ERP ที่ทำหน้าที่วางแผนทรัพยากร รับคำสั่งซื้อ และจัดทำแผนการผลิต จากนั้นคำสั่งผลิตจะถูกส่งต่อไปยังระบบ MES เพื่อแปลงเป็นคำสั่งควบคุมการทำงานของเครื่องจักร พร้อมเชื่อมต่อกับระบบคลังสินค้าอัตโนมัติ Automated Storage and Retrieval

System: AS/RS ระหว่างการผลิต ข้อมูลผลการผลิตจริง เช่น ปริมาณผลผลิตและสถานะเครื่องจักร จะถูกส่งกลับเข้าสู่ MES และอัปเดตสถานะใน ERP แบบเรียลไทม์ โดยมีการจัดเก็บและบริหารข้อมูลผ่าน Cloud Computing พร้อมหน้าจอแสดงผลตัวชี้วัดหลัก (KPIs) แบบเรียลไทม์

การเปลี่ยนแปลงเชิงเทคโนโลยีและกายภาพที่ดำเนินการในขั้นตอนการปรับปรุง ได้ถูกนำมา ออกแบบเป็นแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 ในสภาพอนาคต (Future State) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ ของกระบวนการผลิตใหม่ โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลผลิตภาพของระบบการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนที่สายธารคุณค่า 4.0 ของกระบวนการผลิตหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 3 ซึ่งพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการผลิตของโรงงานกรณีศึกษา แสดงแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 ในสภาพอนาคต (Future State) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบกระบวนการใหม่โดยการนำเทคโนโลยีอัตโนมัติเข้ามาใช้ เพื่อแก้ไขปัญหาคอขวด ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงประสิทธิภาพดังนี้

1) การกำจัดคอขวดและสร้างสมดุลของสายการผลิต ปัญหาคอขวดที่กระบวนการเตรียมมีเวลาการผลิตต่อรอบอยู่ที่ 11.70 วินาที ได้รับการแก้ไขอย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เวลาการผลิตต่อรอบของทุกกระบวนการผลิตมีความสมดุลอยู่ที่ 1.20 วินาที การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการผลิตของกระบวนการโดยรวม ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมจาก 6.22 กก./นาที เป็น 33.02 กก./นาที ศักยภาพการผลิตเชิงทฤษฎี (Theoretical Capacity) คำนวณจาก $60 / 1.20 = 50$ กก./นาที

จากการวัดผลการเดินระบบจริงภายหลังการปรับปรุง พบว่าอัตราการผลิตเฉลี่ย เท่ากับ 33.02 กก./นาฬิกา โดยค่า 50 กก./นาฬิกา เป็นศักยภาพเชิงทฤษฎีจากรอบเวลาเครื่องจักร ขณะที่ค่า 33.02 กก./นาฬิกา เป็นผลการผลิตจริงภายใต้เงื่อนไขการเดินระบบ

2) การลดเวลานำการผลิตและการสร้างการไหลแบบต่อเนื่อง การสร้างสมดุลของกระบวนการ ทำให้กระบวนการผลิตสามารถทำงานในลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง ส่งผลให้สินค้าคงคลังระหว่างผลิตสะสมอยู่ที่ 1,028.80 กก. ถูกกำจัดออกไปจนหมดเท่ากับศูนย์ การกำจัดเวลารอคอยนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เวลานำการผลิตลดลงจาก 57,600 วินาที เหลือเพียง 25,200 วินาที หรือคิดเป็น 56.25% ทำให้ผลรวมของเวลาในการผลิตต่อรอบรวมลดลงเหลือเพียง 10.80 วินาที

3) การยกระดับผลิตภาพด้านแรงงาน การนำระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมาใช้ในการบวนการผลิต ส่งผลให้การพึ่งพาแรงงานคนลดลง โดยจำนวนพนักงานในกระบวนการผลิตลดลงจาก 40 คน เหลือ 3 คน คิดเป็นการลดลง 92.50% การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลด้านผลผลิต (Output) และปัจจัยนำเข้า (Input) ทำให้ผลิตภาพแรงงานโดยรวมเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถคำนวณเปรียบเทียบได้ดังนี้

3.1) ผลิตภาพแรงงานก่อนการปรับปรุง: คำนวณจากอัตราการผลิตที่ถูกจำกัดด้วยคอขวด 5.13 กก./นาฬิกา หารด้วยจำนวนพนักงานทั้งหมด 40 คน คิดเป็น 0.13 กก./นาฬิกา/คน

3.2) ผลิตภาพแรงงานหลังการปรับปรุง: คำนวณจากค่าเฉลี่ยผลิตภาพการผลิตที่วัดได้จริง 33.02 กก./นาฬิกา หารด้วยจำนวนพนักงาน 3 คน คิดเป็น 11.01 กก./นาฬิกา/คน

ดังนั้นผลิตภาพแรงงานเพิ่มขึ้นจาก 0.13 เป็น 11.01 กก./นาฬิกา/คน คิดเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 8,369% เมื่อเทียบกับสภาวะก่อนการปรับปรุง การเพิ่มขึ้นอย่างมากของผลิตภาพแรงงานเกิดจากการลดจำนวนแรงงานลงจาก 40 คน เหลือ 3 คน ควบคู่กับการเพิ่มกำลังการผลิตของระบบอัตโนมัติ

ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระบบอัตโนมัติไม่เพียงแต่เพิ่มกำลังการผลิต แต่ยังยกระดับประสิทธิภาพการใช้แรงงานอย่างก้าวกระโดด และส่งผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการผลิต

4) การปรับปรุงการไหลของข้อมูล

แผนภาพแสดงการบูรณาการระบบสารสนเทศสำหรับการจัดการการผลิตและคลังสินค้า โดยมี การนำระบบ Enterprise Management System: EMS และ Warehouse Management System: WMS มาใช้ในส่วนของ Storage Medias เพื่อสนับสนุนการจัดการข้อมูลแบบดิจิทัลและการเชื่อมโยงข้อมูลแบบเรียลไทม์

5) ความสามารถของกระบวนการค่าดัชนี (Cpk) หลังการปรับปรุงเพิ่มขึ้นเป็น 1.55 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ 1.33 สะท้อนถึงประสิทธิภาพและความสามารถของกระบวนการใหม่ในการผลิตสินค้าที่เป็นไปตามข้อกำหนดได้อย่างสม่ำเสมอ

หลังจากการปรับปรุงและพิสูจน์การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลสามารถเพิ่มผลิตภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงกำหนดแนวทางการควบคุมที่สำคัญ 4 ด้าน ดังนี้

1) การกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงาน จัดทำขั้นตอนการทำงานและแสดงผลบนจอภาพ ณ หน่วยงาน เพื่อลดความผิดพลาดจากการใช้ความจำ และให้พนักงานปฏิบัติตามมาตรฐานเดียวกัน

2) การติดตามและประเมินผลการดำเนินงาน ใช้ระบบ MES และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อติดตามประสิทธิภาพของกระบวนการ พร้อมการประชุมทบทวนผลการดำเนินงานเป็นประจำในระดับรายวันและรายสัปดาห์ เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและแก้ไขปัญหาที่อาจเกิดขึ้น

3) การควบคุมคุณภาพและป้องกันปัญหา ใช้การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control: SPC) โดยนำแผนภูมิควบคุมมาเฝ้าระวังตัวแปรสำคัญของกระบวนการ และจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับเครื่องจักรอัตโนมัติ

4) การส่งเสริมการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง สนับสนุนระบบข้อเสนอแนะจากพนักงานปฏิบัติงาน และจัดให้มีการทบทวนกระบวนการเป็นประจำทุกปี เพื่อค้นหาข้อผิดพลาดใหม่และโอกาสการพัฒนาในอนาคต

4. ผลการวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการบูรณาการระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของระบบการผลิตในหลายขั้นตอน โดยเฉพาะขั้นตอนแกะฟิล์มและบรรจุซึ่งเดิมเป็นคอขวดของสายการผลิต หลังการปรับปรุงพบว่าระบบอัตโนมัติช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของการไหลของกระบวนการ ลดงานระหว่างทำ และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตโดยรวม ผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดหลักของกระบวนการผลิตก่อนและหลังการปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าการนำระบบอัตโนมัติมาช่วยเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการจาก 6.22 กก./นาที่ เป็น 33.02 กก./นาที่ คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 430.87% ขณะเดียวกันเวลาการผลิตต่อรอบลดลงจาก 39.50 วินาที เหลือ 10.80 วินาที และเวลานำการผลิตลดลง 56.25% การปรับปรุงดังกล่าวยังช่วยลดงานระหว่างกระบวนการเหลือศูนย์ และลดจำนวนพนักงานจาก 40 คน เหลือ 3 คน ส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง 15.87% และความสามารถของกระบวนการ (Cpk) เพิ่มขึ้นจาก 0.40 เป็น 1.55 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสากลที่ 1.33 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลร่วมกับแนวคิด DMAIC สามารถยกระดับประสิทธิภาพของระบบการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านกำลังการผลิต คุณภาพ และต้นทุน

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบตัวชี้วัดหลัก ก่อนและหลังปรับปรุง

ดัชนีชี้วัด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	การเปลี่ยนแปลง
ผลิตภาพ (กก./นาที่)	6.22	33.02	+430.87%
เวลาการผลิตต่อรอบ (วินาที)	39.50	10.80	-72.66%
เวลานำการผลิต (วินาที)	57,600	25,200	-56.25%
จำนวนพนักงาน (คน)	40	3	-92.50%
งานระหว่างทำ (กก.)	1,028.80	0	-100%
ความสามารถกระบวนการ (Cpk)	0.40	1.55	+287.50%
ต้นทุนต่อหน่วย (บาท/กก.)	84.16	70.80	-15.87%

หมายเหตุ: ค่าผลิตภาพก่อนการปรับปรุง (6.22 กก./นาที่) คำนวณจากอัตราการผลิตเฉลี่ยที่วัดได้จริงของกระบวนการผลิตทั้งหมดภายใต้การดำเนินงานปกติ จากผลกระทบความไม่สมดุลของกระบวนการผลิตและการประสานงานระหว่างกระบวนการ

4.1 การทดสอบสมมติฐาน

เพื่อยืนยันผลลัพธ์ของการปรับปรุงกระบวนการ ได้ทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติ Two-Sample t-Test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยผลิตภาพก่อนและหลังการปรับปรุง โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการเปรียบเทียบผลิตภาพการผลิตด้วยสถิติ Two-Sample t-test

การทดสอบ	N	Mean	S.D.	SE Mean
ผลิตภาพ หลังปรับปรุง	30	33.02	0.865	0.160
ผลิตภาพ ก่อนปรับปรุง	30	6.22	0.185	0.034

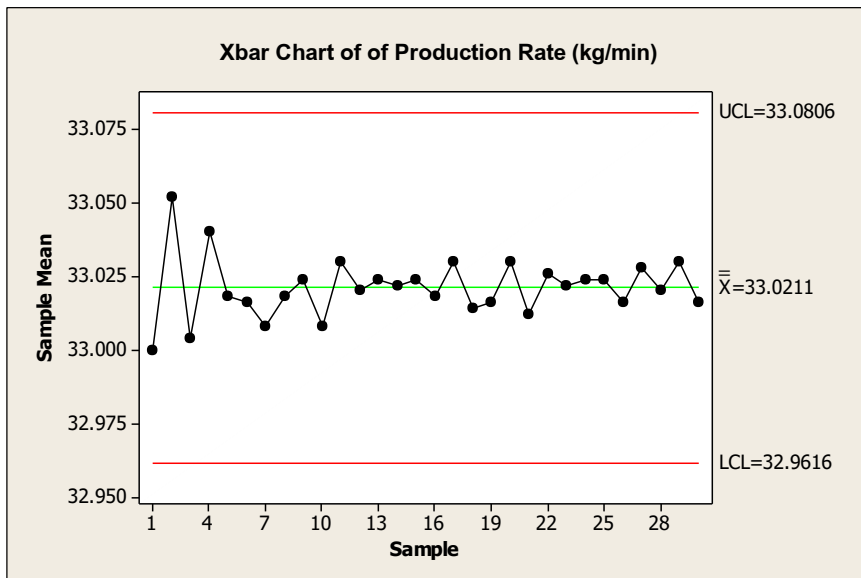
หมายเหตุ: หน่วยเป็น กก./นาที่

จากตารางที่ 3 ผลการทดสอบพบว่าค่าเฉลี่ยผลิตภาพหลังการปรับปรุงสูงกว่าก่อนการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t = 166.54$, $p < 0.001$) โดยมีค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 26.80 กก./นาที่ ดังนั้นจึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่าง (H_0) และสรุปได้ว่าการนำระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมาใช้ร่วมกับแนวคิด DMAIC สามารถเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพของกระบวนการ

เพื่อยืนยันความสม่ำเสมอของกระบวนการผลิตภายหลังการปรับปรุง ได้ดำเนินการวิเคราะห์การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (Statistical Process Control: SPC) โดยใช้แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ Chart) จากข้อมูล 30 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มละ 5 ค่า

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างอยู่ภายในขีดจำกัดการควบคุมบน (UCL) และขีดจำกัดการควบคุมล่าง (LCL) ที่ระดับ 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3σ) และไม่ปรากฏรูปแบบความผิดปกติของข้อมูล เช่น แนวโน้มต่อเนื่องหรือการกระจุกตัวใกล้ขีดจำกัดการควบคุม ผลดังกล่าวสะท้อนว่ากระบวนการผลิตภายหลังการติดตั้งระบบอัตโนมัติอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมเชิงสถิติ (Statistical Control) และมีเสถียรภาพเพียงพอในการสนับสนุนค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ($Cpk = 1.55$) ที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 4 แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ Chart) ของอัตราการผลิตภายหลังการปรับปรุงกระบวนการ

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างทั้ง 30 กลุ่มอยู่ภายในขีดจำกัดการควบคุมที่ระดับ 3σ และไม่พบรูปแบบความผิดปกติของข้อมูล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตภายหลังการปรับปรุงมีเสถียรภาพเชิงสถิติ

4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การประเมินความคุ้มค่าทางการเงินของการลงทุน โดยมีรายละเอียดดังนี้ งบประมาณการลงทุน 44.49 ล้านบาท อายุโครงการ 5 ปี อัตราคิดลด 10% มูลค่าซาก 10% ของงบลงทุน คิดเป็น 4.44 ล้านบาท จากการคำนวณต้นทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับในแต่ละปี ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การประมาณกระแสเงินสดสุทธิประจำปีของการปรับปรุงกระบวนการผลิต

รายการ	การคำนวณ	ผลลัพธ์ (บาท/ปี)
1) ต้นทุนคงที่		
- ค่าเสื่อมราคา	$(44,490,000 - 4,449,000) / 5$	8,008,200
- ค่าเสียโอกาส ดอกเบี้ย	$[(44,490,000 + 4,449,000)/2] \times 10\%$	2,446,950
รวมต้นทุนคงที่ (A)		10,455,150
2) ต้นทุนผันแปร		
- ค่าซ่อมบำรุง	ประเมินรายปี	336,960
- ค่าไฟฟ้า	ประเมินรายปี	1,401,972
รวมต้นทุนผันแปร (B)		1,738,932
3) ต้นทุนรวมต่อปี (A+B)		12,194,082
4) ต้นทุนต่อหน่วย	$12,194,082 / (4,368 \text{ ชม./ปี} \times 1,000 \text{ กก./ชม.})$	2.79 บาท/กก.
5) ผลประหยัดจากการลดแรงงาน	$11.42 \text{ บาท/กก.} \times 373 \text{ กก./ชม.} \times 4,368 \text{ ชม./ปี}$	18,606,195
6) กระแสเงินสดสุทธิประจำปี	(5) - (ต้นทุนผันแปร B)	16,867,263

หมายเหตุ: ในการคำนวณกระแสเงินสดเพื่อหา Payback Period, NPV และ IRR จะไม่นำค่าเสื่อมราคา และค่าเสียโอกาสซึ่งเป็นต้นทุนทางบัญชีมาคิด แต่จะใช้ผลประหยัดที่ได้รับหักลบด้วยต้นทุนที่เป็นเงินสด

จากตารางที่ 4 การประมาณต้นทุนและกระแสเงินสดสุทธิประจำปีจากการลงทุนปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยมีต้นทุนรวมต่อปี 12.19 ล้านบาท และต้นทุนต่อหน่วย 2.79 บาท/กก. จากการลดต้นทุนแรงงานและเพิ่มกำลังการผลิต ส่งผลให้เกิดกระแสเงินสดสุทธิ 16.87 ล้านบาท/ปี ซึ่งเป็นฐานข้อมูลสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่า ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ตัวชี้วัดความคุ้มค่าทางการเงิน การปรับปรุงกระบวนการผลิต

ตัวชี้วัดความคุ้มค่า	การคำนวณ	ผลลัพธ์ที่ได้	การวิเคราะห์และนัยสำคัญ
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)	44,490,000/16,867,263	2.64 ปี	คืนทุนภายใน 2.64 ปี ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดีสำหรับโครงการเครื่องจักรอุตสาหกรรม
จุดคุ้มทุน (Break-Even Point)	10,455,150 / (8.63 บาท/กก.)	1,211,489 กก./ปี	เริ่มทำกำไรเมื่อผลิตเกิน 1.21 ล้านกก./ปี ความเสี่ยงด้านปริมาณการผลิตต่ำ
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)	คำนวณจากกระแสเงินสด 5 ปี ที่อัตราคิดลด 10%	22.20 ล้านบาท	โครงการสร้างมูลค่าเพิ่มสุทธิ 22.20 ล้านบาท สูงกว่าเงินทุนที่ต้องการผลตอบแทน 10%
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	คำนวณจากกระแสเงินสดสุทธิ	30.70%	สูงกว่าอัตราคิดลด 10% แสดงถึงความน่าสนใจในการลงทุน
ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI)	(กระแสเงินสดสุทธิสะสม - เงินลงทุน) / เงินลงทุน	49.90%	การลงทุนให้ผลตอบแทนสุทธิประมาณ 49.90% ภายในอายุโครงการ

จากตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของโครงการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยงบลงทุน 44.49 ล้านบาท พบว่าโครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 22.20 ล้านบาท ที่อัตราคิดลด 10% มีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 30.70% ซึ่งสูงกว่าอัตราคิดลด ระยะเวลาคืนทุน 2.64 ปี และจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1.21 ล้าน กก./ปี สะท้อนว่าโครงการมีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมและมีความเสี่ยงทางการเงินในระดับต่ำ

4.4 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง

การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองถูกนำมาใช้เพื่อประเมินผลกระทบของความไม่แน่นอนของตัวแปรสำคัญต่อความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ โดยใช้มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) เป็นตัวชี้วัดหลัก การวิเคราะห์ดำเนินการโดยปรับค่าตัวแปรที่ละตัวในช่วง $\pm 10\%$ และ $\pm 20\%$ จากค่าฐาน ขณะที่ตัวแปรอื่นคงที่ โดยโครงการในกรณีฐานมีค่า NPV เท่ากับ 22.20 ล้านบาท

ตัวแปรสำคัญที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปริมาณการผลิต ราคาขาย ต้นทุนค่าแรง ต้นทุนค่าไฟฟ้า และเงินลงทุนเริ่มต้น ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความไวของแบบจำลอง

หน่วย: NPV (ล้านบาท)

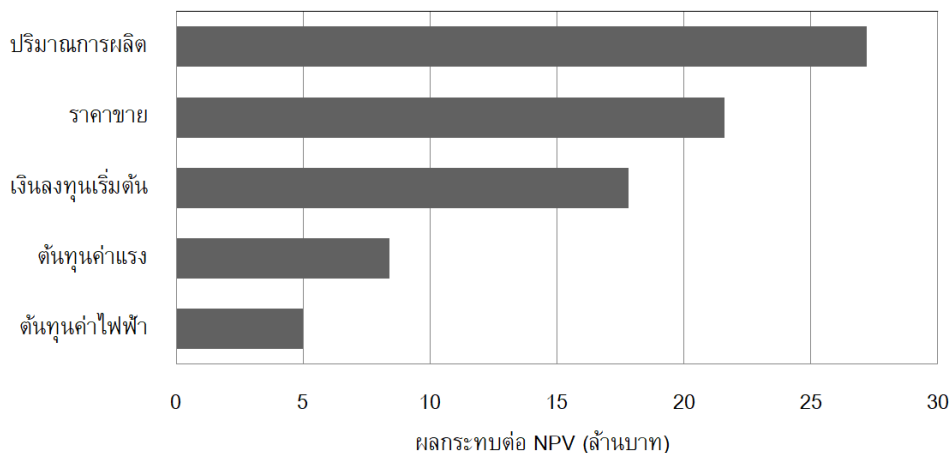
ตัวแปร	-20%	-10%	ค่าฐาน	+10%	+20%
ปริมาณการผลิต	8.60	15.40	22.20	29.00	35.80
ราคาขาย	11.40	16.80	22.20	27.60	33.00
ต้นทุนค่าแรง	26.40	24.30	22.20	20.10	18.00
ต้นทุนค่าไฟฟ้า	24.70	23.45	22.20	20.95	19.70
เงินลงทุนเริ่มต้น	31.10	26.65	22.20	17.75	13.30

หมายเหตุ: การปรับค่าตัวแปรดำเนินการแบบแยกอิสระ (one-at-a-time) โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นคงที่ ทั้งนี้ ตัวแปรด้านรายได้ ได้แก่ ปริมาณการผลิตและราคาขาย เมื่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า NPV เพิ่มขึ้น ขณะที่ตัวแปรด้านต้นทุน ได้แก่ ต้นทุนค่าแรง ต้นทุนค่าไฟฟ้า และเงินลงทุนเริ่มต้น เมื่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า NPV ลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการลงทุน

จากตารางที่ 7 และรูปที่ 5 พบว่าปริมาณการผลิตเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่า NPV มากที่สุด โดยค่า NPV เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 8.60 - 35.80 ล้านบาท รองลงมาคือราคาขาย ซึ่งมีค่า NPV อยู่ในช่วง 11.40 - 33.00 ล้านบาท ขณะที่เงินลงทุนเริ่มต้นส่งผลต่อค่า NPV ในช่วง 13.30 - 31.10 ล้านบาท ส่วนต้นทุนค่าแรงและต้นทุนค่าไฟฟ้ามีผลกระทบต่อค่า NPV ในระดับที่ต่ำกว่า โดยมีช่วงการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 18.00 - 26.40 ล้านบาท และ 19.70 - 24.70 ล้านบาท ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ลำดับผลกระทบของตัวแปรต่อค่า NPV

ตัวแปร	ช่วง NPV	ผลกระทบ
ปริมาณการผลิต	8.60 - 35.80	27.20
ราคาขาย	11.40 - 33.00	21.60
เงินลงทุนเริ่มต้น	13.30 - 31.10	17.80
ต้นทุนค่าแรง	18.00 - 26.40	8.40
ต้นทุนค่าไฟฟ้า	19.70 - 24.70	5.00



รูปที่ 5 แผนภูมิทอร์นาโดการวิเคราะห์ความไวของมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ปริมาณการผลิตเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่า NPV มากที่สุด รองลงมาคือราคาขายและเงินลงทุนเริ่มต้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าโครงการมีความไวต่อบัจจัยด้านรายได้ในระดับสูง โดยการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการผลิตและราคาขายส่งผลต่อความคุ้มค่าของโครงการอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม ต้นทุนค่าแรงและต้นทุนค่าไฟฟ้ามีผลกระทบต่อค่า NPV ในระดับที่ต่ำกว่า แม้ว่าการเพิ่มขึ้นของต้นทุนดังกล่าวจะส่งผลให้ค่า NPV ลดลง แต่ขนาดของผลกระทบยังอยู่ในระดับจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรด้านรายได้ ดังนั้นเพื่อรักษาความคุ้มค่าของโครงการ ผู้ประกอบการควรให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการด้านปริมาณการผลิตและราคาขายเป็นลำดับแรก ขณะที่ความผันผวนของต้นทุนการดำเนินงานมีผลต่อโครงการในระดับรองลงมา

5. การอภิปรายผล

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบูรณาการระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 และระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัล สามารถยกระดับสมรรถนะของกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารได้อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์ที่สำคัญของการปรับปรุงกระบวนการสามารถสรุปได้เป็นสามประเด็นหลัก ได้แก่ การเพิ่มผลิตภาพของกระบวนการ การเพิ่มเสถียรภาพของระบบการผลิต และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน

ประการแรก การปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการกำจัดคอขวดของสายการผลิตและการนำระบบอัตโนมัติมาใช้ ส่งผลให้ผลิตภาพของกระบวนการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยอัตราการผลิตเพิ่มขึ้น

จาก 6.22 กก./นาฬิกา เป็น 33.02 กก./นาฬิกา ขณะที่เวลาการผลิตต่อรอบลดลงจาก 39.50 วินาที เหลือ 10.80 วินาที และเวลานำการผลิตลดลงมากกว่า 50% การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการปรับสมดุลของสายการผลิต การลดงานระหว่างกระบวนการ และการสร้างการไหลของกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous Flow)

ประการที่สอง การนำระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมาช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิต และลดความแปรปรวนของระบบการผลิต โดยค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Cpk) เพิ่มขึ้นจาก 0.40 เป็น 1.55 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสากลที่ 1.33 ผลการวิเคราะห์การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติยังแสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตหลังการปรับปรุงอยู่ภายใต้สภาวะควบคุมเชิงสถิติ และสามารถรักษาระดับประสิทธิภาพของกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง

ประการที่สาม ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมแสดงให้เห็นว่าการลงทุนในระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วย และสร้างผลตอบแทนทางการเงินที่น่าพอใจเมื่อพิจารณาจากตัวชี้วัดทางการเงิน เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน

โดยภาพรวม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการผสมผสานแนวคิด Lean Six Sigma กับเทคโนโลยีดิจิทัลและระบบอัตโนมัติ สามารถเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับระบบการผลิตของอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงาน ความเสถียรของกระบวนการ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุน

5.2 ข้อเสนอแนะเชิงการจัดการ

ผลการวิจัยมีนัยสำคัญเชิงการจัดการสำหรับผู้บริหารในอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการยกระดับประสิทธิภาพของระบบการผลิตภายใต้ข้อจำกัดด้านแรงงานและต้นทุนการดำเนินงานที่เพิ่มสูงขึ้น ประการแรก งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับแผนที่สายธารคุณค่า 4.0 สามารถใช้เป็นเครื่องมือเชิงระบบในการระบุคอขวดของกระบวนการผลิตและกำหนดแนวทางการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพได้ ผู้บริหารสามารถใช้กรอบแนวคิดดังกล่าวในการวิเคราะห์กระบวนการผลิตอย่างเป็นขั้นตอน ตั้งแต่การกำหนดปัญหา การวิเคราะห์ข้อมูล ไปจนถึงการออกแบบแนวทางปรับปรุงและการควบคุมผลลัพธ์ของกระบวนการ

ประการที่สอง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการนำระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลมาใช้สามารถลดการพึ่งพาแรงงานในกระบวนการผลิตที่ใช้แรงงานเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการผลิตและลดความแปรปรวนของคุณภาพสินค้า ดังนั้นสำหรับองค์กรที่ประสบปัญหาการขาดแคลนแรงงานหรือมีต้นทุนแรงงานสูง การลงทุนในเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติควบคู่กับการปรับโครงสร้างกระบวนการผลิตอาจเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กร

ประการที่สาม การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมที่ดำเนินการในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการตัดสินใจลงทุนในระบบอัตโนมัติควรพิจารณาควบคู่กับการประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐกิจในระยะยาว โดยการใช้เครื่องมือทางการเงิน เช่น มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน สามารถช่วยสนับสนุนการตัดสินใจลงทุนของผู้บริหารได้อย่างเป็นระบบ

แนวทางการบูรณาการ Lean Six Sigma กับเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาโรงงานอัจฉริยะ (Smart Factory) ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่มีลักษณะเป็นสายการผลิตต่อเนื่องและต้องการการควบคุมคุณภาพที่มีความแม่นยำสูง

โดยสรุป ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาระบบการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารควรดำเนินการผ่านการผสมผสานระหว่างเครื่องมือการปรับปรุงกระบวนการเชิงระบบและเทคโนโลยีดิจิทัลสมัยใหม่ ซึ่งสามารถช่วยให้องค์กรเพิ่มผลิตภาพของระบบการผลิต ลดต้นทุนการดำเนินงาน และสร้างความยั่งยืนของผลลัพธ์ในระยะยาว

ผลลัพธ์ของการปรับปรุงกระบวนการผลิตยังสะท้อนถึงมิติของความยั่งยืนในระบบการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร การลดงานระหว่างกระบวนการ การลดเวลานำการผลิต และการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรแรงงาน ส่งผลให้เกิดการใช้ทรัพยากรการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ขณะเดียวกัน การนำระบบอัตโนมัติและการเชื่อมโยงข้อมูลแบบดิจิทัลมาช่วยยังช่วยลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตและเพิ่มความโปร่งใสในการติดตามข้อมูลการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการผลิตอย่างยั่งยืน (Sustainable Manufacturing) ที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตควบคู่กับการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

5.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย

ถึงว่างานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการบูรณาการระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณาในการตีความผลการวิจัยและการนำผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้ในบริบทอื่น

ประการแรก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงกรณีศึกษาในโรงงานผลิตเพียงแห่งเดียว ซึ่งมีลักษณะเฉพาะของกระบวนการผลิต เทคโนโลยีที่ใช้ และโครงสร้างองค์กร ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้อาจไม่สามารถนำไปอ้างอิงทั่วไปกับอุตสาหกรรมอาหารทุกประเภทได้โดยตรง โดยเฉพาะโรงงานที่มีขนาดการผลิต โครงสร้างผลิตภัณฑ์หรือระดับการลงทุนด้านเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน

ประการที่สอง การประเมินผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุงภายในช่วงเวลาที่ยกมา แม้ว่าจะมีการใช้เครื่องมือทางสถิติ เช่น การทดสอบ

สมมติฐานและการวิเคราะห์การควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ (SPC) เพื่อยืนยันผลลัพธ์ของการปรับปรุง แต่การติดตามผลในระยะยาวยังมีความจำเป็นเพื่อประเมินความยั่งยืนของประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตและความเสถียรของระบบอัตโนมัติในสภาวะการผลิตที่หลากหลาย

ประการสุดท้าย การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในงานวิจัยนี้อาศัยสมมติฐานบางประการ เช่น อัตราคิดลด ต้นทุนพลังงาน และปริมาณการผลิตที่คงที่ ในสภาพแวดล้อมการดำเนินธุรกิจจริง ปัจจัยเหล่านี้อาจมีความผันผวนตามสภาวะเศรษฐกิจและตลาด ดังนั้นการวิเคราะห์เพิ่มเติมภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันอาจช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบอัตโนมัติ

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

แม้ว่างานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการบูรณาการระเบียบวิธี DMAIC ร่วมกับระบบอัตโนมัติแบบดิจิทัลในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ยังมีประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต เพื่อขยายขอบเขตขององค์ความรู้และเพิ่มความสามารถในการประยุกต์ใช้ผลการวิจัยในระดับอุตสาหกรรม

ประการแรก งานวิจัยในอนาคตควรขยายการศึกษาไปยังโรงงานอาหารหลายแห่งหรือหลายประเภทผลิตภัณฑ์ เพื่อประเมินความสามารถในการประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าวในบริบทการผลิตที่แตกต่างกัน เช่น โรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก หรือกระบวนการผลิตที่มีความซับซ้อนสูง

ประการที่สอง การศึกษาต่อไปอาจพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ที่ครอบคลุมการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรสำคัญ (Sensitivity Analysis) เช่น ต้นทุนแรงงาน ราคาพลังงาน และปริมาณการผลิต เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนในระบบอัตโนมัติ

ประการสุดท้าย งานวิจัยในอนาคตอาจศึกษาการบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลขั้นสูง เช่น Internet of Things: IoT ระบบวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ หรือปัญญาประดิษฐ์ เพื่อสนับสนุนการควบคุมกระบวนการผลิตแบบอัจฉริยะ และพัฒนาระบบการผลิตให้สอดคล้องกับแนวคิดอุตสาหกรรม 4.0 อย่างยั่งยืน

References

- [1] Frank AG, Dalenogare LS, Ayala NF. Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics* 2019;210:15–26. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004.

- [2] Nunez-Merino M, Maqueira-Marin JM, Moyano-Fuentes J, Castano-Moraga CA. Industry 4.0 and Supply Chain: A Systematic Science Mapping Analysis. *Technological Forecasting and Social Change* 2022;181:121788. doi: 10.1016/j.techfore.2022.121788.
- [3] Kamble SS, Gunasekaran A, Gawankar SA. Sustainable Industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection* 2018;117:408-25. doi: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
- [4] Monostori L, Kadar B, Bauernhansl T, Kondoh S, Kumara S, Reinhart G, et al. Cyber-Physical Systems in Manufacturing. *CIRP Annals* 2016;65(2): 621–641. doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005.
- [5] Alexander P, Antony J, Rodgers B. Lean Six Sigma for Small and Medium Sized Manufacturing Enterprises: A Systematic Review. *International Journal of Quality & Reliability Management* 2019;36(3):378–397. doi: 10.1108/IJQRM-03-2018-0074.
- [6] Arey D, Le C, Gao J. Lean Industry 4.0: A Digital Value Stream Approach to Process Improvement. *Procedia Manufacturing* 2021;54:19–24. doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.004.
- [7] Sony M, Naik S. Key Ingredients for Evaluating Industry 4.0 Readiness for Organizations: a Literature Review. *Benchmarking: An International Journal* 2020;27(7):2213–2232. doi: 10.1108/BIJ-09-2018-0284.
- [8] Maheshwari P, Kamble S, Belhadi A, Venkatesh M, Abedin MZ. Digital Twin-Driven Real-Time Planning, Monitoring, and Controlling in Food Supply Chains. *Technological Forecasting and Social Change* 2023;195:122799. doi: 10.1016/j.techfore.2023.122799.
- [9] Wang FK, Rahardjo B, Rovira PR. Lean Six Sigma with Value Stream Mapping in Industry 4.0 for Human-Centered Workstation Design. *Sustainability* 2022;14(17): 11020. doi: 10.3390/su141711020.
- [10] Skalli D, Charkaoui A, Cherrafi A, Garza-Reyes JA, Antony J, Shokri A. Industry 4.0 and Lean Six Sigma integration in manufacturing: a literature review, an integrated framework and proposed research perspectives. *Quality Management Journal* 2023;30(1):16–40. doi: 10.1080/10686967.2022.2144784.
- [11] Ivanov D, Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of industry 4.0. *Production Planning & Control* 2021;32(9):775-88. doi: 10.1080/09537287.2020.1768450.
- [12] Wang W, Yang H, Zhang Y, Xu J. IoT-Enabled Real-Time Energy Efficiency Optimisation Method for Energy-Intensive Manufacturing Enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 2018;31(4–5):362–379. doi: 10.1080/0951192X.2017.1337929.

- [13] Utama DM, Abirfatin M. Sustainable Lean Six-Sigma: A New Framework for Improve Sustainable Manufacturing Performance. *Cleaner Engineering and Technology* 2023;17:100700. doi:10.1016/j.clet.2023.100700.
- [14] Meudt T, Metternich J, Abele E. Value Stream Mapping 4.0: Holistic Examination of Value Stream and Information Logistics in Production. *CIRP Annals* 2017;66(1):413–416. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.005.
- [15] Sanders A, Elangeswaran C, Wulfsberg J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management* 2016;9(3):811-33. doi: 10.3926/jiem.1940.
- [16] McDonald T, Van Aken EM, Rentes AF. Utilising simulation to enhance value stream mapping: a manufacturing case application. *International Journal of Logistics Research and Applications* 2002;5(2):213-32. doi: 10.1080/13675560210148696.
- [17] Kolberg D, Zuhlke D. Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-PapersOnLine* 2015;48(3):1870–1875. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359.
- [18] Antony J, Snee R, Hoerl RW. Lean Six Sigma: Yesterday, Today and Tomorrow. *International Journal of Quality & Reliability Management* 2017;34(7):1073–1093. doi: 10.1108/IJQRM-03-2016-0035.
- [19] Yu CM, Huang TH, Chen KS, Huang TY. Construct Six Sigma DMAIC Improvement Model for Manufacturing Process Quality of Multi-Characteristic Products. *Mathematics* 2022;10(5):814. doi:10.3390/math10050814.
- [20] Chiarini A, Kumar M. Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for operational excellence: evidence from Italian manufacturing companies. *Production Planning & Control* 2021;32(13):1084-101. doi: 10.1080/09537287.2020.1784485.
- [21] Sahoo S, Yadav S. Lean production practices and bundles: a comparative analysis. *International Journal of Lean Six Sigma* 2018;9(3):374-98. doi: 10.1108/IJLSS-01-2017-0002.
- [22] Sreedharan VR, Raju R, Sunder MV, Antony J. Assessment of Lean Six Sigma Readiness (LESIRE) for Manufacturing Industries Using Fuzzy Logic. *International Journal of Quality & Reliability Management* 2019;36(2):137–161. doi: 10.1108/IJQRM-09-2017-0181.
- [23] Jones D, Snider C, Nassehi A, Yon J, Hicks B. Characterising the Digital Twin: A Systematic Literature Review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2020;29(Pt A):36–52. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.

- [24] Bevilacqua A, Speranza B, Campaniello D, Sinigaglia M, Corbo MR, Lamacchia C. A Preliminary Report on the Use of the Design of Experiments for the Production of a Synbiotic Yogurt Supplemented with Gluten Friendly™ Flour and Bifidobacterium infantis. *Frontiers in Microbiology* 2019;10:226. doi: 10.3389/fmicb.2019.00226.
- [25] Wuest T, Weimer D, Irgens C, Thoben KD. Machine Learning in Manufacturing: Advantages, Challenges and Applications. *Production & Manufacturing Research* 2016;4(1):23–45. doi: 10.1080/21693277.2016.1192517.

ประวัติผู้เขียนบทความ



คมกริช วีรวัฒนา บัณฑิตศึกษา สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต โทรศัพท์ (02)-954-7300 Email: khomgrich.w@gmail.com



ดร. ประยุทธ์ ฤทธิเดช อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต โทรศัพท์ (02)-954-7300 Email: prayuth.rit@dpu.ac.th



ผศ.ดร. สุภรัชชัย วรรัตน์ อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต โทรศัพท์ (02)-954-7300 Email: vorarat@dpu.ac.th

Article History:

Received: December 24, 2025

Revised: July 15, 2026

Accepted: July 16, 2026

การคำนวณแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่วและโค้ง
โดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

WIND LOAD CALCULATION OF LOW-RISE BUILDINGS WITH GABLE
AND ARCHED ROOFS BY WIND TUNNEL TEST

นรวิชัย มั่นศิลป์¹ จิรวัดน์ จันทร์เรือง² และ วิโรจน์ บุญญภิญโญ^{3*}

¹นักศึกษา, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, norawish.mans@dome.tu.ac.th

²อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย, 225 ถ.พญาไท แขวงปทุมวัน เขตปทุมวัน กทม. 10330,
jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{3*}อาจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน
ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120, bvrote@engr.tu.ac.th

Norawish Mansin¹, Jirawat Junruang² and Virote Boonyapinyo^{3*}

¹Graduate Student, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, 99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District,
PathumThani 12120, Thailand' norawish.mans@dome.tu.ac.th

²Lecturer, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Uthenthawai Campus, 225 Phayathai Rd., Pathumwan, Bangkok, 10330,
Thailand, jirawat_ju@rmutto.ac.th

^{3*}Lecturer, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, 99 Phahonyothin Rd, Khlong Nueng, Khlong Luang District,
PathumThani 12120, Thailand, bvrote@engr.tu.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของแรงลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยหลังคาจั่วความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° โดยทดสอบแบบจำลองสัดส่วน 1:80 ในอุโมงค์ลม เพื่อประเมินพฤติกรรมทางอากาศพลศาสตร์ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉพาะที่

2) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดแต่ละด้าน และ 3) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยตามพื้นที่รับลมของโซนต่าง ๆ ในแต่ละด้านของแบบจำลอง ซึ่งประยุกต์ใช้แผนภูมิไวโรนอยในการคำนวณพื้นที่รับลมอย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาพบพฤติกรรมแรงลมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างหลังคาจั่วและหลังคาโค้ง สำหรับหลังคาจั่ว ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวมีแนวโน้มสอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 และ ASCE 7-22 อย่างไรก็ตาม ในบริเวณวิกฤตของหลังคาจั่ว 18.4° พบว่ามาตรฐาน มยผ.1311-50 ให้ค่าหน่วยแรงลมออกแบบโครงสร้างรองต่ำกว่าผลการทดสอบ ขณะที่มาตรฐาน ASCE 7-22 ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลทดลองได้ดีกว่า นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังช่วยเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมแรงลมบนหลังคาโค้ง ซึ่งยังไม่มีระบุในมาตรฐาน มยผ.1311-50

คำสำคัญ: แรงลม, อาคารเตี้ย, การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม, มาตรฐานการคำนวณแรงลม

ABSTRACT

This study investigates the wind pressure distribution on low-rise buildings with gable roofs at 18.4° and 26.7° pitches, and a curved roof with an equivalent pitch of 18° . Experimental tests were conducted using 1:80 scale models in a boundary layer wind tunnel to evaluate three aerodynamic characteristics: (1) local wind pressure coefficients, (2) surface-averaged wind pressure coefficients over each entire building face, and (3) area-averaged wind pressure coefficients corresponding to specific tributary zones on each face. A Voronoi approach was systematically employed to calculate the tributary areas. The findings reveal distinct differences in aerodynamic behavior between the gable and curved roof configurations. For gable roofs, the surface-averaged wind pressure coefficients generally align with the provisions of DPT 1311-50 and ASCE 7-22. However, within the critical zones of the 18.4° gable roof, the DPT 1311-50 standard underestimates the design wind pressures for components and cladding (C&C) compared to the experimental results, whereas the ASCE 7-22 standard yields better agreement with the empirical data. Furthermore, this study contributes to the fundamental understanding of wind-induced pressures on curved roofs, addressing a significant gap in the DPT 1311-50 standard where provisions for such geometries are currently lacking.

KEYWORDS: wind load, low-rise buildings, wind tunnel test, wind load standards

1. คำนำ

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารเตี้ย เช่น อาคารหลังคาช่วงยาวและอาคารพักอาศัยทั่วไป มีรูปแบบทางสถาปัตยกรรมที่หลากหลายและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ระบบโครงสร้างได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ขณะเดียวกันเทคโนโลยีวัสดุสมัยใหม่ทำให้สามารถผลิตวัสดุที่มีกำลังสูงแต่น้ำหนักเบา ส่งผลให้อาคารมีความอ่อนตัว (flexibility) มากขึ้นเมื่อเทียบกับในอดีต ลักษณะดังกล่าวทำให้อาคารมีความไวต่อแรงกระทำจากลมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โครงสร้างหลังคาและวัสดุผนังมักเป็นส่วนแรกที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงเมื่อเผชิญกับพายุลมแรง Al-Chalabi และ Elshaer [1] พบว่าความเสียหายนี้มักเริ่มต้นจากการเกิดความดันลบ (Suction) เฉพาะจุดที่มีค่าสูงมากบริเวณขอบและมุมของหลังคา อันเป็นผลมาจากการแยกตัวของกระแสลม (Flow separation) และการก่อตัวของกระแสวน (Vortices) การทำความเข้าใจและประเมินแรงลมเหล่านี้อย่างแม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง

การป้องกันความเสียหายดังกล่าววิศวกรโครงสร้างจึงพึ่งพามาตรฐานการออกแบบแรงลมเป็นหลัก เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของมาตรฐานนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาแบบจำลองในอุโมงค์ลมเปรียบเทียบกับมาตรฐาน Ho et al [2] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของหลังคาทรงจั่วที่ความชัน 1.19° , 14° และ 26.6° ภายใต้สภาพภูมิประเทศแบบเปิดโล่งและขานเมือง โดยพบว่ามาตรฐาน ASCE 7-02 [3] ให้ค่าต่ำกว่าผลการทดสอบในระดับจุดวัดแรงดัน (local point load) ขณะที่ค่าแรงลมเฉลี่ยบนพื้นที่มีความสอดคล้องกันในภาพรวม เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tamura [4] ที่ทำการทดสอบหลังคาแบน หลังคาจั่ว และหลังคาปั้นหยา โดยวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยแรงลมในแต่ละพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นแนวทางพื้นฐานของการศึกษารังนี้ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบพบว่าทิศทางลมที่ตั้งฉากกับสันหลังคาให้ค่าต่ำกว่างานวิจัยของ Tamura [4] เนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนความกว้างต่อความลึกของอาคาร โดยงานวิจัยนี้มีอัตราส่วน 5:8 (W:L) ขณะที่งานวิจัยของ Tamura [4] มีค่า 2:5 (W:L) ส่งผลให้พื้นที่รับลมและพฤติกรรมการไหลของลมแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตาม มาตรฐานส่วนใหญ่มักทำการลดทอนความซับซ้อนของพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ให้อยู่ในรูปของช่วงความชันหลังคาแบบไม่ต่อเนื่อง ในด้านมาตรฐานการออกแบบมาตรฐาน ASCE 7-22 [5] และ ASCE 7-16 [6] มีการแบ่งพื้นที่รับลมเฉพาะที่สำหรับการออกแบบโครงสร้างรองรับบริเวณมุมและขอบอย่างละเอียด รวมถึงการแบ่งช่วงความชันของหลังคาเป็นสี่ช่วง ได้แก่ $\theta < 7^\circ$, $7^\circ < \theta \leq 20^\circ$, $20^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ขณะที่มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แบ่งช่วงความชันหลักเพียงสองช่วง คือ $7^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ความแตกต่างดังกล่าวอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม โดยเฉพาะในช่วงความชันใกล้เคียงของแต่ละช่วง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาหลังคาทรงจั่วที่ความชัน 18.4° และ 26.7° ซึ่งอยู่ในช่วงรอยต่อของการแบ่งช่วงตามมาตรฐาน

นอกจากนี้ ปัจจุบันมีการใช้งานอาคารเตี้ยที่มีรูปทรงหลังคาหลากหลายมากขึ้น เช่น หลังคาโค้ง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 1 งานวิจัยของ Zhang et al [8] และ Wood and Lynar [9] ต่างระบุตรงกันว่า หลังคาโค้งมีพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ที่ซับซ้อนและได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการกระจายตัวของความดันลมเชิงสามมิติ อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมดังกล่าวยังไม่ได้ถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจนในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แม้ว่ากฎกระทรวง พ.ศ. 2566 และประกาศกระทรวงมหาดไทยฉบับล่าสุดจะอ้างอิงมาตรฐานดังกล่าวในการคำนวณแรงลมก็ตาม ขณะที่มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] ได้กำหนดแนวทางการออกแบบสำหรับหลังคารูปทรงโค้งไว้อย่างชัดเจน ช่องว่างดังกล่าวจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม ยิ่งไปกว่านั้น การประเมินแรงลมสำหรับโครงสร้างรองจากการทดสอบในอุโมงค์ลม คือความแม่นยำในการแปลงค่าความดันลมจากจุดวัด (Pressure taps) ที่มีการจัดเรียงแบบไม่สม่ำเสมอไปสู่พื้นที่รับลมย่อย งานวิจัยล่าสุด Gierson et al [10] ได้พิสูจน์แล้วว่า แผนภาพโวโรนอย (Voronoi diagram) เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมที่สุดในการกำหนดพื้นที่รับผิวด้านของจุดวัดแรงดันแต่ละจุดอย่างเป็นระบบ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมแรงลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยที่มีหลังคาทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งที่มีความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18° โดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม โดยการประยุกต์ใช้แผนภาพโวโรนอยในการรวมพื้นที่รับแรงย่อยเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมอย่างละเอียดใน 3 ระดับ ได้แก่ (1) ระดับจุดวัดแรงดัน (Local point load) (2) ระดับเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้าน (Panel load) และ (3) ระดับเฉลี่ยตามพื้นที่รับลม (Tributary area) ผลลัพธ์จากการศึกษาได้ถูกนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5] เพื่อประเมินความปลอดภัย ข้อจำกัด และสร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับพฤติกรรมอากาศพลศาสตร์ของหลังคาโค้ง อันจะเป็นรากฐานสำคัญในการปรับปรุงข้อกำหนดการออกแบบแรงลมสำหรับประเทศไทยต่อไป



รูปที่ 1 ตัวอย่างอาคารชาเลนเจอร์ฮอลล์ เมืองทองธานี เป็นอาคารเตี้ยขนาดใหญ่ หลังคาโค้ง ซึ่งยังไม่มีระบุในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7]

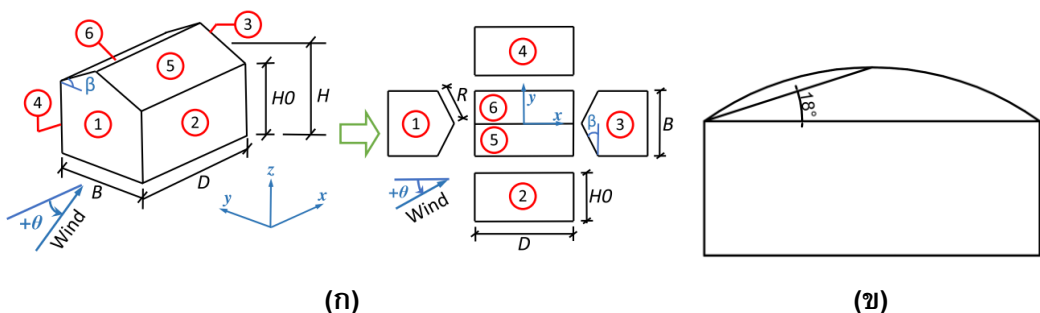
2. วิธีวิจัยและการทดสอบแบบจำลอง

2.1 การจำลองลักษณะลมในอุโมงค์ลม

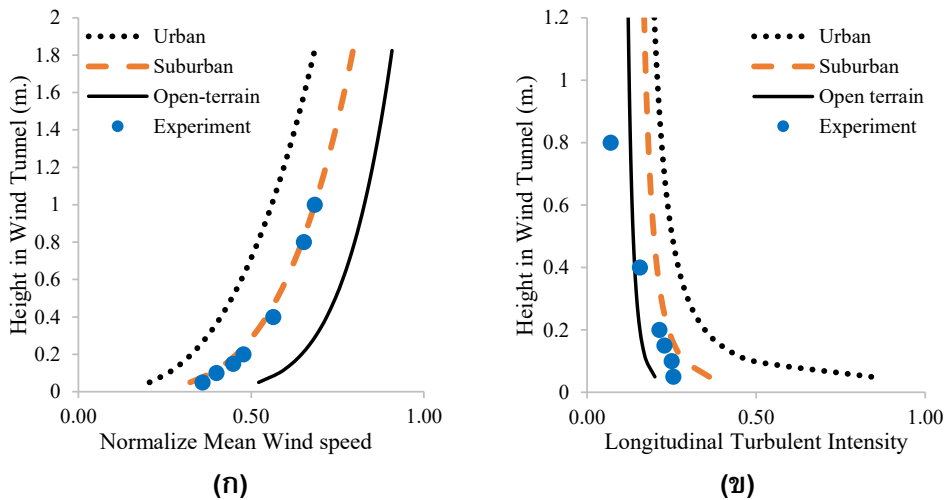
การทดสอบแบบจำลองดำเนินการในอุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit wind tunnel) ณ ห้องปฏิบัติการอุโมงค์ลมธรรมชาติ-เอไอที (TU-AIT Wind Tunnel Laboratory) ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของช่วงทดสอบ (Test section) กว้าง 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร และมีความยาว 25.5 เมตร สภาพการไหลของลมถูกจำลองให้สอดคล้องกับสภาพภูมิประเทศแบบชานเมือง (Suburban terrain exposure) ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ASCE7-22 [5] โดยการจัดเรียงบล็อกสร้างความขรุขระ (Roughness elements) บนพื้นอุโมงค์ลม เพื่อสร้างชั้นขอบเขตบรรยากาศ (Atmospheric Boundary Layer: ABL) ที่มีค่าเลขชี้กำลังของความเร็วลม (Power-law exponent, α) เท่ากับ 0.25 โปรไฟล์ความเร็วลมเฉลี่ยและระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ได้รับการสอบเทียบให้สอดคล้องกับเป้าหมายทางทฤษฎี เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองได้รับอิทธิพลของความผันผวนของกระแสลมที่เสมือนจริงตามธรรมชาติ



รูปที่ 2 อุโมงค์ลม ธรรมชาติ-เอไอที และแบบจำลองอาคารเดี่ยว



รูปที่ 3 (ก) รายละเอียดขนาดอาคาร พื้นผิวแต่ละด้าน และทิศทางลม (ข) นิยามความชันหลังคาเทียบเท่า



รูปที่ 4 การจำลองลักษณะลมตามความสูงและสภาพภูมิประเทศในอุโมงค์ลม
(ก) ค่าความเร็วลมเฉลี่ย (ข) ค่าอัตราส่วนความปั่นป่วน

2.2 รายละเอียดแบบจำลองอาคาร

แบบจำลองอาคารเตี้ยทำจากอะคริลิกใสด้วยมาตราส่วน 1:80 โดยอ้างอิงขนาดอาคารจริงที่ความกว้าง 25 เมตร ความลึก 40 เมตร และความสูงถึงระดับชายคา 10 เมตร การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยแบบจำลอง 3 รูปแบบ ได้แก่ หลังคาทรงจั่วที่มีความชัน 18.4° และ 26.7° และหลังคาโค้งที่มีความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18° เพื่อศึกษาพฤติกรรมดังตารางที่ 1 และรูปที่ 5 แบบจำลองทั้งหมดถูกติดตั้งด้วยจุดวัดแรงดัน (pressure taps) ทั้งหมด 362 จุด โดยแบ่งจุดตามด้านต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง	ลักษณะหลังคา	B(m)	D(m)	H0(m)	ความชัน
GBC1	หลังคาจั่ว	25	40	10	18.4°
GBC2	หลังคาจั่ว	25	40	10	26.7°
ARC1	หลังคาโค้ง	25	40	10	เทียบเท่า 18°



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5 แบบจำลองที่ติดตั้งในอุโมงค์ลม (ก) หลังคาจั่วความชัน 18.4° (ข) หลังคาจั่วความชัน 26.7° (ค) หลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18°

ตารางที่ 2 จุดวัดแรงดัน

ด้าน	S1	S2	S3	S4	S5	S6
จำนวนจุด	37	51	37	42	125	70

ในการตั้งค่าการทดสอบ อัตราส่วนการขวางกั้นกระแสน้ำ (Blockage ratio) ของแบบจำลองต่อพื้นที่หน้าตัดอุโมงค์ลมมีค่าน้อยกว่า 1% ซึ่งน้อยกว่าเกณฑ์ 8% ตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] จึงพิจารณาว่าอิทธิพลจากการขวางกั้น (Blockage effects) มีนัยสำคัญน้อยมากและไม่จำเป็นต้องทำการปรับแก้ (Blockage correction) ประเด็นสำคัญในการทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อศึกษาผลของแรงลมบนหลังคารูปทรงโค้ง คืออิทธิพลของค่า Re ที่มีต่อการไหลรอบโครงสร้างและแรงดันลมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิว Uematsu and Yamamura [11] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของค่า Re ต่อการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมบนหลังคาโค้งอิสระในชั้นขอบเขตแบบปั่นป่วน (Turbulent boundary layer) โดยค่า Re ถูกนิยามโดยอาศัยความเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูงเฉลี่ยของแบบจำลอง U_h และสองเท่าของรัศมีความโค้งหลังคา ($2R$) ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับที่ใช้ในการศึกษาของ Natalini et al [12] เหตุผลที่เลือกใช้ $2R$ แทนการใช้ H เป็นความยาวอ้างอิง (Characteristic length) ในการกำหนดค่า Re นั้น เพื่อเชื่อมโยงพฤติกรรมการไหลรอบหลังคาโค้งอิสระกับการไหลรอบทรงกระบอก โดยทั่วไปมักใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง (เท่ากับสองเท่าของรัศมี) ในการคำนวณค่า Re งานวิจัยดังกล่าวพบว่า การกระจายตัวของสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมบนพื้นผิวหลังคาไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re เมื่อ $Re > 1.0 \times 10^5$ สอดคล้องกับ Macdonald et al [13] ที่ได้เปรียบเทียบผลลัพธ์จากอุโมงค์ลมกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริง (Full-scale measurement) จากไซโลภายใต้สภาพลมธรรมชาติ พบว่า $Re > 1.0 \times 10^5$ สามารถจำลองสภาวะของอาคารจริงได้อย่างสมเหตุสมผล

การทดสอบในงานวิจัยนี้ค่า Re นิยามจาก $U_H(6.81\text{m/s})$ และ $2R(0.43\text{m})$ มีค่าเท่ากับ 1.64×10^5 ดังนั้นผลการทดสอบที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้จำลองพฤติกรรมแรงลมในสภาวะการใช้งานจริงได้อย่างสมเหตุสมผล

2.3 ระบบการรับข้อมูลความดันลม

แบบจำลองถูกทดสอบภายใต้ความเร็วลมอ้างอิงที่ความสูงเฉลี่ยของแบบจำลอง โดยมีค่าเท่ากับ 6.81 เมตร/วินาที การทดสอบครอบคลุมทิศทางลมตั้งแต่มุม -90° ถึง 90° โดยเพิ่มทีละ 10° รวมทั้งทิศทางลมเฉียงที่มุม $\pm 45^\circ$ สัญญาณความดันลมถูกบันทึกด้วยความถี่ 100 เฮิรตซ์ (Hz) เป็นระยะเวลา 5 นาทีต่อหนึ่งทิศทางลม ทั้งนี้ สัญญาณความดันลมที่บันทึกได้ผ่านการปรับแก้ฟังก์ชันการถ่ายโอนของท่อลม (Tubing transfer function correction) เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนจากการสั่นพ้อง (Acoustic resonance) ภายในสายท่อวัดความดัน ทำให้ได้ค่าความดันลมพลวัตที่ถูกต้อง

3. การวิเคราะห์แรงลมโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม

3.1 การแบ่งพื้นที่ที่รับผิวด้านของแต่ละจุดวัด

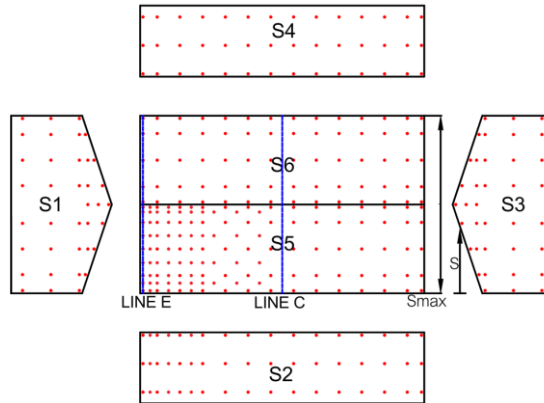
ในปี ค.ศ. 2017 Gierson et al [10] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่ว โดยใช้แนวทางการกำหนดพื้นที่รับลมของแต่ละจุดวัดแรงดันด้วยแผนภาพไวโรนอยวิธีการดังกล่าวอาศัยหลักการแบ่งสามเหลี่ยมเดลอนเน (Delaunay triangulation) ซึ่งเสนอโดย Delaunay [14] เป็นพื้นฐานในการสร้างโครงข่ายของจุดวัดแรงดัน

การแบ่งสามเหลี่ยมเดลอนเนเป็นกระบวนการเชื่อมต่อจุดวัดแรงดันเพื่อสร้างชุดของสามเหลี่ยมที่มีคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ (1) สามเหลี่ยมไม่ทับซ้อนกัน (2) ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่กำหนดโดยกลุ่มจุดวัดแรงดัน และ (3) ไม่มีจุดวัดแรงดันใดอยู่ภายในวงกลมล้อมรอบ (Circumcircle) ของสามเหลี่ยมแต่ละรูป

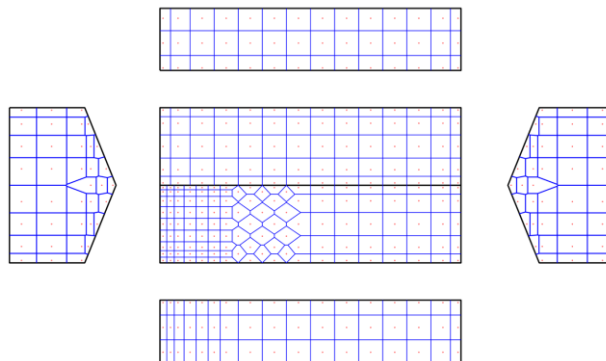
จากโครงข่ายสามเหลี่ยมดังกล่าว สามารถสร้างแผนภาพไวโรนอยได้โดยการลากเส้นแบ่งครึ่งตั้งฉาก (Perpendicular bisector) ของด้านสามเหลี่ยมแต่ละด้าน พื้นที่ที่เกิดขึ้นจะกำหนดขอบเขตอิทธิพลของจุดวัดแรงดันแต่ละจุด โดยพื้นที่นั้นประกอบด้วยตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับจุดวัดแรงดันดังกล่าวมากกว่าจุดอื่น

แผนภาพไวโรนอยจึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดพื้นที่รับผิวด้าน (Tributary area) ของแต่ละจุดวัดแรงดันอย่างเป็นระบบและเป็นกลาง เนื่องจากผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงเรขาคณิตของจุดวัดเท่านั้น และไม่ขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ใช้ สามารถใช้เครื่องมือคำสั่ง Voronoi

ในโปรแกรม MATLAB โดยแสดงตัวอย่างตำแหน่งจุดวัดแรงดันแสดงดังรูปที่ 6 และตัวอย่างผลการสร้างแผนภาพไวโรนอยแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 รายละเอียดจุดวัดของแบบจำลองหลังคาจั่วที่ความชัน 18.4°



รูปที่ 7 การแบ่งพื้นที่รับลมของจุดวัดความดันหลังคาจั่วที่ความชัน 18.4° ด้วยแผนภาพไวโรนอย

3.2 การคำนวณแรงลมเฉพาะที่โดยการทดสอบรวบรวมผลของแรงดัน

ค่าความดันที่ได้จากการทดสอบจะต้องเป็นค่าความดันที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั่วทั้งแบบจำลองของโครงสร้าง โดยค่าความดันที่อ่านได้จากการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมจะถูกเก็บข้อมูลไว้และนำมาปรับแก้ให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมตามสมการ

$$C_p = \frac{(P_x - P_0)}{q} \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho U_r^2 \quad (2)$$

โดยที่ C_p คือค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม (Pressure coefficient) P_x คือ ความดันลมที่วัดได้ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนแบบจำลอง P_0 คือ ค่าความดันลมสถิต (Static pressure or barometric pressure) ณ ตำแหน่งอ้างอิงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่เรียกว่า หลอดพิโทต์ความดันสถิต (Pitot static tube) q คือ ค่าความดันลมพลวัต (Dynamic pressure) ณ ตำแหน่งอ้างอิง ที่วัดได้จากหลอดพิโทต์ความดันสถิต U_r คือ ค่าความเร็วลมเฉลี่ย ณ ตำแหน่งอ้างอิงเฉลี่ย ρ คือ ค่าความหนาแน่นของมวลอากาศ

ค่าหน่วยแรงดันและหน่วยแรงดูดอาจมีค่าแตกต่างกันได้จากการวัดแต่ละครั้ง เนื่องจากเป็นหน่วยแรงลมพลศาสตร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น จึงนำค่าไปทำการวิเคราะห์หาค่าปลายสุด (Extreme value analysis) ด้วยวิธีการกระจายตัวแบบกัมเบล (Gumbel distribution) เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงลมปลายสุดที่มีความน่าเชื่อถือทางสถิติและเหมาะสมสำหรับการนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบ

3.3 การคำนวณแรงลมค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่โดยการทดสอบรวบรวมผลของแรงดัน

ในปี ค.ศ. 2015 Duthinh et al [15] ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมอาคารเดี่ยวหลังคารูปทรงจั่วสำหรับโครงสร้างรองรับ โดยการรวมพื้นที่รับแรงย่อย (Tributary area) แสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความดันใช้วิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average) สำหรับข้อมูลซีรีส์เวลาแรงดันสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$C_p(i, t) = \text{avg} [C_{p_{ori}}(i, t - \Delta t), C_{p_{ori}}(i, t), C_{p_{ori}}(i, t + \Delta t)] \quad (3)$$

$$p_{ori}(i, t) = p_i(t) - p_0 \quad (4)$$

$$C_{p_{ori}}(i, t) = \frac{p_{ori}(i, t)}{(0.5 \rho V_{3600}^2)} \quad (5)$$

โดยที่กำหนดให้ช่วงเวลากการเก็บข้อมูลเป็น t และค่าความดันสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการวัดที่จุดวัดแรงดัน i ณ เวลา t โดยที่ p_{ori} คือค่าความดันสุทธิที่จุดวัดแรงดันเหนือความดันบรรยากาศ ซึ่งได้จากการลบค่าความดันบรรยากาศคงที่ p_0 ที่ระดับความสูงเฉลี่ยของหลังคา H ออกจากค่าความดันลมที่วัดได้ $p_i(t)$ และ $C_{p_{ori}}$ คือ ค่าความดันสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้โดยการหารค่า

ความดันสุทธิของจุดวัดแรงดันด้วยค่าความดันไดนามิกอ้างอิง ซึ่งอ้างอิงจากความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมง V_{3600} ที่ระดับความสูง H และค่าความหนาแน่นของอากาศ ρ

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม $C_p C_g(j, t)$ สำหรับแต่ละพื้นที่ที่ถูกสร้างขึ้นจากแผนภาพไวโรนอย ดังหัวข้อที่ 3.1 ในทิศทางลม θ สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมตามพื้นที่ $C_p(i, t)$ ตามช่วงเวลาได้ โดยพิจารณาพื้นที่ที่รับผิดชอบของจุดวัดความดัน (Tributary areas) ที่ทับซ้อนกันแต่ละพื้นที่ ดังแสดงในสมการดังต่อไปนี้

$$C_p C_g(j, t) = \frac{\left[\sum a_i C_p(i, t) \right]}{A_j} \quad (6)$$

$$A_j = \sum a_i \quad (7)$$

โดยที่ $C_p C_g$ คือค่าสัมประสิทธิ์ความดันลมตามพื้นที่ที่ถูกคำนวณโดยใช้พื้นที่อิทธิพล a_i ของจุดวัดทั้งหมด i ที่ทับซ้อนกับพื้นที่ทั้งหมด A_j พื้นที่ทั้งหมดใด ๆ ที่ทับซ้อนกันกับพื้นที่ที่รับผิดชอบของจุดวัดบางส่วนจะใช้เพียงส่วนที่ทับซ้อนกันเท่านั้น พื้นที่ที่รับผิดชอบเหล่านี้จะถูกคูณกับค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม $C_p(i, t)$ ของแต่ละจุดวัด และผลรวมจะถูกหารด้วยพื้นที่ตารางที่กำลังพิจารณา A_j

4. ผลการทดสอบแบบจำลองหลังคาทรงจั่วและโค้งในอุโมงค์ลม

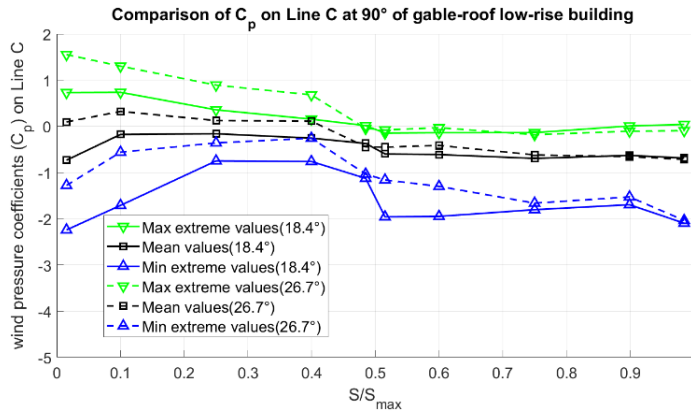
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของแต่ละจุดวัด (Local point load)

เพื่ออธิบายพฤติกรรมของลมที่กระทำต่อหลังคา ในรูปที่ 6 ระบุแนวจุดวัดที่กึ่งกลาง และขอบของหลังคา แสดงออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางหลังคาที่ทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา (90°) ดังรูปที่ 8 และ 9 และที่ตำแหน่งขอบของหลังคาที่ทิศทางลม 45° หรือที่มุมเฉียงกับสันหลังคาดังรูปที่ 10 และ 11 ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบดังต่อไปนี้

4.1.1 กรณีทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคา (90°)

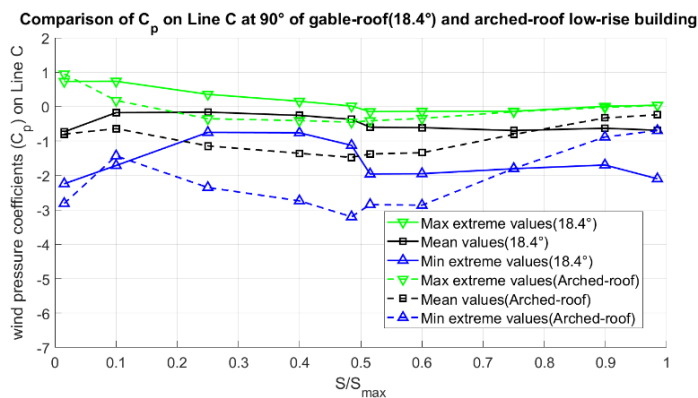
ผลการทดสอบในทิศทางด้านต้นลม ($S/S_{\max} < 0.5$) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยของหลังคาจั่วที่ความชัน 26.7° เป็นแรงดันซึ่งแตกต่างกันกับความชัน 18.4° ที่เป็นแรงดูด ในขณะที่ด้านท้ายลม ($S/S_{\max} > 0.5$) มีค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดใกล้เคียงกันดังรูปที่ 8 พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากลักษณะการไหลของลมเมื่อกระทบผิวหลังคา มุมปะทะที่

สูงขึ้น 26.7° ทำให้กระแสลมไหลแยกตัวออกจากผิวหลังคาเร็วขึ้น ส่งผลให้บริเวณแรงดูดสูงสุดกระจายตัวมากขึ้นและสิ่งที่เป็นแรงดูดสูงสุดลดลงเมื่อเทียบกับความชัน 18.4°



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกลางหลังคาทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

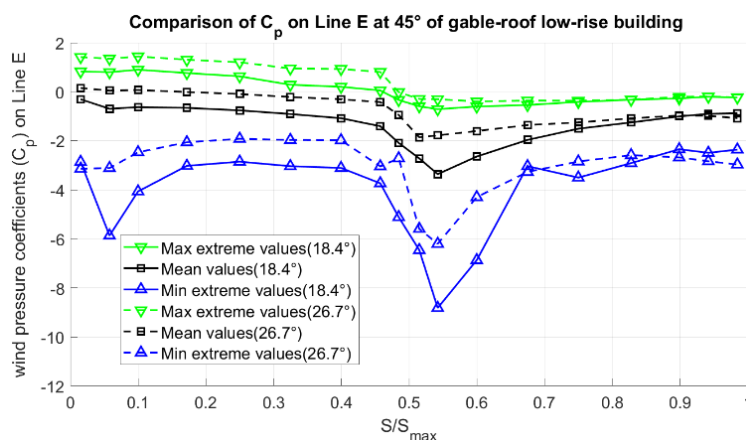
เมื่อเปรียบเทียบหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° กับหลังคาทรงจั่วความชัน 18.4° ที่ตำแหน่งกึ่งกลางหลังคาพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดที่หลังคาด้านต้นลมของหลังคาโค้งมากกว่าด้านท้ายลม และมากกว่าหลังคารูปทรงจั่วอย่างชัดเจนที่ด้านต้นลมเนื่องจากรูปทรงโค้งช่วยให้กระแสลมไหลเกาะผิวและเร่งความเร็วได้อย่างต่อเนื่องตลอดแนวหลังคา ขณะที่หลังคาจั่วมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงบริเวณสันหลังคาซึ่งก่อให้เกิดการแยกตัวของกระแสลมแสดงดังรูปที่ 9



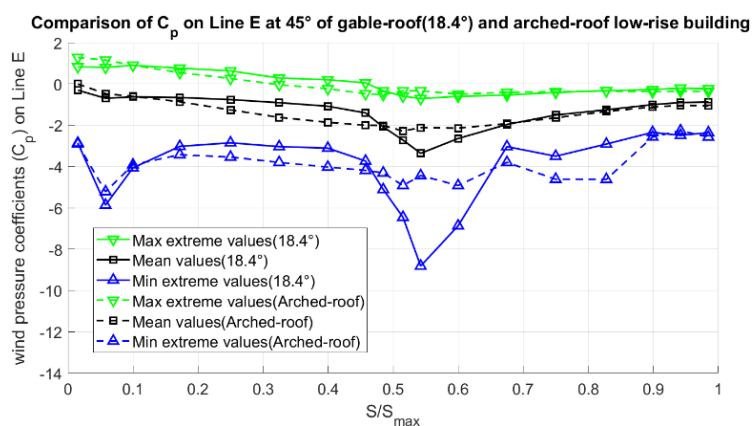
รูปที่ 9 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งกลางหลังคาทิศทางลมตั้งฉากกับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และหลังคาโค้งที่ความชันเทียบเท่า 18°

4.1.2 กรณีทิศทางลมเฉียงทำมุม 45° กับสันหลังคา

ผลการศึกษาพบว่า บริเวณขอบหลังคาเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงมากสำหรับทั้งหลังคาทรงจั่วทั้งสองความชันและหลังคาโค้ง อันเนื่องมาจากการแยกตัวของการไหล (Flow separation) บริเวณขอบอาคาร โดยเฉพาะในช่วงด้านท้ายลมที่อยู่ใกล้สันหลังคา ($0.5 < S/S_{\max} < 0.6$) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งแตกต่างจากกรณีในหัวข้อ 4.1.1 ที่พิจารณาบริเวณกึ่งกลางของหลังคา พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดมีแนวโน้มแปรผันสูงขึ้นอย่างชัดเจนในบริเวณมุมท้ายลมที่อยู่ใกล้สันหลังคา



รูปที่ 10 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งขอบหลังคาทิศทางลมเฉียง 45°กับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



รูปที่ 11 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยต่ำสุด และสูงสุดที่ตำแหน่งขอบหลังคาทิศทางลมเฉียง 45° กับสันหลังคาสำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และหลังคาโค้งที่ความชันเทียบเท่า 18°

เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา พบว่ากรณีลมเฉียง 45° ก่อให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงสุด บนหลังคาสูงกว่าที่บริเวณมุมท้ายลม เนื่องจากการไหลของอากาศเกิดการแยกตัว (flow separation) พร้อมกันบริเวณขอบหลังคาสองด้านที่อยู่เหนือลม ส่งผลให้เกิดกระแสลมบริเวณมุมหลังคา ในทางตรงกันข้าม เมื่อลมพัดตั้งฉากกับสันหลังคา การไหลของลมมีลักษณะสมมาตรมากกว่าและเกิดการแยกตัวของกระแสลมในลักษณะที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การกระจายความดันบนหลังคาไม่รุนแรงเท่ากรณีลมเฉียง 45°

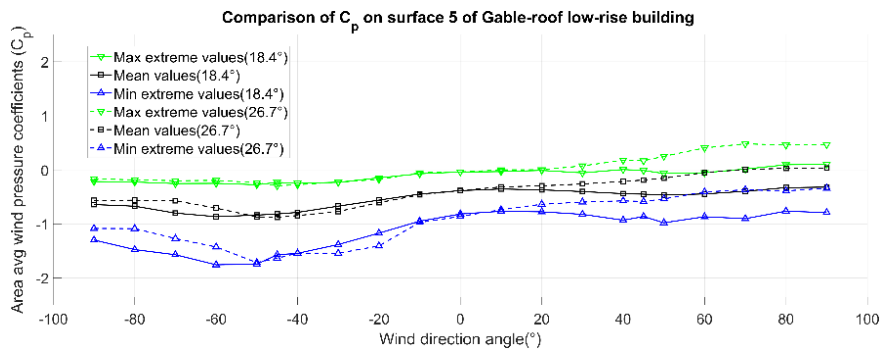
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดแต่ละด้าน (Area average for panel load)

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้านของหลังคาถูกวิเคราะห์ในทุกมุมการทดสอบ ตั้งแต่มุม -90° ถึง 90° โดยเพิ่มทีละ 10° และทำการทดสอบเพิ่มเติมที่มุมเฉียง -45° และ 45° เพื่อประเมินพฤติกรรมในกรณีลมปะทะเฉียง

4.2.1 หลังคาทรงจั่ว

สำหรับหลังคาทรงจั่วที่มีความชัน 18.4° และ 26.7° ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า บริเวณด้านท้ายลม (ช่วงมุม -90° ถึง 0°) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมของทั้งสองความชันมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยค่าแรงดูดเฉลี่ยสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงมุม -60° ถึง -45° ซึ่งสอดคล้องกับกรณีลมเฉียงด้านท้ายลมที่ก่อให้เกิดการไหลแยกตัวและการก่อตัวของกระแสนบริเวณสันและขอบหลังคา ส่งผลให้เกิดความดันลบสูงกว่ามุมอื่น

ในทางกลับกันบริเวณด้านต้นลม (ช่วงมุม 0° ถึง 90°) หลังคาที่มีความชัน 26.7° ให้ค่าแรงดูดเฉลี่ยต่ำกว่าหลังคาความชัน 18.4° อย่างชัดเจน และที่มุม 90° ซึ่งเป็นกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยหลังคาความชัน 26.7° มีค่าใกล้ศูนย์ แสดงให้เห็นถึงลักษณะสมมาตรของการไหลและการกระจายความดันที่สมดุลระหว่างสองด้านของหลังคา ดังแสดงในรูปที่ 12

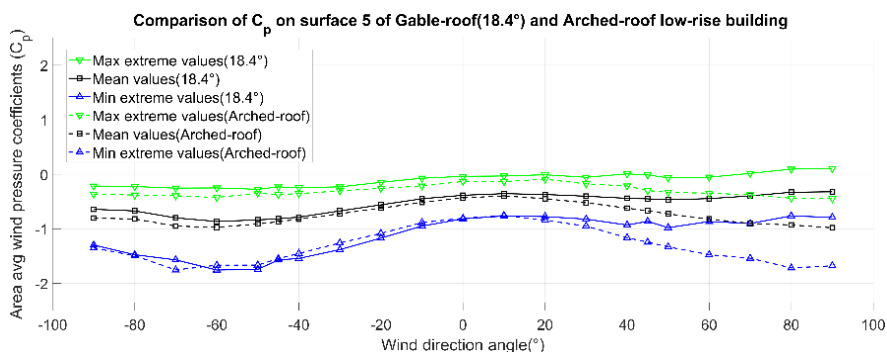


รูปที่ 12 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่เฉลี่ยบนพื้นผิวหลังคารูปทรงจั่วด้านที่ 5 ความชัน 18.4° และ 26.7°

4.2.2 หลังคาโค้ง

พบว่าบริเวณด้านต้นลม หลังคาโค้งให้ค่าแรงดูดเฉลี่ยสูงกว่าด้านท้ายลมอย่างเด่นชัด ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของหลังคาทรงจั่ว ลักษณะดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการเร่งความเร็วของกระแสลมตามแนวผิวโค้งที่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ความดันสถิตลดลงมากบริเวณด้านต้นลม

ขณะที่บริเวณด้านท้ายลมของหลังคาโค้งให้ค่าที่ใกล้เคียงกับหลังคาทรงจั่วความชัน 18.4° ค่าแรงดูดสูงสุดของหลังคาโค้งเกิดขึ้นในช่วงมุม -70° ถึง -50° ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นช่วงมุมลมเฉียดที่ก่อให้เกิดการรวมตัวของกระแสนบริเวณขอบหลังคาอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 13 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ย ต่ำสุด และสูงสุดที่เฉลี่ยบนพื้นผิวหลังคารูปทรงจั่วและโค้งด้านที่ 5 ความชัน 18.4° และเทียบเท่า 18°

4.2.3 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวทั้งหมดระหว่างผลการทดสอบอุโมงค์ลมกับมยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5]

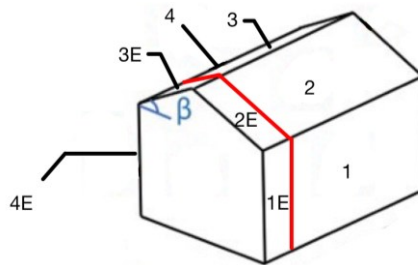
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบอุโมงค์ลมกับมาตรฐานการออกแบบ มยผ.1311-50 [7] และ ASCE 7-22 [5] พบว่า หลังคาทรงจั่วให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมที่สอดคล้องและอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับทุกทิศทางลม ดังตารางที่ 3 และ 4 โดยแบ่งพื้นที่ตามมาตรฐานได้ดังรูปที่ 14

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร กรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคาบนพื้นที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองหลังคารูปทรงจั่วที่ความชัน 26.7° เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
30° - 45° มยผ.1311-50 [7]	1.05	1.3	0.4	0.5	-0.8	-1.0	-0.7	-0.9
30° - 45° ASCE7-22 [5]	1.29	1.59	0.49	0.62	-0.99	-1.22	-0.85	-1.11
30° ASCE7-22 [5] (Dir)	1.6		0.4		-1.2		-1.0	
26.7° การทดสอบ	S2		S5		S6		S4	
	1.2		0.5		-1.0		-0.93	

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดที่กระทำภายนอกอาคาร กรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคาบนพื้นที่ต่าง ๆ ของแบบจำลองหลังคารูปทรงจั่วที่ความชัน 18.4° และหลังคาโค้งความชันเทียบเท่า 18° เปรียบเทียบกับมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

ความลาดชันของหลังคา	พื้นที่ผิวของอาคาร							
	1	1E	2	2E	3	3E	4	4E
20° มยผ.1311-50 [7]	1.00	1.50	-1.30	-2.00	-0.90	-1.30	-0.80	-1.20
20° ASCE7-22 [5]	1.22	1.85	-1.59	-2.47	-1.11	-1.59	-0.99	-1.48
20° ASCE7-22 [5] (Dir)	1.6		-0.80		-1.2		-1.0	
หลังคาจั่ว 18.4° การทดสอบ	S2		S5		S6		S4	
	1.2		-0.79		-1.42		-0.78	
หลังคาโค้งเทียบเท่า 18° การทดสอบ	1.2		-1.70		-1.37		-0.50	



รูปที่ 14 พื้นที่รับแรงลมตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ ASCE7-22 [5]

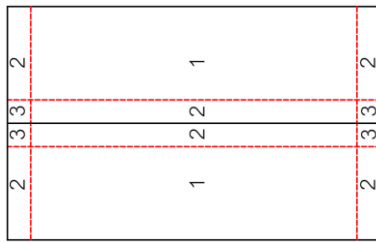
ในขณะที่หลังคาโค้งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับมาตรฐานโดยรวม ยกเว้นบริเวณด้านต้นลม (โซน S5) ซึ่งให้ค่าแรงดูดสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนด สาเหตุเนื่องจากมาตรฐานอ้างอิงพฤติกรรมของหลังคาทรงจั่วเป็นหลัก จึงไม่สามารถสะท้อนลักษณะการเร่งความเร็วของกระแสลมบนผิวโค้งที่ต่อเนื่องได้ดังตารางที่ 4

มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC-2020 [16] ให้ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักที่เท่ากัน (Dir) หมายถึงวิธีทิศทาง (Directional) ตามมาตรฐาน ASCE 7-22 [5] ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ย และงานวิจัยนี้สมมุติค่า C_g เท่ากับสองเพื่อคำนวณเป็นค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด

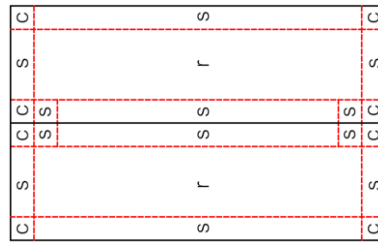
4.3 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยตามพื้นที่รับลม

ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยบนพื้นผิวแต่ละด้านถูกนำเสนอโดยอ้างอิงการแบ่งพื้นที่รับลมตามมาตรฐาน ได้แก่ มยผ.1311-50 [7], ASCE 7-22 [5] และ NBCC 2020 [16] เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างผลการทดสอบกับแนวทางการออกแบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] แบ่งช่วงความชันหลังคาออกเป็น 2 ช่วงหลัก คือ $7^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ขณะที่ ASCE 7-22 [5] (เช่นเดียวกับ ASCE 7-16 [6]) แบ่งช่วงความชันละเอียดกว่า ได้แก่ $\theta < 7^\circ$, $7^\circ < \theta \leq 20^\circ$, $20^\circ < \theta \leq 27^\circ$ และ $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ พร้อมทั้งกำหนดการแบ่งโซนพื้นที่รับลมแตกต่างจาก มยผ.1311-50 [7] อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 15 งานวิจัยนี้จึงนำเสนอผลการทดลองตามการแบ่งโซนพื้นที่รับลมของแต่ละมาตรฐานตามรูปที่ 16 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้โดยตรง

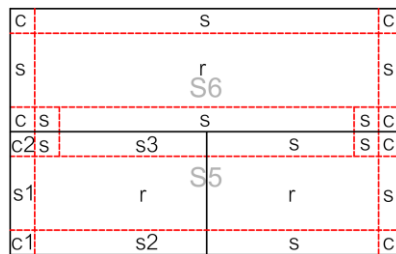


(ก)



(ข)

รูปที่ 15 การแบ่งโซนพื้นที่รับลมของหลังคาจั่ว (ก) มาตรฐาน ASCE7-22 [5] (ข) มาตรฐาน มยผ.1311-50 [7]



รูปที่ 16 รายละเอียดการแบ่งโซนพื้นที่รับลมจากผลการทดสอบ ตามมาตรฐาน มยผ. 1311-50 [7]

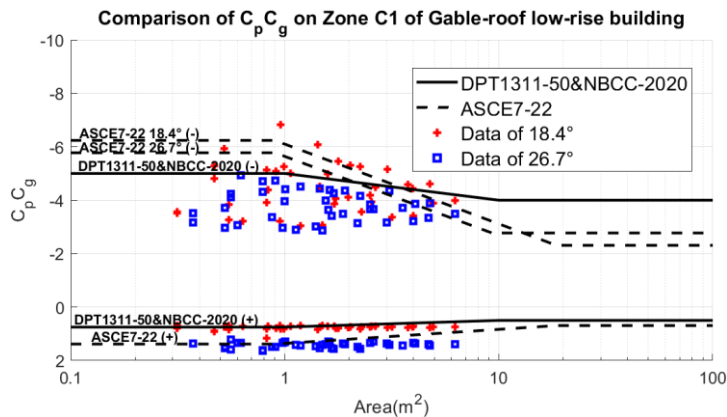
4.3.1 บริเวณมุมหลังคาด้านล่างและด้านบน (C1 และ C2)

ผลการทดสอบสำหรับหลังคาทรงจั่วพบว่า บริเวณมุมบน (C2) ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงกว่าบริเวณมุมล่าง (C1) อย่างชัดเจน ทั้งในกรณีความชัน 18.4° และ 26.7° ดังรูปที่ 17 และ 18 โดยเฉพาะที่ความชัน 18.4° ซึ่งให้ค่าแรงดูดสูงกว่าความชัน 26.7° อย่างมีนัยสำคัญ

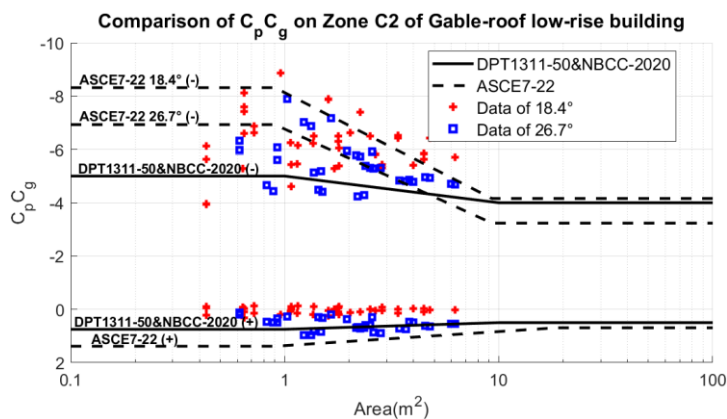
พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับกลไกการไหลบริเวณสันหลังคา ซึ่งเกิดการแยกตัวของกระแสลมและการก่อตัวของกระแสนวนตามแนวสัน ส่งผลให้บริเวณมุมบนเกิดความดันลบสูงกว่า

แนวโน้มนี้สอดคล้องกับ ASCE 7-22 [5] ที่กำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมแตกต่างกันสำหรับช่วงความชัน 20° - 27° และ 27° - 45° รวมทั้งกำหนดโซนมุมบนและมุมล่างแยกจากกัน ขณะที่ มยผ.1311-50 [7] กำหนดช่วงความชันกว้างกว่า อาจไม่สะท้อนความแตกต่างเชิงพฤติกรรมที่พบจากการทดลองได้ละเอียดเท่ามาตรฐาน ASCE 7-22 [5]

นอกจากนี้มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] กำหนดให้โซนมุมล่างใช้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเดียวกับขอบด้านข้าง (S1) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า ค่าแรงดูดบริเวณมุมล่างมีค่าต่ำกว่ามุมบนอย่างชัดเจนดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมล่าง (C1) สำหรับหลังคารูปทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7°

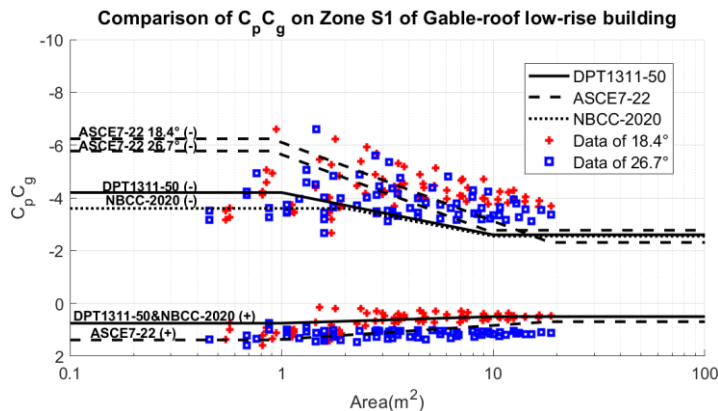


รูปที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมบน (C2) สำหรับหลังคารูปทรงจั่ว ความชัน 18.4° และ 26.7°

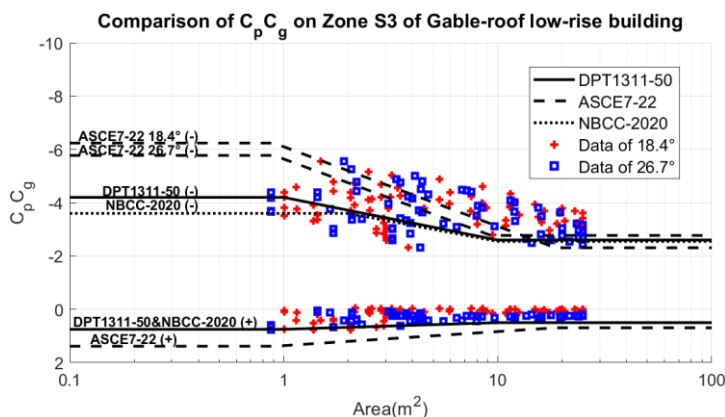
4.3.2 บริเวณขอบด้านข้างและขอบด้านบน (S1 และ S3)

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในพื้นที่ขอบด้านข้าง(S1) และ ขอบด้านบน(S3) ดังรูปที่ 19 และ 20 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมมีแนวโน้มสอดคล้องกับ ASCE 7-22 [5] มาก

ในขณะที่ค่าที่กำหนดใน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] มีแนวโน้มต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากการทดสอบ โดยเฉพาะในกรณีลมเฉียงที่ก่อให้เกิดกระแสวนบริเวณขอบหลังคาซึ่งอาจสะท้อนว่าโครงสร้างการแบ่งโซนในสองมาตรฐานนี้ยังไม่ครอบคลุมผลกระทบจากลมในบริเวณขอบด้านข้างและขอบด้านบนติดกับสันหลังคาดังรูปที่ 19 และ 20



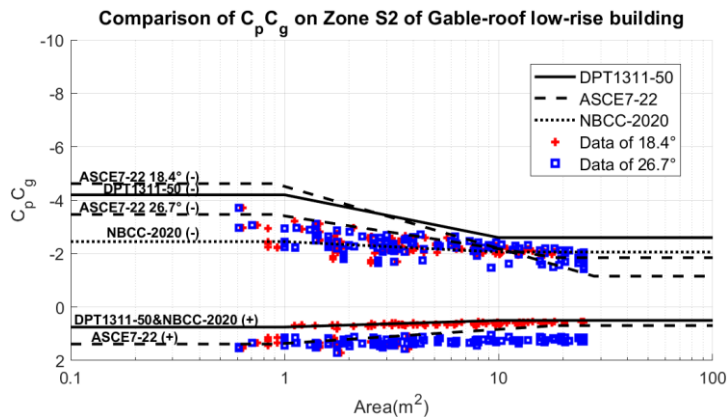
รูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านข้าง (S1) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



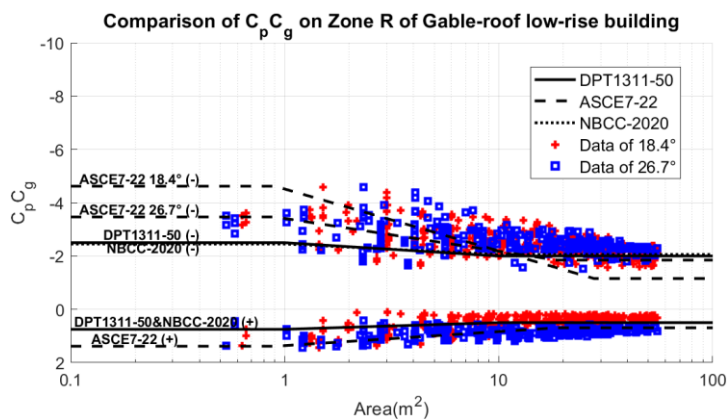
รูปที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านบน (S3) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

4.3.3 บริเวณขอบด้านล่างและพื้นที่หลังคาทั่วไป (S2 และ r)

มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] รวมพื้นที่ขอบด้านล่าง(S2) และพื้นที่หลังคา(r) เป็นพื้นที่เดียวกัน ขณะที่ มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] แยกสองพื้นที่นี้ออกจากกัน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ขอบด้านล่าง(S2) ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมต่ำกว่าโซนพื้นที่หลังคาทั่วไป (r) อย่างสม่ำเสมอ สอดคล้องกับแนวทางของ NBCC 2020 [16] ที่กำหนดค่าของ S2 ใกล้เคียงกับผลการทดสอบดังรูปที่ 21 และ 22 ผลการศึกษาพบว่า การรวมโซน S2 และ R เป็นพื้นที่เดียวกันตาม ASCE 7-22 [5] อาจให้ค่าที่อนุรักษ์นิยม (conservative) สำหรับบริเวณขอบด้านล่าง ขณะที่แนวทางของ NBCC 2020 [16] มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากกว่าในกรณีนี้



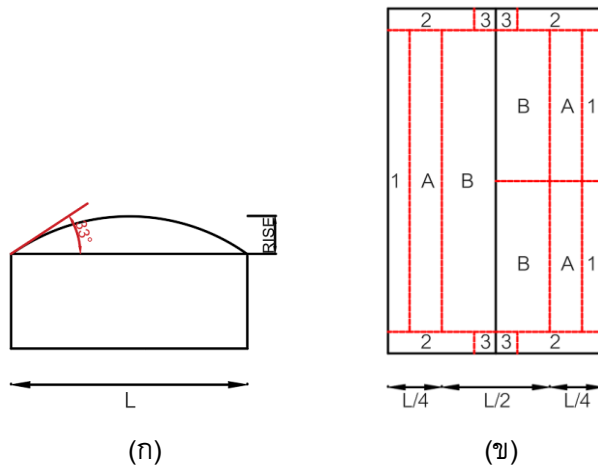
รูปที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านล่าง (S2) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°



รูปที่ 22 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่หลังคาทั่วไป (r) สำหรับหลังคารูปทรงจั่วความชัน 18.4° และ 26.7°

4.3.4 หลังคาโค้งที่ความชันสัมประสิทธิ์เทียบเท่า 18°

สำหรับหลังคาโค้ง เนื่องจากมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] และ NBCC 2020 [16] ยังไม่มีข้อกำหนดเฉพาะสำหรับรูปทรงหลังคาประเภทนี้ งานวิจัยนี้จึงอ้างอิงหลักเกณฑ์การแบ่งโซนพื้นที่รับลมตาม มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] เป็นกรอบในการวิเคราะห์ แบบจำลองหลังคาโค้งมีค่า r เฉลี่ย = ระยะยกหลังคา (rise) ต่อช่วงหลังคา (L) (rise-to-span ratio) ความชันบริเวณชายคา และแบ่งโซนพื้นที่รับลมดังแสดงในรูปที่ 23 และค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมเฉลี่ยแสดงในตารางที่ 5



รูปที่ 23 (ก) แบบจำลองหลังคาโค้งมีค่า r เฉลี่ย = ระยะยกหลังคา (rise) ต่อช่วงหลังคา (L) และความชันบริเวณชายคา (ข) การแบ่งโซนพื้นที่รับลมของหลังคาโค้ง

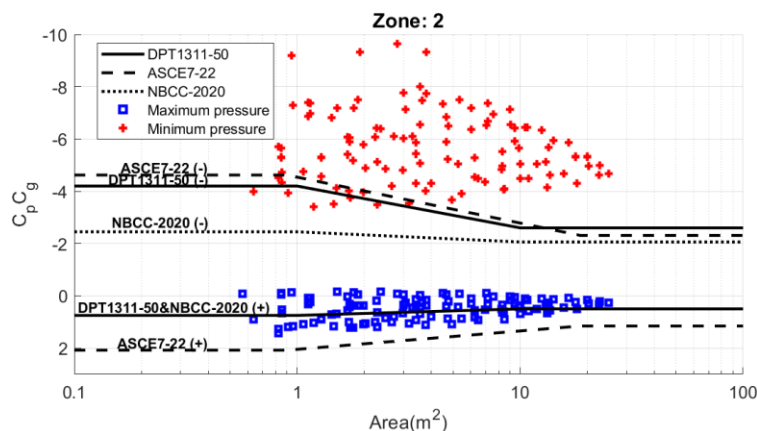
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับหลังคารูปทรงโค้งตาม ASCE 7-22 [5] และที่แปลงค่าสัมประสิทธิ์เทียบเท่าตาม มยผ.1311-50 [7]

เงื่อนไข	อัตราส่วน $r = \text{rise} / L$	ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลม GC_p (แปลงเป็น $C_g C_p$ เทียบเท่าตาม มยผ. 1311-50 [7])	
		Zone A	Zone B
หลังคาทรงโค้งบนโครงสร้างที่ยกระดับ	$0 < r < 0.2$	-1.08 (-2.50)	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		$1.8r-0.36$ $(4.16r-0.83)$	
	$0.2 \leq r < 0.3$	$7.2r-2.52$ $(16.63r-5.82)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	
	$0.3 \leq r \leq 0.6$	$3.3r-0.84$ $(7.62r-1.94)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	
หลังคาโค้งวางบนพื้นดิน	$0 < r \leq 0.6$	$1.68r$ $(3.88r)$	$-0.84-1.2r$ $(-1.94-2.77r)$
		-0.6 (-1.39)	

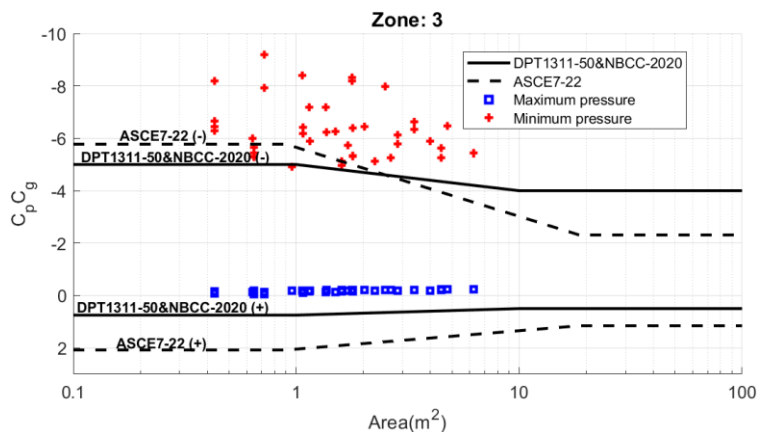
แบบจำลองหลังคาโค้งที่ศึกษามีค่า r เฉลี่ย เท่ากับ 0.16 ซึ่งอยู่ในช่วง $0 < r < 0.2$ ตามการจัดประเภทของ ASCE 7-22 [5] สำหรับหลังคาโค้งต่ำ (low-rise curved roof) โดยการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมในโซนพื้นที่ขอบหลังคา 1, 2 และ 3 อ้างอิงแนวทางเดียวกับหลังคาทรงจั่ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าความชันบริเวณชายคา ซึ่งในกรณีศึกษานี้มีความชันเท่ากับ 33° จัดอยู่ในช่วง $27^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ตามเกณฑ์ของมาตรฐาน

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพื้นที่รับลมขอบด้านข้าง (2) และมุมบน (3) ดังรูปที่ 24 และ 25 ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าแรงลมสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงมุมลม -60° ถึง -45° ซึ่งเป็นกรณีลมเฉียงด้านท้ายลม

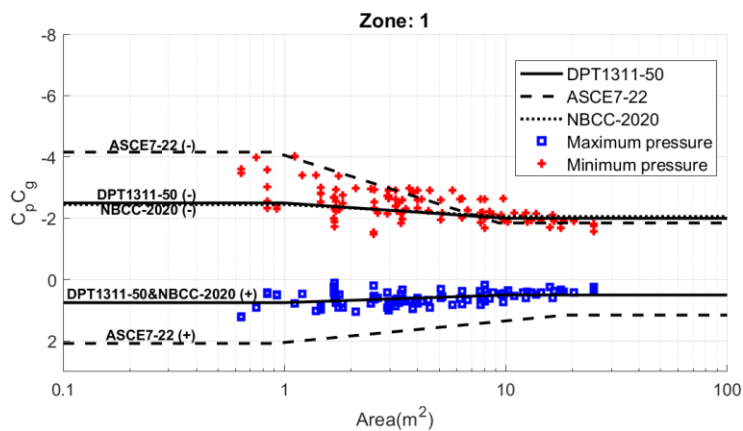
การไหลสามมิติบริเวณขอบหลังคาโค้ง ก่อให้เกิดการแยกตัวของกระแสลมและการรวมตัวของกระแสวน (vortex interaction) อย่างต่อเนื่องตามแนวผิวโค้ง แตกต่างจากหลังคาทรงจั่วที่มีจุดเปลี่ยนมุมชัดเจน เกิดบริเวณความดันลบที่รุนแรงและกระจายตัวมากกว่าในโซนขอบ ในทางกลับกัน ผลการศึกษาพบว่า โซนพื้นที่ 1 ดังรูปที่ 26 ให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดใน ASCE 7-22 [5] แสดงให้เห็นว่าการใช้แนวทางของมาตรฐานสำหรับพื้นที่ขอบล่างดังกล่าวมีความเหมาะสม



รูปที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านข้าง (2) สำหรับหลังคารูปทรงโค้งความชันเทียบเท่า 18°

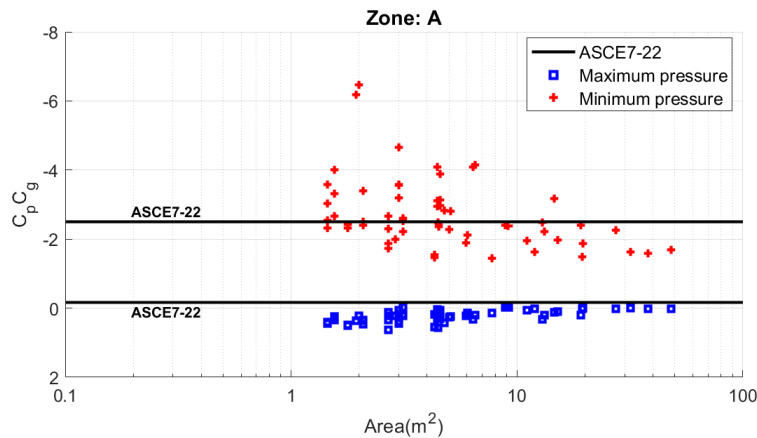


รูปที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่มุมบน (3) สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง ความชันเทียบเท่า 18°

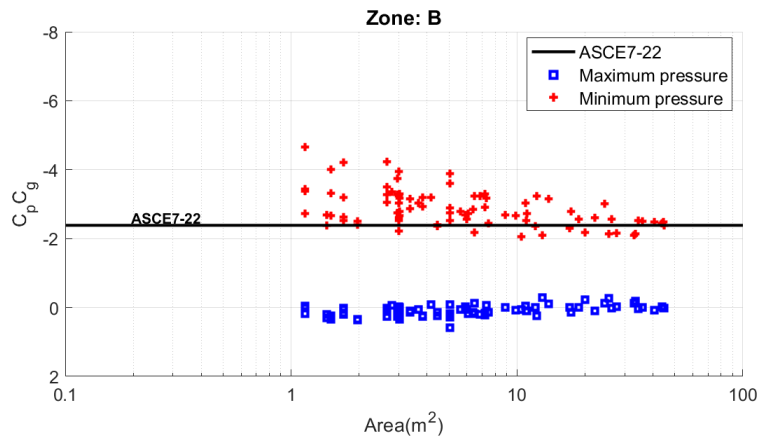


รูปที่ 26 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ขอบด้านล่าง (1) สำหรับหลังคารูปทรงโค้งความชันเทียบเท่า 18°

สำหรับพื้นที่กลางหลังคา มาตรฐาน ASCE 7-22 [5] กำหนดให้พื้นที่ B มีค่าเป็นแรงดูดตลอดทั้งพื้นที่ ขณะที่พื้นที่ A อาจเกิดได้ทั้งแรงดูดและแรงดัน ผลการทดสอบพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดันในทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงศูนย์ สะท้อนว่าบริเวณกลางหลังคาไม่ได้เกิดบริเวณสะสมแรงดันอย่างเด่นชัด ในส่วนของแรงดูดพบว่าทั้งพื้นที่ A และ B ให้ค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานดังรูปที่ 27 และ 28 แสดงให้เห็นว่าแนวทางของ ASCE 7-22 [5] สามารถประเมินพฤติกรรมแรงลมบริเวณกลางหลังคาโค้งได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 27 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ A สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง



รูปที่ 28 ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับพื้นที่ B สำหรับหลังคารูปทรงโค้ง

5. สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยการคำนวณแรงลมของอาคารเตี้ยหลังคาทรงจั่วและโด่งโดยการทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พบว่า การประยุกต์ใช้แผนภาพไวโรนอยสามารถเพิ่มความสะดวกและแม่นยำในการคำนวณพื้นที่รับลม ผลการศึกษาสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

ผลการศึกษาพบว่า หลังคารูปทรงโค้งในกรณีลมตั้งฉากกับสันหลังคา แสดงพฤติกรรมแรงลมที่แตกต่างจากหลังคารูปทรงจั่วอย่างชัดเจน โดยบริเวณด้านต้นลมเกิดค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงดูดสูงกว่าด้านท้ายลม ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวทางในกฎกระทรวงที่กำหนดให้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักเช่นเดียวกับหลังคารูปทรงจั่ว สะท้อนให้เห็นว่ารูปทรงโค้งมีลักษณะการไหลและการกระจายความดันที่แตกต่างในเชิงอากาศพลศาสตร์

เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสำหรับการออกแบบโครงสร้างรองกับข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] ASCE 7-22 [5] และ NBCC 2020 [16] พบว่าแนวทางการแบ่งพื้นที่รับลมและการแบ่งช่วงความชันของ ASCE 7-22 [5] มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบมากที่สุด โดยเฉพาะในบริเวณมุมและขอบหลังคา ขณะที่ข้อกำหนดของ มยผ.1311-50 [7] มีแนวโน้มให้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมต่ำเกินไปในบริเวณมุมและขอบของหลังคารูปทรงจั่ว และการแบ่งช่วงความชัน $7^\circ < \theta < 27^\circ$ ไม่สามารถสะท้อนความแตกต่างของพฤติกรรมแรงลมที่พบจากผลการทดสอบได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ค่าสัมประสิทธิ์หน่วยแรงลมสูงสุดของทุกแบบจำลองเกิดขึ้นในช่วงมุมลมเฉียงประมาณ -60° ถึง -40° ซึ่งเป็นกรณีวิกฤตสำหรับการออกแบบ

จากผลงานวิจัยนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมกลไกการไหลของลมที่กระทำต่ออาคารเตี้ยทั้งหลังคาจั่วและโค้ง และเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบโครงสร้างหลักและโครงสร้างรองของอาคารเตี้ย และพบว่าควรพิจารณาปรับปรุงมาตรฐาน มยผ.1311-50 [7] ต่อไปในอนาคต เช่น ก) โดยเพิ่มกรณีการแบ่งช่วงความชันของหลังคาจั่วที่ละเอียดมากขึ้น เช่น เพิ่มแรงลมในช่วงความชัน 20° ถึง 27° ออกเป็นอีกกรณี และ ข) การเพิ่มแรงลมและการคำนวณแรงลมอาคารเตี้ยหลังคาโค้ง โดยอาจใช้แนวทางให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ASCE7-22 [5] สามารถเพิ่มระดับความปลอดภัยและความเหมาะสมในการออกแบบอาคารเตี้ยสำหรับประเทศไทย ภายใต้สภาวะลมที่มีแนวโน้มที่รุนแรงขึ้นจากผลของโลกร้อนขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ สัญญาเลขที่ N25A671086 และผู้ประพันธ์อันดับแรกได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

References

- [1] Al-Chalabi R, Elshaer A. Aerodynamic mitigation of low-rise building with complex roof geometry. *Frontiers in Built Environment* 2023;9:1200383. doi: 10.3389/fbuil.2023.1200383.
- [2] Ho TCE, Surry D, Morrish D, Kopp GA. The UWO contribution to the NIST aerodynamic database for wind loads on low buildings: part 1 archiving format and basic aerodynamic data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 2005;93(1):1-30.
- [3] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-02. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2002.

- [4] Tamura Y. Aerodynamic database of low-rise buildings [Internet]. Tokyo: Tokyo Polytechnic University; 2012 [cited 2026 Jun 20]. Available from: http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/mainpage.html.
- [5] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-22. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2022.
- [6] American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2016.
- [7] Department of Public Works and Town & Country Planning. DPT 1311-50. Standard for wind load calculation and building response. Bangkok: Department of Public Works and Town & Country Planning; 2007. (In Thai).
- [8] Zhang Q, Peng M, Yao J, Zhou Y, Huang J. Numerical simulation study on continuous span variable cross-section arched roof. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2025;63(2):331-48. doi: 10.15632/jtam-pl/200390.
- [9] Wood G, Lynar A. Codification of wind loads on curved-roofed structures. Proceedings of the 19th Australasian Wind Engineering Workshop; 2018 Apr 4-6; Torquay, Victoria, Australia.
- [10] Gierson ML, Phillips BM, Duthinh D, Ayyub BM. Wind-pressure coefficients on low-rise building enclosures using modern wind-tunnel data and Voronoi diagrams. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 2017;3(4):04017010. doi: 10.1061/AJRUA6.0000915.
- [11] Uematsu Y, Yamamura R. Wind loads for designing the main wind-force resisting systems of cylindrical free-standing canopy roofs. Technical Transactions 2019;116(7):125-36. doi: 10.4467/2353737XCT.19.076.10727.
- [12] Natalini MB, Morel C, Natalini B. Mean loads on vaulted canopy roofs. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2013;119:102-13.
- [13] Macdonald PA, Kwok KC, Holmes JD. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. point pressure measurements on isolated structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1988;31(2-3):165-87.
- [14] Delaunay B. On the empty sphere. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR 1934;7(6):793–800.

- [15] Duthinh D, Main JA, Phillips BM. NIST technical note 1903. Methodology to analyze wind pressure data on components and cladding of low-rise buildings. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology; 2015.
- [16] Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council Canada. NBCC-2020. National Building Code of Canada 2020. Ottawa: National Research Council Canada; 2020.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย นรวิชญ์ มั่นศิลป์ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: norawish.mans@dome.tu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม



ดร.จิรวัฒน์ จันทรเรือง อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ Email: jirawat_ju@rmutto.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว อุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ศ.ดร.วิโรจน์ บุญญภักญ์ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกจาก Yokohama National University Email: bvrote@engr.tu.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: ผลของแรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาว การทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลม พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และโครงสร้างเหล็ก

Article History:

Received: March 7, 2026

Revised: July 16, 2026

Accepted: July 20, 2026

การออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟโรมาโดยประยุกต์ใช้เทคนิค
การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ: กรณีศึกษา วิสาหกิจชุมชนผู้ผลิตเซรามิก
**PRODUCT DESIGN OF A CERAMIC AROMA LAMP THROUGH THE
APPLICATION OF QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT: A CASE STUDY
OF A COMMUNITY-BASED CERAMIC ENTERPRISE**

อภิชล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล^{2*} สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์³ และ ชาทรี หอมเขียว⁴
^{1,2*,3,4}สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย,

1 ถ.ราชดำเนินนอก ต.บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา 90000,

¹apichon.tk@rmutsv.ac.th, ^{2*}julaluk.r@rmutsv.ac.th, ³surasit.r@rmutsv.ac.th,

⁴chatree.h@rmutsv.ac.th

Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Julaluk Rodjananugoon^{2*}, Surasit Rawangwong³
and Chatree Homkhiew⁴

^{1,2*,3,4}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Srivijaya, 1 Ratchadamnoen Nok Rd.,

Bo Yang Sub-district, Muang District, Songkhla 90000, Thailand,

¹apichon.tk@rmutsv.ac.th, ^{2*}julaluk.r@rmutsv.ac.th, ³surasit.r@rmutsv.ac.th

⁴chatree.h@rmutsv.ac.th,

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่งของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ผู้ผลิตเซรามิกประสบ
ปัญหาด้านรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่ขาดความหลากหลายและไม่ตอบสนองต่อความต้องการของ
ผู้บริโภค ส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันและการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง
มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟโรมาที่สะท้อนเอกลักษณ์ท้องถิ่น
โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อเชื่อมโยงความต้องการของลูกค้าไปสู่
แนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างเป็นระบบ ด้วยการรวบรวมข้อมูลความต้องการของลูกค้า
กลุ่มตัวอย่าง ประกอบด้วย ลูกค้า ผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์เซรามิกและผู้ผลิตในพื้นที่จังหวัด
นครศรีธรรมราช สงขลา และพัทลุง จำนวน 105 คน เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามและ

การสัมภาษณ์เชิงลึก วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และการจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะที่สำคัญผ่านเมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์หรือบ้านแห่งคุณภาพ ผลการวิจัยพบว่าสามารถกำหนดคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์จำนวน 9 ข้อ ได้แก่ ความสวยงามของผลิตภัณฑ์ ความเหมาะสมของราคา การไม่มีรอยแตกร้าว ขนาดของผลิตภัณฑ์ การเลือกใช้โทสนสี เอกลักษณะท้องถิ่น อายุการใช้งาน ลดลายผลิตภัณฑ์ และความคงทนของวัสดุเคลือบผิว ตามลำดับ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ผลการประเมินความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์ต้นแบบ พบว่ากลุ่มผู้ใช้ผลิตภัณฑ์มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์เซรามิกของระดับตกแต่งโดยรวม 4.58 คะแนน และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.19 ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ที่ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิกของระดับตกแต่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ, บ้านแห่งคุณภาพ, การออกแบบผลิตภัณฑ์, เซรามิก

ABSTRACT

At present, decorative ceramic products manufactured by ceramic community enterprises face problems related to limited product variety and the inability to respond effectively to consumer demands, which affect both market competitiveness and product value enhancement. Therefore, this research aimed to design and develop a ceramic aroma lamp reflecting local identity by applying the Quality Function Deployment (QFD) technique to systematically translate customer requirements into product design guidelines. Data were collected from a sample consisting of customers, ceramic product users, and ceramic manufacturers in Nakhon Si Thammarat, Songkhla, and Phatthalung provinces, totaling 105 participants. The research instruments included questionnaires and in-depth interviews. The collected data were analyzed using descriptive statistics, including mean scores and the prioritization of important product attributes through the House of Quality (HOQ) matrix. The results revealed nine important product attributes for product design, including product aesthetics, price appropriateness, crack-free characteristics, product dimensions, color tone selection, local identity, product lifespan, product patterns, and coating durability. These attributes were subsequently utilized in the design and development of the product prototype. The customer satisfaction evaluation indicated that the overall mean satisfaction score for the decorative ceramic product was 4.58, with a standard deviation (SD) of 0.19, representing

the highest level of satisfaction. The findings demonstrate that the Quality Function Deployment technique can be effectively applied to the design and development of new decorative ceramic products that respond to the needs of ceramic product users.

KEYWORDS: Quality Function Deployment, House of Quality, Product Design, Ceramic

1. บทนำ

เซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่มีความหลากหลายของผู้ประกอบการในกลุ่มผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ และเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างมูลค่าเพิ่มจากการนำวัตถุดิบในประเทศมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ โดยแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญอยู่ในภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศ นอกจากนี้อุตสาหกรรมเซรามิกยังเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจไทย เนื่องจากเป็นแหล่งการจ้างงานและสร้างรายได้ให้กับท้องถิ่นในประเทศสูงถึง 75,000 คนต่อปี โดยสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศด้วยการส่งออกที่มีมูลค่ามากถึง 30,000 ล้านบาท ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของอุตสาหกรรมเซรามิกแบ่งได้ 5 กลุ่ม ได้แก่ กระเบื้องเซรามิก เครื่องสุขภัณฑ์ เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร ของชำร่วยและเครื่องประดับ และลูกถ้วยไฟฟ้า [1] ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในประเทศไทยมีคู่แข่งทางการค้าในแถบทวีปเอเชียด้วยกันที่สำคัญจากประเทศจีน ที่สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนต่ำและมีคุณภาพสูง ดังนั้นผู้ประกอบการเซรามิกในประเทศไทยจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า เพื่อให้ลูกค้ามีความพึงพอใจมากที่สุด และกลับมาซื้อผลิตภัณฑ์ซ้ำ

เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) เป็นเทคนิคหนึ่ง ที่ช่วยในการออกแบบและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [2] ให้สามารถตอบโจทย์ความต้องการ และสร้างความพึงพอใจของลูกค้าได้ โดยนำข้อมูลจากลูกค้ามาศึกษาและระบุความต้องการที่แท้จริงออกมา พร้อมทั้งค้นหาวិธีการที่จะทำให้บรรลุความต้องการดังกล่าวอย่างเหมาะสม เพื่อทำให้ความผิดพลาดในเรื่องผลิตภัณฑ์ใหม่มีคุณภาพไม่ตรงกับความต้องการของลูกค้าลดลง ช่วยในการลดระยะเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ และยังสามารถหลีกเลี่ยงการเปลี่ยนแปลงการออกแบบ ในขณะที่เริ่มทำการผลิตไปแล้ว อีกทั้งยังทำให้เกิดการทำงานเป็นทีม เนื่องจากการตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับมติของเสียงส่วนใหญ่ จึงเกิดเป้าหมายร่วมกัน สมาชิกทุกคนมีส่วนร่วมในการออกความคิดเห็นเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ เป็นการประสานความร่วมมือทำให้เกิดความราบรื่น และความถูกต้องในการออกแบบและการผลิตผลิตภัณฑ์ [3-4]

ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของลูกค้ามีความสำคัญมาก สำหรับกลุ่มผู้ผลิต ดังนั้นทางกลุ่มผู้ผลิตต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับเทคนิค QFD เพื่อใช้ออกแบบและแก้ไขปัญหาในหลายประการในการผลิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม

เกี่ยวกับเทคนิค QFD พบว่ามีหลายองค์กรได้นำแนวความคิด QFD ไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และบริการ รวมถึงการปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจ อาทิ งานวิจัยของ Srichan and Sasananan [4] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อปรับปรุงกระบวนการทางธุรกิจจกัอย่างพารา ได้แก่ การปรับปรุงข้อมูลสินค้าและบริการบนเว็บไซต์ การผลิตตามมาตรฐาน ความพร้อมของพนักงานและการปรับปรุงสภาพแวดล้อม ผลที่ได้จากการประเมิน พบว่า คะแนนความพึงพอใจของลูกค้าโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 4.00 เป็น 4.56 นอกจากนี้ Ponatong et al [5] ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในส่วนของบ้านแห่งคุณภาพ เพื่อนำความต้องการมาออกแบบเครื่องกวนจันทร์เทศ ซึ่งพบว่าปัจจัยที่เป็นที่ต้องการในการออกแบบเครื่อง ได้แก่ ลักษณะการใช้งาน ความปลอดภัย ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกวนจากเครื่องถูกตามหลักอนามัยและรูปทรง ผลการประเมินความพึงพอใจเครื่องกวนลูกจันทร์เทศ พบว่ามีความพึงพอใจ เท่ากับ 93.36 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ยังพบว่า Trongpanich and Kengpol [6] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค QFD แบบ 4 เฟส และกระบวนการเชิงลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงคุณภาพการบริการในธุรกิจทางด้านขนส่งแบบเดอริ ผลการวิจัยพบว่าสามารถปรับปรุงการให้บริการดีขึ้น ซึ่งวัดได้จากค่าเฉลี่ยความพึงพอใจของลูกค้าที่เพิ่มขึ้น 18.82 เปอร์เซนต์ และจำนวนข้อร้องเรียนต่อเดือนลดลง 91.15 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ในส่วนทางด้านกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์พบว่า Pinta and Kengpol [3] เป็นผู้นำเทคนิค QFD มาประยุกต์ใช้ในโรงงานผลิตของเล่นไม้เพื่อการศึกษา โดยผลที่ได้รับคือ มีผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ และความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์ใหม่มีคะแนนเพิ่มขึ้น ต่อมา Sinthavalai and Ruengrong [7] ได้ประยุกต์ใช้บ้านแห่งคุณภาพเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ข้าวสารเพื่อเป็นของที่ระลึก ผลการวิจัยพบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบสามารถสร้างความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างได้ร้อยละ 83.11 สำหรับของข้าวร่วยงานแต่งงานและร้อยละ 79.76 สำหรับของขวัญของฝาก จะเห็นได้ว่าเทคนิค QFD สามารถช่วยพัฒนารูปแบบผลิตภัณฑ์และบรรจุภัณฑ์ให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้

ตามที่คณะผู้วิจัยได้ลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากแหล่งผลิตเซรามิกของผู้ผลิตเซรามิก กรณีศึกษาจากการสัมภาษณ์ข้อมูลกลุ่มผู้ผลิตพบว่า ลูกค้าเกิดการคืนสินค้าเพื่อแลกเปลี่ยน และส่งข้อร้องเรียนเกี่ยวกับคุณภาพและรูปแบบผลิตภัณฑ์อย่างมายังผู้ผลิตอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าจะไม่มีข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับความถี่ของข้อร้องเรียนอย่างเป็นระบบของผู้ประกอบการ แต่จากการสัมภาษณ์ภาคสนามพบว่า รูปแบบของข้อร้องเรียนดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกันในมุมมองของทั้งผู้ผลิตและลูกค้า โดยประเด็นปัญหาคุณภาพที่ร้องเรียนมากที่สุดคือ การออกแบบและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไม่ตรงกับความต้องการ รวมถึงรูปแบบผลิตภัณฑ์ไม่มีเอกลักษณ์และยังขาดความหลากหลาย ดังนั้นทางผู้ผลิตเซรามิก กรณีศึกษา จึงมีความต้องการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกรูปแบบใหม่ ๆ และต้องการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น เพื่อลดการคืนสินค้า และเพื่อลดข้อร้องเรียนจากลูกค้า อีกทั้งเพื่อให้สามารถออกแบบผลิตภัณฑ์ได้ตรงกับความต้องการของลูกค้ามากขึ้น จากการค้นคว้าผลงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าเทคนิคการแปลงหน้าที่

เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกหลายประเภท อาทิ ผลิตภัณฑ์ชุดถ้วยชาเซรามิก [8] อ่างล้างหน้าเซรามิก [9] และผลิตภัณฑ์เซรามิกสับน้โต๊ะอาหาร [10,11] ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าในการประยุกต์เทคนิค QFD นับเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า เพราะเป็นเทคนิคที่มีการศึกษาถึงความต้องการของลูกค้าแล้วทำการประเมินเพื่อให้ทราบว่าความต้องการของลูกค้าส่วนใดมีความสำคัญมากและจะใช้เทคนิคใดเพื่อทำการตอบสนองความต้องการเหล่านั้น

จากปัญหาข้อร้องเรียนด้านคุณภาพผลิตภัณฑ์และระดับความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์เซรามิก รวมถึงความต้องการของผู้ผลิตระดับท้องถิ่น กรณีศึกษาที่มุ่งพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกรูปแบบใหม่อย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของตลาดอย่างแท้จริง นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกประเภทโคมไฟโรม่าที่เชื่อมโยงเอกลักษณ์ท้องถิ่นร่วมกับความต้องการของลูกค้าเพื่อยกระดับศักยภาพการแข่งขันและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ชุมชน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิค QFD ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกรูปแบบใหม่ที่สอดคล้องต่อความต้องการของลูกค้า และมีศักยภาพในการสร้างผลตอบแทนเชิงธุรกิจให้กับผู้ผลิตได้ อีกทั้งเป็นแนวทางที่สามารถเพิ่มส่วนแบ่งการตลาดได้เพิ่มมากขึ้น

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของบ้านแห่งคุณภาพ (House of Quality: HOQ) เพื่อแปลงความต้องการของลูกค้าไปสู่ข้อกำหนดทางเทคนิค สำหรับใช้เป็นแนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟโรม่าให้ตรงตามความต้องการของลูกค้ามากที่สุด โดยมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียมการก่อนการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ก่อนที่จะมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ จะต้องมีการสำรวจเพื่อเตรียมข้อมูลก่อนนำเข้าบ้านแห่งคุณภาพ โดยมีขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลดังต่อไปนี้

1) สำรวจความต้องการของลูกค้า เป็นการสำรวจความต้องการของลูกค้า เพื่อหาเสียงของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากเซรามิก ด้วยวิธีการสัมภาษณ์ พูดคุย และเก็บแบบสอบถามที่ 1 ซึ่งเป็นแบบสอบถามปลายเปิด แบบสอบถามที่ใช้ในการวิจัยได้ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเหมาะสมของข้อคำถามโดย

ผู้เชี่ยวชาญก่อนนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลจริง เพื่อให้ข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย มีความชัดเจน และเหมาะสมกับบริบทของการศึกษา โดยการคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างเพื่อใช้ในการสำรวจความต้องการของลูกค้า โดยกลุ่มผู้ผลิตถูกใช้เพื่อสะท้อนมุมมองด้านความเป็นไปได้ในการผลิตและข้อจำกัดของกระบวนการผลิตในบริบทของวิสาหกิจชุมชน ขณะที่ข้อมูลด้านความต้องการของผลิตภัณฑ์มุ่งเน้นจากมุมมองของลูกค้าและผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งเลือกใช้สมการการหาค่าไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G.Cochran และกำหนดให้ระดับความเชื่อมั่น 90% ซึ่งสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยของ Sinthavalai and Ruengrong [7] ดังสมการที่ 1

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

เมื่อ n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

P คือ สัดส่วนของประชากรที่ผู้วิจัยต้องการสุ่ม (งานวิจัยนี้ กำหนดใช้ $P = 0.30$)

Z คือ ระดับความมั่นใจที่กำหนดหรือระดับนัยสำคัญทางสถิติ (งานวิจัยนี้กำหนดใช้ $Z = 1.65$)

d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น (งานวิจัยนี้ กำหนดใช้ $d = 0.1$)

ดังนั้นในขั้นตอนของการสำรวจความต้องการของลูกค้า พบว่าจากการคำนวณมีจำนวนขนาดของกลุ่มตัวอย่าง 58 ตัวอย่าง แต่เมื่อสำรวจจริงได้เพิ่มเป็น 105 ตัวอย่าง เพื่อเพิ่มระดับความมั่นใจขึ้น ซึ่งกลุ่มตัวอย่างในการสำรวจประกอบไปด้วย กลุ่มลูกค้า ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิก และผู้ผลิตในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง

2) จัดเรียงถ้อยคำความต้องการ นำเสียงของลูกค้าที่รวบรวมได้มาจัดเรียงถ้อยคำใหม่ (Reword Data) และจัดกลุ่มความต้องการโดยใช้แผนผังกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) จากนั้นใช้แผนภูมิต้นไม้ (Tree Diagram) ในการแตกประเด็นความต้องการหลักออกเป็นความต้องการย่อยอย่างเป็นระบบ ช่วยลดข้อมูลความซ้ำซ้อนของข้อมูลและเพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้นและป้องกันการเกิดความสับสน แล้วสรุปเป็นส่วนที่ 1 ของบ้านแห่งคุณภาพ

3) สรรวจระดับความสำคัญ นำถ้อยคำความต้องการของลูกค้าผ่านการวิเคราะห์ในข้อที่ 2) มาจัดทำแบบสอบถามที่ 2 โดยแบบสอบถามที่ใช้ในการวิจัยได้ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเหมาะสมของข้อคำถามโดยผู้เชี่ยวชาญก่อนนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลจริง เพื่อให้ข้อคำถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย มีความชัดเจน และเหมาะสมกับบริบทของการศึกษา ซึ่งถูกประเมินโดยกลุ่มลูกค้า ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิก และผู้ผลิตในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง จำนวน 110 ตัวอย่าง เพื่อหาระดับความสำคัญปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์เซรามิก จากนั้นหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของระดับคะแนนความสำคัญจากแบบสอบถามที่ 2 เพื่อนำไปใช้เป็นค่า

ความสำคัญ (Important: IMP) ในบ้านแห่งคุณภาพ ทั้งนี้ แบบสอบถามที่ใช้ในการวิจัยสามารถขอเพิ่มเติมจากผู้วิจัยได้

2.2 การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในส่วนของแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1 มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้ [12-19]

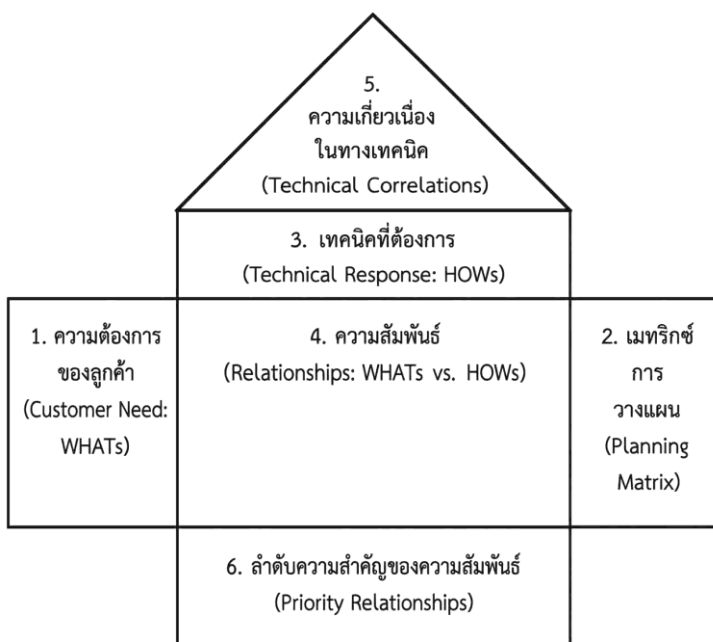
1) การสร้างความต้องการของลูกค้า (Customer Needs) นำความต้องการของลูกค้าที่ได้จากขั้นตอนการเตรียมการมาใส่ในส่วนที่ 1 ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1

2) การสร้างเมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นการกำหนดอัตราการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ แสดงในส่วนที่ 2 ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1

3) การกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement) เป็นข้อมูลในส่วนที่ 3 ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1 โดยการระดมสมองร่วมกันระหว่างคณะผู้วิจัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ และผู้ผลิตเซรามิก เพื่อกำหนดความต้องการของผลิตภัณฑ์ทางด้านเทคนิค (Product Technical Requirements: PTR) ที่ตอบสนองต่อความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย นอกจากนี้ยังมีกำหนดเป้าหมายทางเทคนิคและค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมายเบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงทิศทางการปรับปรุงการออกแบบ โดยใช้สัญลักษณ์ ดังนี้ ↑ ยิ่งมากยิ่งขึ้น ○ เป้าหมายเหมาะสม และ ↓ ยิ่งน้อยยิ่งขึ้น

4) การสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ลูกค้าต้องการ ในส่วนที่ 1 และความต้องการของผลิตภัณฑ์ทางด้านเทคนิค ในส่วนที่ 3 เพื่อนำข้อมูลที่ได้อีกในส่วนที่ 4 ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1 โดยขั้นตอนนี้จำเป็นต้องเข้าใจถึงความสามารถของแต่ละเทคนิคต่อระดับความพึงพอใจของลูกค้าทั้งหมด เพื่อชี้ให้เห็นว่าตัววัดทางเทคนิคสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้มากน้อยเพียงใด [19] โดยค่าคะแนนความสัมพันธ์จะนิยมใช้ตัวเลข 0, 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ

5) ความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค (Technical Correlations) เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ของเทคนิคที่นำมาใช้ในตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยพิจารณาว่าเทคนิคใดที่มีความสัมพันธ์กันบ้างและมีผลต่อกันมากน้อยเพียงใด การแสดงระดับความสัมพันธ์ใช้สัญลักษณ์ “O” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก “X” หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ “ช่องว่าง” หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อีกในส่วนหลังคา (ส่วนที่ 5) ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างบ้านแห่งคุณภาพ [2, 18]

6) การคำนวณหาลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์ (Priority Relationships) เป็นการวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของความสัมพันธ์หรือส่วนที่ 4 ในบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 1 บ่งบอกถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ทราบว่าความต้องการใดและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพใดที่ต้องได้รับการเอาใจใส่อย่างสูง การวิเคราะห์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ คำนำน้หนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Absolute Technical Requirement Important) ซึ่งใช้แสดงลำดับความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ สามารถคำนวณจากสมการที่ 2 และค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative Technical Requirement Important) เป็นค่าแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3

$$I = \Sigma(A \times B) \quad (2)$$

เมื่อ I คือ คำนำน้หนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์

A คือ ค่าความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางด้านเทคนิคต่อความต้องการของลูกค้า

B คือ ค่าลำดับที่ของการให้น้ำหนักเริ่มต้น

$$IMP = \frac{1}{\sum I} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ IMP คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคเปรียบเทียบ

2.3 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง

นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เข้าสู่กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีความสอดคล้องกับข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงเทคนิค เพื่อกำหนดเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่งแบบใหม่ จากนั้นดำเนินการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Product Prototype)

2.4 การประเมินความพึงพอใจ

หลังจากทำการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่งเสร็จแล้ว จากนั้นดำเนินการออกแบบแบบสอบถามที่ 3 เพื่อสำรวจระดับคะแนนความพึงพอใจในคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แบบใหม่ โดยทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลในกลุ่มผู้ผลิต ลูกค้า และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิกในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง และจังหวัดใกล้เคียง จำนวน 120 ตัวอย่าง

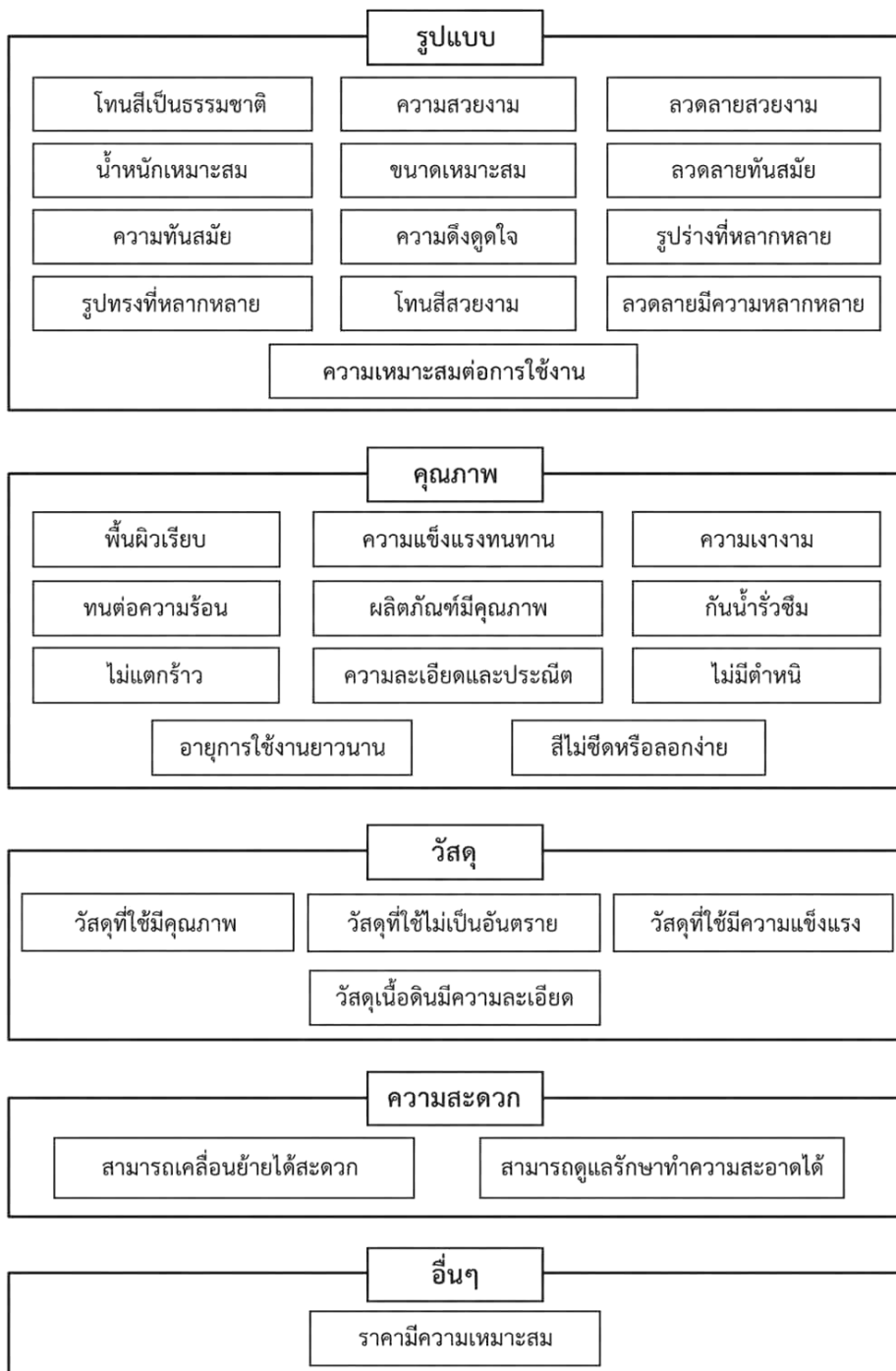
3. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง ผู้ผลิตเซรามิก กรณีศึกษา สรุปผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลได้ดังต่อไปนี้

3.1 ผลการเตรียมข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ

จากการศึกษาข้อมูลพื้นฐานของการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ การออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิก ตลอดจนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์เซรามิก โดยใช้การสัมภาษณ์และแบบสอบถามที่ 1 พบว่ามีจำนวนความต้องการของลูกค้า 31 ความต้องการ ซึ่งสามารถจัดหมวดหมู่ความต้องการโดยใช้แผนผังเชื่อมโยง (Affinity Diagram) ได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ รูปแบบ คุณภาพ วัสดุ ความสะดวก และอื่น ๆ ดังรูปที่ 2 จากนั้นได้นำความต้องการดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยแผนผังต้นไม้ (Tree Diagram) เพื่อรวมความต้องการที่มีลักษณะใกล้เคียงหรือซ้ำซ้อนเข้าด้วยกัน ทำให้เหลือความต้องการที่มีความชัดเจนจำนวน 23 รายการ สำหรับนำเข้าสู่บ้านแห่งคุณภาพ จากนั้นนำข้อมูลระดับคะแนนของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าจากแบบสอบถามที่ 2 มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยคะแนนความสำคัญ (Important: IMP) ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าความต้องการที่ลูกค้าได้ให้ความสำคัญกับ

ปัจจัยการใช้วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตรายอันดับแรก โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ย 4.193 คะแนน



รูปที่ 2 แผนผังกลุ่มเชื่อมโยงของความต้องการลูกค้า

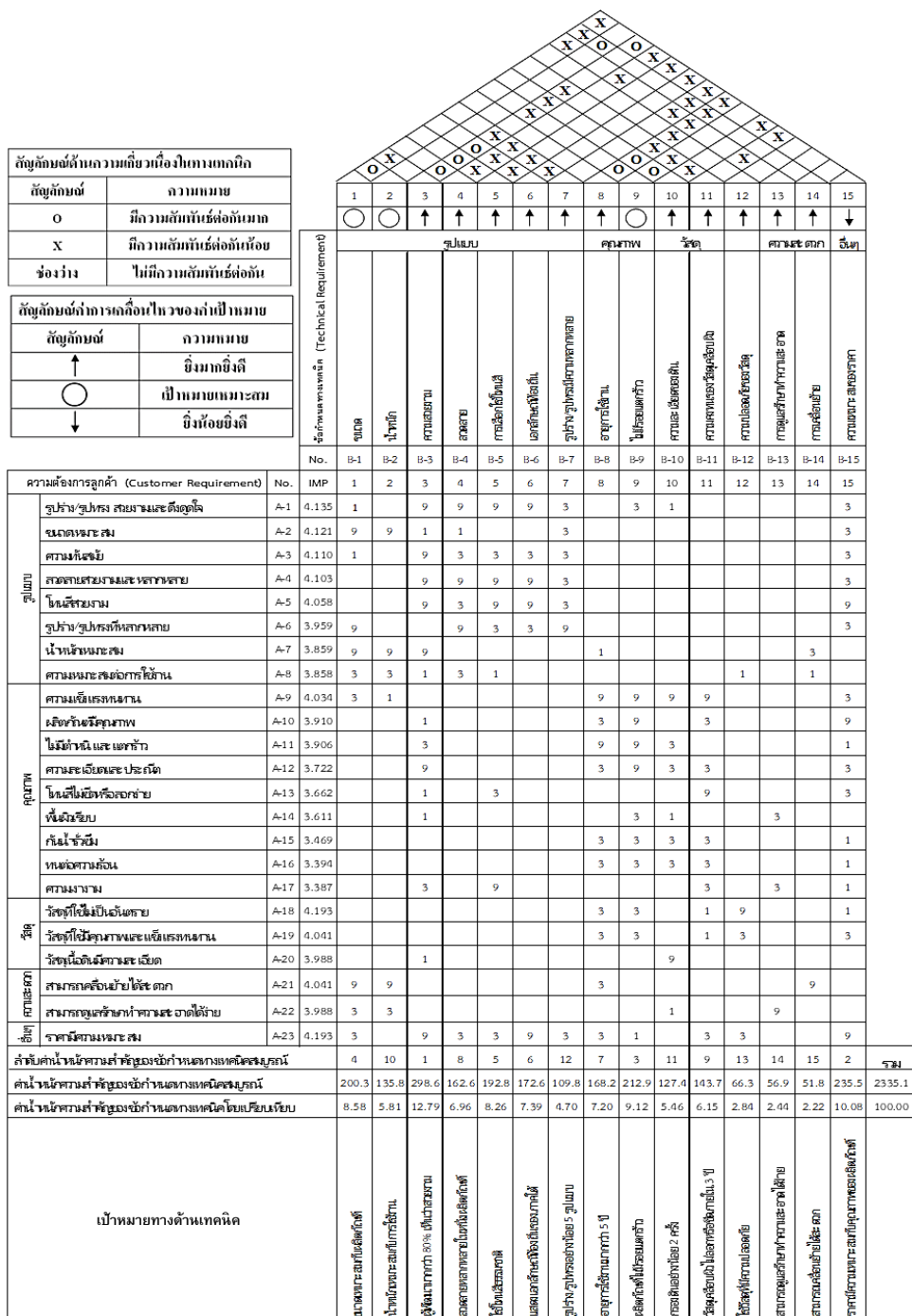
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของระดับคะแนนความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

ปัจจัยที่มีผลต่อความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์		IMP
รูปแบบ	รูปร่างรูปทรง สวยงามและดึงดูดใจ	4.135
	ขนาดเหมาะสม	4.121
	ความทันสมัย	4.110
	ลดทลายสวยงามและหลากหลาย	4.103
	โทนสีสวยงาม	4.058
	รูปร่างรูปทรงที่หลากหลาย	3.959
	น้ำหนักเหมาะสม	3.859
	ความเหมาะสมต่อการใช้งาน	3.858
คุณภาพ	ความแข็งแรงทนทาน	4.034
	ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ	3.910
	ไม่มีตำหนิ และแตกร้าว	3.906
	ความละเอียดและประณีต	3.722
	โทนสีไม่ซีดหรือลอกง่าย	3.662
	พื้นผิวเรียบ	3.611
	กันน้ำรั่วซึม	3.469
	ทนต่อความร้อน	3.394
	ความเงางาม	3.387
วัสดุ	วัสดุที่ใช้ไม่เป็นอันตราย	4.193
	วัสดุที่ใช้มีคุณภาพและแข็งแรงทนทาน	4.041
	วัสดุเนื้อดินมีความละเอียด	3.988
ความสะดวก	สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก	4.041
	สามารถดูแลรักษาทำความสะอาดได้ง่าย	3.988
อื่น ๆ	ราคามีความเหมาะสม	4.192

3.2 ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

สำหรับผลการนำข้อมูลที่ได้นำเข้าสู่วิธีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ มีรายละเอียดของผลการดำเนินงาน ดังนี้

3.2.1 ความต้องการของลูกค้า (Customer Needs) เป็นการนำความต้องการของลูกค้าจากทั้ง 5 กลุ่ม มาใส่ทางด้านซ้ายมือของเมทริกซ์พร้อมกำหนดหมายเลข ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 บ้านแห่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง

3.2.2 การสร้างเมทริกซ์การวางแผน (Planning Matrix) เป็นการนำค่า Important (IMP) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตที่ได้จากตารางที่ 1 มาใส่ให้ตรงกับความต้องการของลูกค้าแต่ละรายการ ใน

ส่วนที่ 1 ของบ้านแห่งคุณภาพ ดังรูปที่ 3

3.2.3 ข้อกำหนดทางเทคนิคที่ต้องการ (Technical Requirement) เป็นการระดมสมองของผู้วิจัยร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและผู้ผลิตเซรามิก เพื่อกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคเป้าหมายทางเทคนิค และค่าการเคลื่อนไหวของเป้าหมายเบื้องต้น ซึ่งสามารถกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิคได้ 15 ข้อกำหนด ดังรูปที่ 3 ในส่วนที่ 3 ของบ้านแห่งคุณภาพ

3.2.4 เมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Relationships) เป็นการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ 1 (ความต้องการของลูกค้า) และส่วนที่ 3 (ข้อกำหนดทางเทคนิค) ของบ้านแห่งคุณภาพ ซึ่งในการให้คะแนนนี้จะทำการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ โดยใช้การระดมสมองของทีมผู้วิจัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ และฝ่ายที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการให้คะแนนความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์ แสดงดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 การเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ และโดยเปรียบเทียบขอผลิตภัณฑ์เซรามิกของระดับตกแต่ง

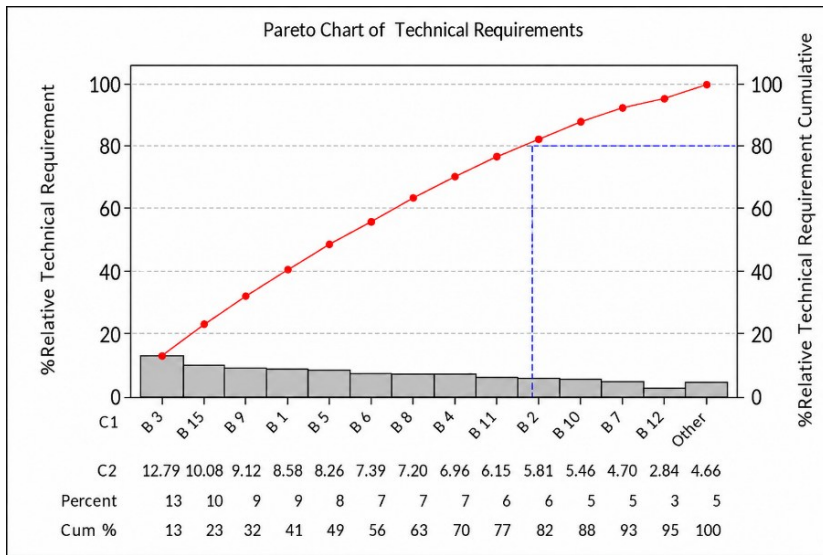
No.	Technical Requirements	Absolute Technical Requirement Important	% Relative Technical Requirement Important
B-3	ความสวยงาม	298.65	12.79
B-15	ความเหมาะสมของราคา	235.46	10.08
B-9	ไม่มีรอยแตกร้าว	212.87	9.12
B-1	ขนาด	200.29	8.58
B-5	การเลือกใช้โชนสี	192.78	8.26
B-6	เอกลักษณ์ท้องถิ่น	172.61	7.39
B-8	อายุการใช้งาน	168.21	7.20
B-4	ลวดลาย	162.55	6.96
B-11	ความคงทนของวัสดุเคลือบผิว	143.72	6.15
B-2	น้ำหนัก	135.76	5.81
B-10	ความละเอียดของดิน	127.40	5.46
B-7	รูปร่าง/รูปทรงมีความหลากหลาย	109.79	4.70
B-12	ความปลอดภัยของวัสดุ	66.30	2.84
B-13	การดูแลรักษาทำความสะอาด	56.88	2.44
B-14	การเคลื่อนย้าย	51.81	2.22

จากตารางที่ 2 พบว่า ข้อกำหนดทางเทคนิคที่มีค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบสูงสุด คือ ความสวยงาม มีค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ 298.65 และค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบร้อยละ 12.79 รองลงมา ได้แก่ ความเหมาะสมของราคา ร้อยละ 10.08 การไม่มีรอยแตกร้าว ร้อยละ 9.12 ขนาดของผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 8.58 และการเลือกใช้โทนสี ร้อยละ 8.26 ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าลูกค้าให้ความสำคัญทั้งด้านรูปลักษณ์ ความคุ้มค่า คุณภาพ และความเหมาะสมต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง ดังนั้นข้อกำหนดทางเทคนิคที่มีลำดับความสำคัญสูงจึงถูกนำไปใช้เป็นแนวทางหลักในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้อย่างเหมาะสม

3.3 การออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพพาเรโต ในรูปที่ 4 พบว่าคุณลักษณะการออกแบบที่ผู้ผลิตต้องให้ความสำคัญสูงสุดมี 9 ข้อ ดังนั้นผู้วิจัยได้นำผลดังกล่าวมาเรียบเรียงใหม่และส่งต่อไปให้กับทีมออกแบบ เพื่อดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่ง และทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยรายละเอียดข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ความสวยงาม ผลิตภัณฑ์มีการออกแบบที่สวยงามตรงตามรสนิยมของกลุ่มลูกค้า เพื่อเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ที่ได้รับ เนื่องจากความสวยงามเป็นความพึงพอใจแรกที่สัมผัสได้ก่อน
- 2) ความเหมาะสมของราคา ผลิตภัณฑ์มีการกำหนดราคาที่เหมาะสมตามการใช้งาน ความยากง่ายในการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์
- 3) ไม่มีรอยแตกร้าว ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตต้องไม่มีรอยแตกร้าว จากกระบวนการผลิต และมีการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพ
- 4) ขนาด ผลิตภัณฑ์มีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งาน
- 5) การเลือกใช้โทนสี ผลิตภัณฑ์มีการเลือกใช้โทนสีธรรมชาติ และเลือกใช้โทนสีที่สื่อถึงเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์
- 6) เกล็ดสีของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์มีการหยิบยกรูปทรง รูปแบบ หรือลวดลายจากท้องถิ่นมาดัดทอนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถสื่อถึงเอกลักษณ์ท้องถิ่น
- 7) อายุการใช้งาน กำหนดเป้าหมายการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีอายุการใช้งานมากกว่า 5 ปี
- 8) ลวดลาย ผลิตภัณฑ์มีการเลือกใช้ลวดลายที่หลากหลาย และเลือกใช้ลวดลายที่สื่อถึงเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์
- 9) ความคงทนของวัสดุเคลือบผิว ผลิตภัณฑ์มีการใช้วัสดุเคลือบผิวที่มีคุณภาพ โดยไม่ลอกหรือซีดภายในระยะเวลา 3 ปี ซึ่งกำหนดเป็นเป้าหมายการออกแบบ เพื่อความสวยงามของผิวผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4 การจัดเรียงลำดับค่าน้ำหนักความสำคัญโดยเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์เซรามิกของระดับตกแต่ง

จากนั้นทีมออกแบบได้นำข้อกำหนดทางเทคนิคทั้ง 9 ข้อกำหนด ไปทำการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกของระดับตกแต่งประเภทโคมไฟ คือ ผลิตภัณฑ์โคมไฟโรมากรนงกเขาขาว มีการออกแบบโดยใช้เอกลักษณ์ของกรนงกเขาขาว ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เกิดจากความนิยมในการเลี้ยงนกเขาขาวของชาวลำปาง โดยกรนงกเขาขาวของชาวลำปางมีรูปร่างเป็นโคมโค้ง หัวกรนงมีความสวยงาม โดดเด่นเป็นเอกลักษณ์ จากความสวยงามของกรนงกเขาขาวดังกล่าวได้นำมาตัดทอนรายละเอียดให้ดูเรียบง่าย การออกแบบเป็นชุดโคมไฟโรมากร โดยออกแบบให้สามารถใช้จุดเทียนหอมและสามารถใส่น้ำมันหอมระเหยไว้ที่ส่วนบนของโคมไฟ เพื่อช่วยสร้างบรรยากาศและกลิ่นหอมให้กับสถานที่ ขึ้นรูปด้วยดินสโตนแวร์ เผาและตกแต่งด้วยวิธีการเคลือบที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส ทำให้มีความแข็งแรงทนทาน และทำความสะอาดได้ง่าย ซึ่งการออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบยังคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการผลิตจริงของวิสาหกิจชุมชน โดยเลือกใช้วัสดุกระบวนการขึ้นรูป และเทคนิคการเคลือบที่สามารถดำเนินการได้ภายใต้ศักยภาพการผลิตเดิมของกลุ่มผู้ผลิต หลังจากนั้นกลุ่มผู้ผลิตเซรามิก ได้ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบ พร้อมตกแต่ง แสดงดังรูปที่ 5 โดยกลุ่มเป้าหมายในการใช้งานผลิตภัณฑ์ คือ กลุ่มโรงแรม รีสอร์ท ร้านอาหาร และบ้านเรือนทั่วไป สามารถใช้ระดับตกแต่งเพื่อสร้างบรรยากาศให้กับสถานที่ต่าง ๆ และสามารถจำหน่ายเป็นสินค้าของที่ระลึกแก่นักท่องเที่ยว เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงอัตลักษณ์ของภาคใต้ได้เป็นอย่างดี



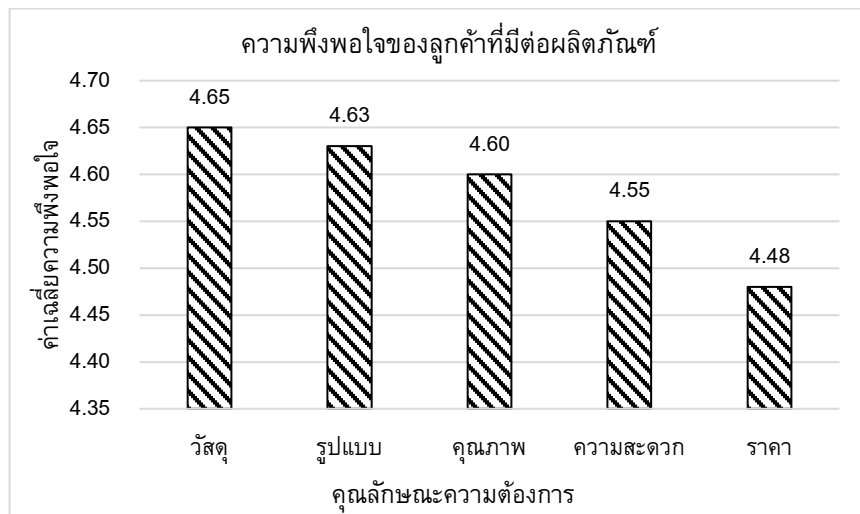
รูปที่ 5 ผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟโรมากรงนกเขาขาว

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) ในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์เซรามิกของประดับตกแต่งพร้อมทั้งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เพื่อสร้างรูปแบบผลิตภัณฑ์แบบใหม่ และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น เพื่อลดปัญหาการออกแบบที่ไม่หลากหลาย อีกทั้งเพื่อสร้างความพึงพอใจของลูกค้าและการตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากยิ่งขึ้น โดยจากการสำรวจความต้องการของลูกค้า ซึ่งกลุ่มตัวอย่างในการสำรวจประกอบไปด้วยกลุ่มผู้ผลิต ลูกค้า และผู้ใช้ผลิตภัณฑ์เซรามิกในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และพัทลุง ทำให้ทราบถึงความต้องการที่แท้จริงของลูกค้าและข้อกำหนดทางเทคนิคที่สัมพันธ์กับความต้องการนั้น ๆ หลังจากนั้นนำความต้องการเหล่านั้นมาจัดเรียงถ้อยคำใหม่ และจัดกลุ่มคุณลักษณะของความต้องการที่มีความหมายซ้ำซ้อนเข้าด้วยกันแล้วนำความต้องการมาจัดทำเป็นแบบสอบถาม เพื่อให้ลูกค้าได้ทำการประเมินความสำคัญของความต้องการ ซึ่งเป็นคะแนนความสำคัญที่ได้จากการประเมิน จากนั้นนำความต้องการของลูกค้า เข้าสู่วิธีการบ้านแห่งคุณภาพ เพื่อกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จำนวน 9 ข้อ ซึ่งนำมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบ เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้าในด้านรูปแบบ คุณภาพ วัสดุ ความสะดวก และด้านอื่น ๆ ทั้งนี้ ข้อกำหนดทางเทคนิคทั้ง 9 ข้อได้ถูกสะท้อนผ่านการประเมินความพึงพอใจใน 5 มิติ ความต้องการของลูกค้า ซึ่งใช้เป็นตัวแทนในการประเมินประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ต้นแบบในภาพรวม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประเมินความพึงพอใจของลูกค้าต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ในภาพรวม โดยพบว่า มีค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวม เท่ากับ 4.58 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.19 ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด และเมื่อพิจารณารายคุณลักษณะแต่ละประเด็น พบว่าด้านที่ลูกค้าให้

ความสนใจมากที่สุดคือ ด้านวัสดุซึ่งมีค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 4.65 รองลงมาคือ ด้านรูปแบบซึ่งมีค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 4.63 ด้านคุณภาพมีค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 4.60 ด้านความสะดวกมีค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 4.55 และด้านสุดท้ายคือ ด้านราคาซึ่งมีค่าความพึงพอใจ เท่ากับ 4.48 ดังรูปที่ 6 ผลจากการดำเนินงานวิจัย ชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์เซรามิกโคมไฟโรม่าที่ได้ออกแบบสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าตัวอย่างได้ในระดับที่ดี ทั้งด้านวัสดุ ด้านการออกแบบ และด้านความสะดวกการใช้งาน นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการออกแบบยังมีความเหมาะสมด้านราคาจำหน่ายสอดคล้องกับความต้องการของกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Erkarlan and Yilmaz [9] พบว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพช่วยให้ออกแบบคุณลักษณะทางวิศวกรรม เพื่อออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับความต้องการด้านการยศาสตร์ของลูกค้า นอกจากนี้ Chit-arirak and Sripathomswat [11] ที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในการออกแบบผลิตภัณฑ์เซรามิกสับน้ดอาหารสำหรับผู้สูงอายุได้สอดคล้องความต้องการทุกแง่มุม แสดงให้เห็นถึงจุดเด่นการประยุกต์ใช้ข้อกำหนดทางเทคนิคจากกระบวนการ QFD ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 6 ความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านขอบเขตของกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งครอบคลุมเฉพาะลูกค้า ผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์เซรามิก และผู้ผลิตในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สงขลา และพัทลุง เท่านั้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลมุ่งเน้นสถิติเชิงพรรณนาและการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคเป็นหลัก ดังนั้นการวิจัยในอนาคตควรพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็น ดังนี้

5.1 ควรมีการศึกษาและประยุกต์ใช้เทคนิคอื่น ๆ ร่วมในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

แบบใหม่ ๆ ในอนาคต เช่น วิศวกรรมคัมเซ แบบจำลองคาโน เป็นต้น

5.2 ควรเพิ่มการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ กลยุทธ์ทางการตลาด การวิเคราะห์พฤติกรรมผู้บริโภค ตลอดจนกลยุทธ์การส่งเสริมการขายและการลดต้นทุนการผลิต เพื่อให้สามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.3 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงสำรวจและออกแบบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ โดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากความต้องการของลูกค้า จึงยังไม่ได้ครอบคลุมการออกแบบการทดลองเชิงเปรียบเทียบก่อนและหลังการพัฒนา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2561 ขอขอบคุณผู้ผลิตเซรามิก กรณีศึกษา ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญ ที่มออกแบบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนดำเนินงานสำเร็จลุล่วง และขอบคุณกลุ่มลูกค้าที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

References

- [1] Sirisuntorn S. Current situation of ceramic industry in Thailand. *Ceramics Journal* 2010 14(34):43-53. (In Thai)
- [2] Akao Y. *Quality function deployment: integrating customer requirements into product design*. Cambridge, MA: Productivity Press; 1990.
- [3] Pinta A, Kengpol A. The improvement of product by using Quality Function Deployment (QFD) technique: a case study of an educational wood toy factory. *The Journal of KMUTNB* 2003;13(4):36-42. (In Thai)
- [4] Srichan A, Sasananan M. Application of Quality Function Deployment technique for improving business process: case study of rubber seedlings business. *Thai Science and Technology Journal* 2017;25(4):714-22. (In Thai)
- [5] Ponatong BP, Rodkaew Y, Getpun S, Rachapukdee P. Application of Quality Function Deployment technique in the development of nutmeg stirring machine by the participation of nutmeg processing community enterprises in Nakhon Si Thammarat province. *Journal of Engineering and Innovation* 2022;15(4):50-61. (In Thai)

- [6] Trongpanich S, Kengpol A. The improvement of quality in the service of logistics business by using Quality Function Deployment and Analytic Hierarchy Process techniques: a case study of battery logistics. The Journal of KMUTNB 2007;17(3):47-56. (In Thai)
- [7] Sinthavalai R, Ruengrong S. An application of House of Quality (HOQ) for designing rice product as a souvenir. Naresuan University Journal: Science and Technology 2018;26(3):36-51. (In Thai)
- [8] Rawangwong S, Homkhiew C, Pirom T, Rodjananugoon J, Laosat C. Application of Quality Function Development technique in combination with Kansei engineering in the design and development of ceramic tea set products. The Journal of Industrial Technology 2022;18(3):29-46. doi: 10.14416/j.ind.tech.2022.12.002. (In Thai)
- [9] Erkarslan Ö, Yilmaz H. Optimization of product design through Quality Function Deployment and Analytical Hierarchy Process: case study of a ceramic washbasin. METU Journal of the Faculty of Architecture 2011;28(1):1-22. doi: 10.4305/METU.JFA.2011.1.1.
- [10] Xu Y. Innovation design and development of emotional ceramic tableware based on QFD. International Journal of Global Economics and Management 2025;7(3):256-64. doi: 10.62051/ijgem.v7n3.29.
- [11] Chit-arirak P, Sripathomswat K. Development of ceramic tableware design for the elderly using Quality Function Deployment. The Golden Teak: Humanity and Social Science Journal 2026;32(1):105-24. (In Thai)
- [12] Meemongkol N, Junsong P, Santiamorntut W. Application of Quality Function Deployment technique for searching of device characteristic and design of health care monitoring device. KKU Research Journal 2012;17(4):515-27. (In Thai)
- [13] Homkhiew C, Ratanawilai T, Pochana K. Application of a Quality Function Deployment technique to design and develop furniture products. Songklanakarin Journal of Science and Technology 2012;34(6):663-68. (In Thai)
- [14] Maswichian U. Product and packaging development for curry paste using Quality Function Deployment technique: a case study of Bae Krueng Kaeng Tai factory [thesis] Songkla: Prince of Songkla University; 2017. (In Thai)
- [15] Sinthavalai R, Boonchu P, Polmai S. An application of House of Quality (HOQ) in improving a package of medical equipment. The Journal of KMUTNB 2016;26(3):437-50. (In Thai)

- [16] Somthong K. Development of chinese sausage product using Quality Function Deployment and Design of Experiment [Thesis]. Ubon Ratchathani: Ubon Ratchathani University; 2016. (In Thai)
- [17] Fan S, Xiong J, Xu T, Chen S, Zhang W. QFD design of machine - made sand based on independent/decomposition Axiom. Procedia Engineering 2017;174:442-48. doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.164.
- [18] Pirom T, Rawangwong S, Thongkamkaew A, Hutyee C. Design and developed product the kindergarten classroom furniture with rubber wood using Quality Function Development. The Journal of Industrial Technology 2019;15(3):76-92. (in Thai)
- [19] Chan L, Wu M. Quality Function Deployment: a comprehensive review of its concepts and methods. Quality Engineering 2002;15(1):23-35. doi: 10.1081/QEN-120006708.

ประวัติผู้เขียนบทความ



อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา E-mail: apichon.tk@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Optimization, Simulation modelling, Ergonomics, Work improvement, Mathematical modelling



จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา E-mail: julaluk.r@rmutsv.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: Product Design, Design of Experiments for Engineering, Work Improvement, Productivity



สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Work Improvement, Product Design, Manufacturing
Engineering, Machining, Design of Experiments for Engineering



ชาตรี หอมเขียว อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา

E-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th

งานวิจัยที่สนใจ: Wood-Plastic Composites (WPCs), Product Design,
Polymer Composites, Fiberboard or Particleboard, Materials
Characterization

Article History:

Received: February 10, 2026

Revised: July 10, 2026

Accepted: August 3, 2026

การบูรณาการกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์กับกรีนลีนซิกซ์ซิกมา
เพื่อการผลิตที่ยั่งยืน: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในประเทศไทย
**INTEGRATING PRODUCT PORTFOLIO STRATEGY AND GREEN LEAN
SIX SIGMA FOR SUSTAINABLE MANUFACTURING: A CASE STUDY OF
THE FEED INDUSTRY IN THAILAND**

วิรัช ชัยอัศวนันต์¹ สุภรชชัย วรรัตน์^{2*} และ ประยูทธ์ ฤทธิเดช³

¹นักศึกษามัธยมศึกษา, สาขาการจัดการทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
67140094@dpu.ac.th

^{2,3}อาจารย์ มัธยมศึกษาสาขาการจัดการทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210,
^{2*}vorarat@dpu.ac.th, ³prayuth.rit@dpu.ac.th

Virat Chaiadsavanun¹, Suparatchai Vorarat^{2*} and Prayuth Rittidatch³

¹Ph.D. student, Graduate Program in Engineering and Technology Management, College
of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, 67140094@dpu.ac.th

^{2,3}Lecturer, Graduate Program in Engineering and Technology Management, College of
Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University, 110/1-4 Prachachuen Road,
Laksi, Bangkok 10210, Thailand, ^{2*}vorarat@dpu.ac.th, ³prayuth.rit@dpu.ac.th

* ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมอาหารสัตว์มีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางอาหารและการเติบโตทางเศรษฐกิจ
ของประเทศไทย ซึ่งกระบวนการผลิตยังคงประสบปัญหาความสูญเสียจากการใช้ทรัพยากรที่เกิน
ความจำเป็น โดยเฉพาะประเด็นการบรรจุเกินซึ่งส่งผลให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดการปล่อย
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอบแนวคิดและบูรณาการ
เชิงกลยุทธ์เพื่อความยั่งยืน ด้วยการบูรณาการกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์และกรีนลีน
ซิกซ์ซิกมา (Integrated Sustainable Portfolio–Green Lean Six Sigma: ISP–GLSS Framework)

โดยเชื่อมโยงสามมิติสำคัญ ได้แก่ (1) การกำหนดกลยุทธ์ผลิตภัณฑ์ด้วยการวิเคราะห์พอร์ตโฟลิโอ (เมทริกซ์บีซีจี) (2) การปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการด้วยเครื่องมือลีน ซิกซ์ ซิกมา (DMAIC) การควบคุมกระบวนการทางสถิติ และ การออกแบบการทดลอง (3) การประเมินผลด้านความยั่งยืนผ่านแนวคิดการผลิตสีเขียวและตัวชี้วัดเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (UN SDGs) โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงกรณีศึกษาของบริษัทผู้ผลิตอาหารสัตว์บกแห่งหนึ่งในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ พบว่าอาหารสุกรเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญเชิงกลยุทธ์สูง จึงถูกเลือกเป็นผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ในการปรับปรุงกระบวนการ จากผลการวิจัยสามารถกำจัดความสูญเสียจากการผลิตเกินและของเสียในกระบวนการบรรจุ ส่งผลให้ระดับซิกมาเพิ่มจาก 2.07 เป็น 5.88 ค่าความสามารถของกระบวนการเพิ่มจาก 0.19 เป็น 1.46 ลดการบรรจุเกินได้ 7,986.69 กิโลกรัมต่อเดือน สร้างผลตอบแทนทางการเงิน 1,245,923.25 บาทต่อปี และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 83.65 ตันต่อปี โดยผลการวิจัยยืนยันว่ากรอบแนวคิด ISP–GLSS สามารถบูรณาการ ผลลัพธ์ด้านธุรกิจและสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนเป้าหมาย SDGs ข้อ 9 12 และ 13 อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: กลยุทธ์ทางธุรกิจ ลีนซิกซิกมา การผลิตสีเขียว เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

ABSTRACT

The feed manufacturing industry plays a critical role in food security and economic growth in Thailand. However, production processes continue to suffer from inefficiencies, particularly overfilling losses, which result in excessive material consumption, increased operational costs, and excess carbon dioxide gas emissions. This study aims to develop an Integrated Sustainable Portfolio–Green Lean Six Sigma (ISP–GLSS) framework that strategically integrates three key dimensions: (1) product portfolio strategy using the เมทริกซ์บีซีจี, (2) process performance improvement through Lean Six Sigma tools (DMAIC, SPC, and DOE), and (3) sustainability assessment based on Green Manufacturing principles and the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs). A case study methodology was employed in a terrestrial feed manufacturing company in Thailand. The product portfolio analysis identified swine feed as the most strategically significant product in terms of market share and growth, which was subsequently selected for process improvement. The results demonstrate substantial performance improvements, including the elimination of overproduction and defects, an increase in the Sigma level from 2.07 to 5.88, and an enhancement of process capability (Cpk) from 0.19 to 1.46. Overfilling losses were reduced

by 7,986.69 kg per month, yielding an annual financial benefit of 1,245,923.25 Baht and a reduction of 83.65 tonCO₂e per year. The findings confirm that the ISP–GLSS framework effectively integrates operational excellence with environmental sustainability and contributes directly to SDGs 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), 12 (Responsible Consumption and Production), and 13 (Climate Action).

KEYWORDS: Business Strategy, Lean Six Sigma, Green Manufacturing, Sustainable Development Goals: SDGs

1. บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารสัตว์มีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางอาหารในระดับโลกและเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตอาหารสัตว์ยังคงประสบปัญหาด้านประสิทธิภาพ โดยเฉพาะความสูญเสียจากการบรรจุเกิน (Feed Packing Giveaway Loss: PGL) ซึ่งก่อให้เกิดการใช้วัตถุดิบเกินความจำเป็น เพิ่มต้นทุนการผลิต และนำไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนเกิน ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนของธุรกิจในระยะยาว แนวคิดลีนซิกซ์ ซิกมาโดยเฉพาะกรอบการดำเนินงานแบบ DMAIC ได้นำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ลดของเสีย และลดความแปรปรวนในยุคอุตสาหกรรม 4.0 [1] และในอีกหลากหลายอุตสาหกรรม อาทิ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ [2] ยาง [3] ยา [4] การแพทย์ [5] ยานยนต์ [6] อาหาร [7, 8] พลาสติก [9] และอิเล็กทรอนิกส์ [10] งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่า การประยุกต์ใช้เครื่องมือทางสถิติ เช่น ควบคุมกระบวนการทางสถิติ ดัชนีความสามารถของกระบวนการ และการออกแบบการทดลองทางสถิติ สามารถช่วยยกระดับเสถียรภาพและคุณภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะเดียวกันประเด็นด้านความยั่งยืนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้กลายเป็นปัจจัยเชิงกลยุทธ์ที่องค์กรให้ความสำคัญมากขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอแนวทางการผลิตอย่างยั่งยืนผ่านกรอบแนวคิดต่าง ๆ เช่น การผลิตสีเขียว การประเมินกระบวนการด้วยแนวคิด 6R การจัดการห่วงโซ่อุปทานสีเขียว (Green SCM) [11] รวมถึงการเชื่อมโยงกับกรอบการพัฒนาที่ยั่งยืนระดับโลก เช่น ESG [12, 13] การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) [14] และระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) [15] งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการปรับปรุงเชิงกระบวนการเป็นหลัก โดยขาดการเชื่อมโยงกับการกำหนดกลยุทธ์ผลิตภัณฑ์ขององค์กรในระดับพอร์ตโฟลิโอ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ยังไม่พบงานวิจัยเชิงประจักษ์ที่บูรณาการการกำหนดกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ขององค์กร เข้ากับการใช้ลีนซิกซ์ ซิกมาพร้อมกับเครื่องมือควบคุมกระบวนการทางสถิติ และการออกแบบการทดลอง ภายใต้กรอบการวิจัยเดียวกัน โดยเฉพาะใน

บริบทของกระบวนการบรรจุอาหารสัตว์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งอุดช่องว่างดังกล่าวด้วยการนำเสนอกรอบแนวคิดบูรณาการเชิงกลยุทธ์เพื่อความยั่งยืน ซึ่งเชื่อมโยงการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผลิตภัณฑ์กับการปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการและลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมอย่างเป็นระบบ โดยการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ (Product Portfolio Analysis) ด้วย เมทริกซ์บีซีจี [16] เพื่อคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญเชิงกลยุทธ์ นำกรอบ DMAIC ของลีน ซิกซ์ ซิกมา ร่วมกับเครื่องมือการควบคุมกระบวนการทางสถิติ และการออกแบบการทดลองทางสถิติ [17,18] มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดความสูญเสียจากการบรรจุเกินพร้อมทั้งประเมินผลลัพธ์ด้านสิ่งแวดล้อมผ่านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และการเชื่อมโยงกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนของสหประชาชาติ (UN SDGs) [19,20]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนากรอบแนวคิดในการบูรณาการกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์กับลีนซิกซ์ ซิกมาเพื่อเลือกผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับกลยุทธ์องค์กรที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงกระบวนการ ลดต้นทุนการผลิต และช่วยยกระดับความยั่งยืนขององค์กร โดยใช้กรณีศึกษาธุรกิจผลิตและจำหน่ายอาหารสัตว์ในประเทศไทย

2. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เมทริกซ์บีซีจี

เป็นเครื่องมือหนึ่งของการกำหนดกลยุทธ์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ เพื่อเลือกผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมและสอดคล้องกับกลยุทธ์ทางธุรกิจ ที่พัฒนาโดย Boston Consulting Group (BCG) ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของธุรกิจหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในพอร์ตโฟลิโอขององค์กร โดยจะช่วยให้ผู้บริหารสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการลงทุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งในแง่เพิ่มมูลค่าและลดต้นทุน การปรับเปลี่ยนกลยุทธ์ และการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ โดยวิเคราะห์ผ่านผลิตภัณฑ์ในมิติของ ส่วนแบ่งการตลาด และ อัตราการเติบโตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งถูกจำแนกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) Stars (ดาว) ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดสูง และอยู่ในตลาดที่มีอัตราการเติบโตสูง 2) Cash Cows (วัว) ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดสูง แต่อยู่ในตลาดที่มีอัตราการเติบโตต่ำ 3) Question Marks (เครื่องหมายคำถาม) ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดต่ำ แต่อยู่ในตลาดที่มีอัตราการเติบโตสูง 4) Dogs (สุนัข) ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนแบ่งตลาดต่ำ และอยู่ในตลาดที่มีอัตราการเติบโตต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องมือนี้มาใช้ในการกำหนดผลิตภัณฑ์เป้าหมายนำมาพัฒนากระบวนการผลิตและลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ให้สอดคล้องกับกลยุทธ์ของธุรกิจ

2.2 ลีนซิกซ์ ซิกมา (Lean Six Sigma)

เป็นแนวคิดและวิธีการทางธุรกิจที่รวมจุดแข็งของสองแนวทางสำคัญ ได้แก่ การผลิตแบบลีน และ ซิกซ์ ซิกมา โดยมีเป้าหมายในการเพิ่มประสิทธิภาพ ลดความสูญเปล่า และลดความแปรปรวน ในกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพและความพึงพอใจของลูกค้า โดยการนำเครื่องมือคุณภาพต่าง ๆ รวมถึงวิธีการทางสถิติมาใช้อย่างเป็นระบบ มีขั้นตอนการดำเนินงาน DMAIC ได้แก่ 1) นิยามปัญหา (Define) ความต้องการของลูกค้า และเป้าหมายโครงการ 2) วัดกระบวนการ (Measure) ปัจจุบันด้วยข้อมูล 3) วิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา (Analyze) 4) พัฒนาแนวทางและทดสอบการปรับปรุง (Improve) 5) ควบคุมกระบวนการใหม่ให้คงที่และยั่งยืน (Control)

2.3 การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC)

เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการที่ใช้ ตรวจสอบและควบคุมกระบวนการผลิตให้มีความเสถียร โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ เพื่อลดความแปรปรวน และป้องกันข้อบกพร่อง โดยในงานวิจัยนี้ใช้แผนภูมิควบคุม และการวิเคราะห์ค่าความสามารถของกระบวนการ

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

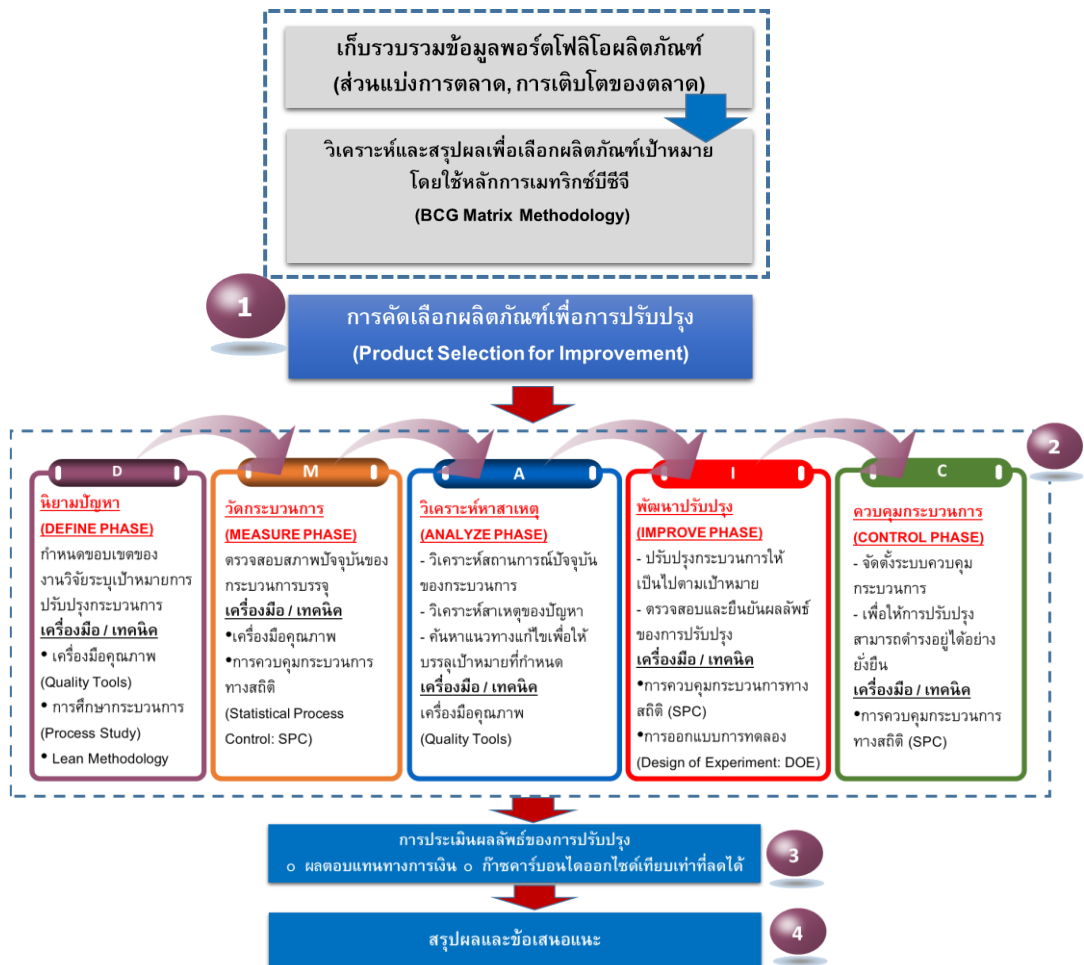
เป็นเครื่องมือทางสถิติในการออกแบบการทดลองช่วยในการระบุปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์ (Y) ประเมินความสัมพันธ์เชิงสาเหตุและผล หาค่าสภาวะการทำงานของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Settings) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียล เป็นการออกแบบการทดลองในกรณีมีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ หลักการวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology หรือ RSM) และการหาจุดที่เหมาะสมที่สุด

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการบูรณาการแนวคิดหลักการวิเคราะห์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ ลีนซิกซ์ ซิกมา การควบคุมกระบวนการทางสถิติในคราวเดียว เพื่อให้การปรับปรุงลดต้นทุน ลดของเสีย มีประสิทธิภาพส่งผลกระทบต่อผลกำไรและการเติบโตของธุรกิจได้อย่างยั่งยืน โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 4 ส่วนด้วยกัน ดังรูปที่ 1

ส่วนแรกเป็นการใช้ทฤษฎีหลักการ เมทริกซ์บีซีจี สาเหตุที่เลือกประยุกต์ใช้หลักการนี้ เนื่องจากต้องการบูรณาการเป้าหมายทางธุรกิจเข้ากับการดำเนินงานทางวิศวกรรม โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงในผลิตภัณฑ์กลุ่มที่มีผลกระทบต่อรายได้และโอกาสทางตลาดสูง (Stars) เพื่อให้การใช้ทรัพยากรในการทำกรีน ลีนซิกซ์ ซิกมาเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนที่สอง หลังจากคัดเลือก

ผลิตภัณฑ์เป้าหมายแล้วจะเข้าสู่กระบวนการตามกรอบแนวทางการวิจัย ชิกมา ส่วนที่สามารถเป็นการคำนวณผลลัพธ์ทางการเงิน ได้แก่ ต้นทุนที่ลดลง ค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนเทียบเท่าที่ลดได้ ประเมินความสอดคล้องกับ UN SDGs ส่วนที่สี่ การสรุปผลและนำเสนอแนวทางการวิจัยในอนาคต



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ISP-GLSS Framework

4. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ใช้ประชากรและกลุ่มตัวอย่างของบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายอาหารสัตว์บกแห่งหนึ่งในประเทศไทย โดยใช้ผลิตภัณฑ์อาหารสุกร 1 สายการผลิต

5. การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ข้อมูลส่วนแบ่งการตลาดและการเติบโตของยอดขายอาหารสัตว์แต่ละชนิด
- 2) ข้อมูลต้นทุนและความสูญเสียในกระบวนการ (Loss in Process) ของอาหารสุกร
- 3) ข้อมูลน้ำหนักบรรจุต่อถุงก่อนและหลังปรับปรุง
- 4) ข้อมูลพารามิเตอร์เครื่องชั่งบรรจุ

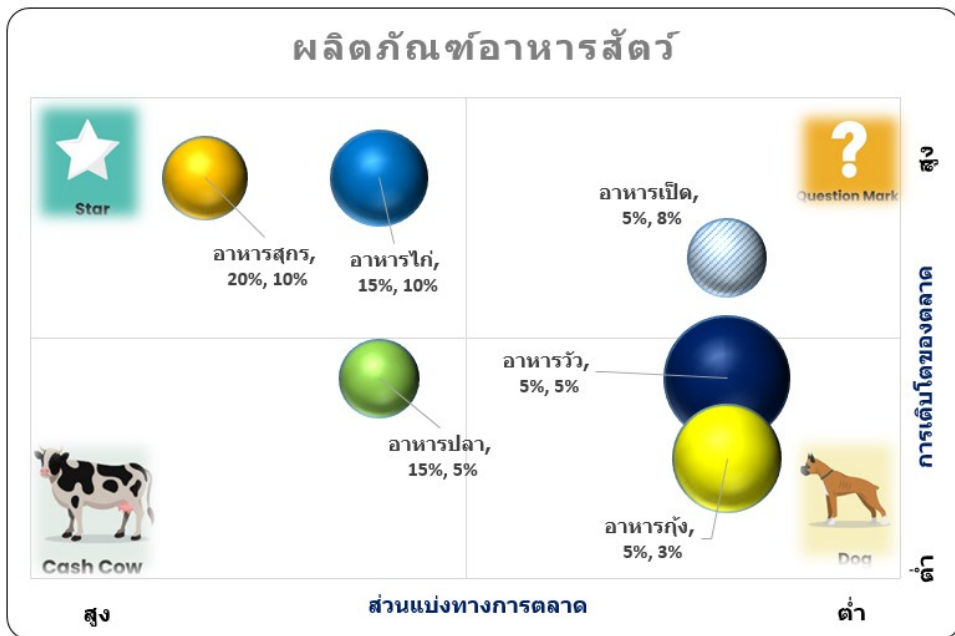
6. ผลการดำเนินงานวิจัย

6.1 การกำหนดเลือกผลิตภัณฑ์เป้าหมายสำหรับงานวิจัย

การเลือกผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่สอดคล้องกับกลยุทธ์และทิศทางของธุรกิจ ทั้งในมุมของส่วนแบ่งการตลาดและการเติบโตของยอดขายในตลาด จะทำให้ธุรกิจเกิดความยั่งยืนด้วยการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการพัฒนาปรับปรุงจะอยู่ในทิศทางที่ส่งเสริมธุรกิจ งานวิจัยนี้ใช้หลักการ เมทริกซ์บีซีจี ซึ่งเป็นเครื่องมือเชิงกลยุทธ์ที่พัฒนาโดย Boston Consulting Group (BCG) ใช้สำหรับวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของธุรกิจหรือผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในพอร์ตโฟลิโอขององค์กร นำมาวิเคราะห์อาหารสัตว์แต่ละประเภท ได้แก่ อาหารวัว อาหารสุกร อาหารไก่ อาหารเป็ด อาหารปลา และอาหารกึ่ง โดยไม่ได้พิจารณาปัจจัยสำคัญอื่น ๆ ที่มีผลต่อการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ เช่น ความสามารถในการทำกำไร ต้นทุนการดำเนินงาน ความเสี่ยงทางธุรกิจ จากตารางที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าอาหารสุกร (Swine Feed) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเติบโตสูงและมีส่วนแบ่งการตลาดสูงและมีปริมาณการผลิตต่อเนื่องสูง จัดเป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มดาว (Star) ที่จะส่งผลต่อกำไรและการเติบโตของธุรกิจ จึงเลือกอาหารสุกรมาเพื่อพัฒนาระบบและลดต้นทุนผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1 ข้อมูลร้อยละส่วนแบ่งการตลาด การเติบโตของตลาดอาหารสัตว์ อัตรากำไร

ผลิตภัณฑ์	ส่วนแบ่งการตลาด	อัตราการเติบโต	อัตรากำไร
อาหารสุกร	20	10	9
อาหารไก่	15	10	12
อาหารเป็ด	5	8	8
อาหารวัว	5	5	20
อาหารกึ่ง	5	3	15
อาหารปลา	15	5	8



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์เมทริกซ์บีซีจี

6.2 การดำเนินงานตามกรอบการวิจัยซิกซ์ ซิกมา

จากผลการวิเคราะห์เมทริกซ์บีซีจี นำอาหารสุกรมาดำเนินการตามกรอบวิจัย ได้ดังนี้

6.2.1 นิยามปัญหา (D, Define Phase)

ใช้การวิเคราะห์แบบค่อย ๆ ลงลึก เพื่อหาขอบเขตกระบวนการที่จะนำมาพัฒนาวิจัย

1) วิเคราะห์โครงสร้างต้นทุนของอาหารสุกร วิเคราะห์ต้นทุนของอาหารสุกร และ ซึ่งต้นทุนรวมอาหารสุกรคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$TC = RMC + PC + LIP + PAC + DTC + OHC \quad (1)$$

โดยที่ TC = ต้นทุนรวมค่าใช้จ่ายจากทุกกิจกรรมหลักตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบจนถึงการส่งมอบผลิตภัณฑ์ถึงมือลูกค้า (Total Cost)

RMC = ต้นทุนในการจัดหาวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิต (Raw Material Cost) เช่น ข้าวโพด กากถั่วเหลือง วัตถุดิบโปรตีน และแร่ธาตุในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์

- PC = ต้นทุนค่าใช้จ่ายในกระบวนการที่เกิดจากการแปรรูป (Processing Cost) เช่น การบด การผสม การอัดเม็ด การอบแห้ง และการใช้พลังงาน (ไฟฟ้า ไอน้ำ น้ำมัน เชื้อเพลิง)
- LIP = ต้นทุนความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Loss in Process)
- PAC = ต้นทุนในการบรรจุและใช้บรรจุภัณฑ์ (Packaging Cost) เช่น ถังบรรจุ พลาสติก ฟิล์มพลาสติก การพิมพ์ฉลาก และการบรรจุลงถุง
- DTC = ต้นทุนในการขนส่ง จัดเก็บ และกระจายผลิตภัณฑ์ไปยังลูกค้า (Distribution Cost)
- OHC = ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการผลิต แต่จำเป็นต่อการดำเนินงานขององค์กร (Overhead Cost) เช่น ค่าแรงงานสำนักงาน ค่าการตลาด ค่าเช่า ค่าเสื่อมราคาอาคารและเครื่องจักร และค่าใช้จ่ายด้านระบบสารสนเทศ
- โดยที่ต้นทุนต่าง ๆ ข้างต้นคิดเป็นสัดส่วนร้อยละของต้นทุนรวม ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนร้อยละของต้นทุนรวมอาหารสุกร

รายการ	ร้อยละ
ต้นทุนวัตถุดิบ	70.00
ต้นทุนค่าใช้จ่ายในกระบวนการ	8.00
ต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการผลิต	8.00
ต้นทุนความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต	5.00
ต้นทุนในการขนส่ง จัดเก็บ และกระจายผลิตภัณฑ์	5.00
ต้นทุนในการบรรจุและใช้บรรจุภัณฑ์	4.00

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์ต้นทุนของอาหารสุกรขุน จะเลือกต้นทุนความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตมาทำการปรับปรุง เนื่องจากเป็นต้นทุนที่เกิดจากความสูญเสียและเกินเป้าหมายควบคุมของบริษัทที่ไม่เกินร้อยละ 2 ซึ่งเป็นความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

2) ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของความสูญเสียรวม คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$LIP = PL + ML + HL + PAL \quad (2)$$

โดยที่ LIP = ความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต (Loss in process)

PL = ความสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยตรงจากกระบวนการผลิต (Process Loss)

ML = การสูญเสียที่เกิดจากการระเหยหรือเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการผลิตและจัดเก็บ (Moisture Loss)

HL = ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้าย การจัดการวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการ (Handling Loss) เช่น การโหลด การเท การขนส่งภายในโรงงาน

PAL = ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ (Packaging Loss) จากองค์ประกอบของความสูญเสียในกระบวนการนี้สามารถวิเคราะห์เป็นสัดส่วนตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนร้อยละความสูญเสียในกระบวนการผลิตอาหารสุกร

รายการ	ร้อยละ
ความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์	2.40
ความสูญเสียของปริมาณความชื้นในระหว่างกระบวนการผลิตและจัดเก็บ	1.00
ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้าย การจัดการวัตถุดิบ	1.00
ความสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยตรงจากกระบวนการผลิต	0.60

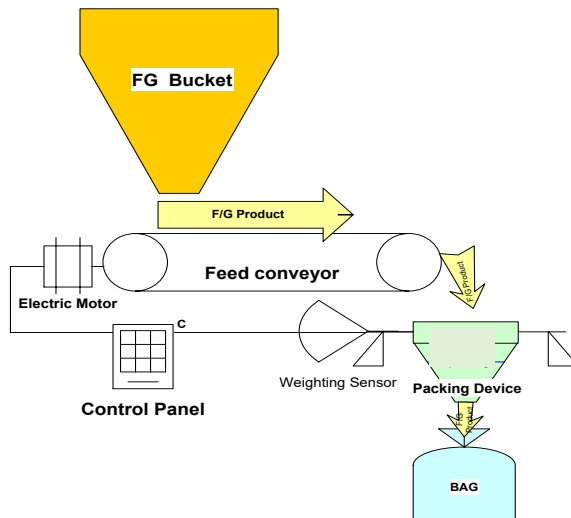
จากตารางที่3 การวิเคราะห์ประเภทความสูญเสียในการผลิต พบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุหีบห่อมีปริมาณสัดส่วนร้อยละมากที่สุด จึงนำไปศึกษาวิเคราะห์ต่อไป

3) ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบของความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุอาหารสุกรจากการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ต่อ พบว่าความสูญเสียจากการบรรจุเกินเป็นต้นทุนสูญเสียที่มากที่สุด ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สัดส่วนร้อยละของความสูญเสียบรรจุภัณฑ์

รายการ	ร้อยละ
ความสูญเสียจากการบรรจุเกิน	1.50
ความสูญเสียของบรรจุภัณฑ์	0.40
ความสูญเสียจากการนำมาผลิตใหม่	0.25
ความสูญเสียจากการรั่วไหล	0.20
ความสูญเสียจากการบรรจุต่ำกว่ามาตรฐาน	0.05

จากการใช้วิธีวิเคราะห์แบบแบบค่อย ๆ ลงลึกให้แคบลงเป็นการลำดับความสำคัญที่มีโครงสร้าง พบว่าน้ำหนักการบรรจุเกินเป็นเป้าหมายการปรับปรุงที่สำคัญที่กระทบกับต้นทุนและประสิทธิภาพ จึงถูกเลือกเป็นตัวแปรตอบสนองหลักสำหรับการตรวจสอบเชิงทดลองและการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการในงานวิจัย กระบวนการบรรจุอาหารสุกรเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการซึ่งบรรจุอาหารสัตว์

6.2.2 วัดกระบวนการ (M, Measurement Phase)

การเก็บข้อมูลน้ำหนักบรรจุของอาหารสุกร ขนาดถุงบรรจุละ 30 กิโลกรัม จำนวน 40 ถุง ที่ 5 นาทีต่อถุง เพื่อใช้เป็นข้อมูลก่อนพัฒนาปรับปรุง โดยวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ วัดด้วยค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการเทียบกับข้อกำหนดของการผลิต คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$Cpk = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (3)$$

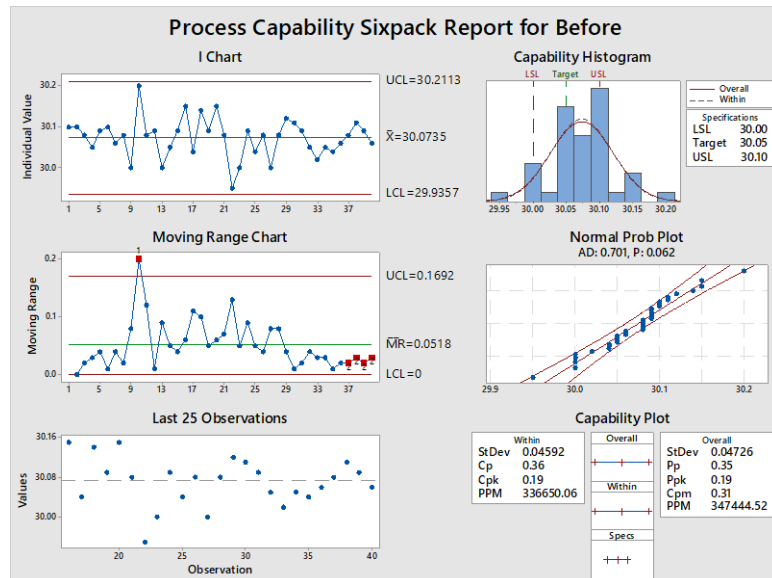
โดยที่ USL = ค่าขอบเขตบนที่ยอมรับได้ (Upper Specification Limit)

LSL = ค่าขอบเขตล่างที่ยอมรับได้ (Lower Specification Limit)

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

μ = ค่าเฉลี่ย (Mean)

ข้อมูลน้ำหนักบรรจุที่เก็บมาได้ นำมาวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab17 ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติก่อนการปรับปรุง

ในการประเมินค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ ดำเนินการภายใต้ข้อกำหนด 2 ด้าน ขอบเขตด้านล่าง และขอบเขตด้านบน (LSL & USL) ซึ่งเป็นการสนใจทั้งบรรจุ ขาดและเกิน ซึ่งนอกจากกระทบต่อค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการที่ประเมินได้โดยตรงแล้ว ยังกระทบต่อค่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ตรงข้อกำหนด และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าอีกด้วย จากรูปที่ 4 สรุปได้ว่าจากกราฟ I-MR Chart และกราฟการกระจายตัวแสดงถึงกระบวนการมีการกระจายตัวแบบปกติและอยู่ภายใต้สภาวะการควบคุม มีปัญหาด้านความสามารถในการบรรจุตามมาตรฐานของน้ำหนักบรรจุต่อถุง 30.00 ถึง 30.10 กิโลกรัมต่อถุง เป้าหมายที่ 30.05 กิโลกรัมต่อถุง ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักต่อถุงที่วัดได้ อยู่ที่ 30.07 กิโลกรัมต่อถุง และจากผลการคำนวณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ เท่ากับ 0.19 ต่ำมาก และจากฮิสโทแกรม พบว่ากระบวนการมีปัญหาในการบรรจุน้ำหนักเกินจากค่าเป้าหมาย และระดับซิกมา อยู่ที่ 2.07 ประมาณของเสีย 336,650 หน่วยต่อล้านการผลิต แสดงว่าเกิดความสูญเสียประเภทผลิตเกินความจำเป็นขึ้นในกระบวนการซึ่งและบรรจุ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในเรื่องการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าส่วนเกิน คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$CO_2e \text{ Emiss} = \text{ปริมาณของเสีย (kg)} \times EF \quad (4)$$

โดยที่ $\text{CO}_2\text{e Emiss}$ = การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า หน่วยเป็นกิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ปริมาณของเสีย (กิโลกรัม) = จำนวนบรรจุภัณฑ์ $\times$ ปริมาณน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ (กิโลกรัมต่อถุง) EF = ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยมวล (Emission Factor) ของอาหารสัตว์ จากฐานข้อมูล TGO April ปี 2026 (Thailand Greenhouse Gas Management Organization) สำหรับอาหารสุกรจะมีค่า EF เท่ากับ 0.8728 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อกิโลกรัม [21]

ผลจากการคำนวณพบว่าค่าเฉลี่ยน้ำหนักต่อถุง อยู่ที่ 30.07 กิโลกรัมต่อถุง ที่ปริมาณการผลิต 10,000 ตันต่อเดือน คิดเป็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าส่วนเกินในกระบวนการบรรจุอาหารสุกรอยู่ที่ 6.97 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเดือนหรือ 83.65 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี เมื่อคิดเป็นมูลค่าสูญเสียทางการเงินของธุรกิจเท่ากับ 1,245,923.25 บาทต่อปี

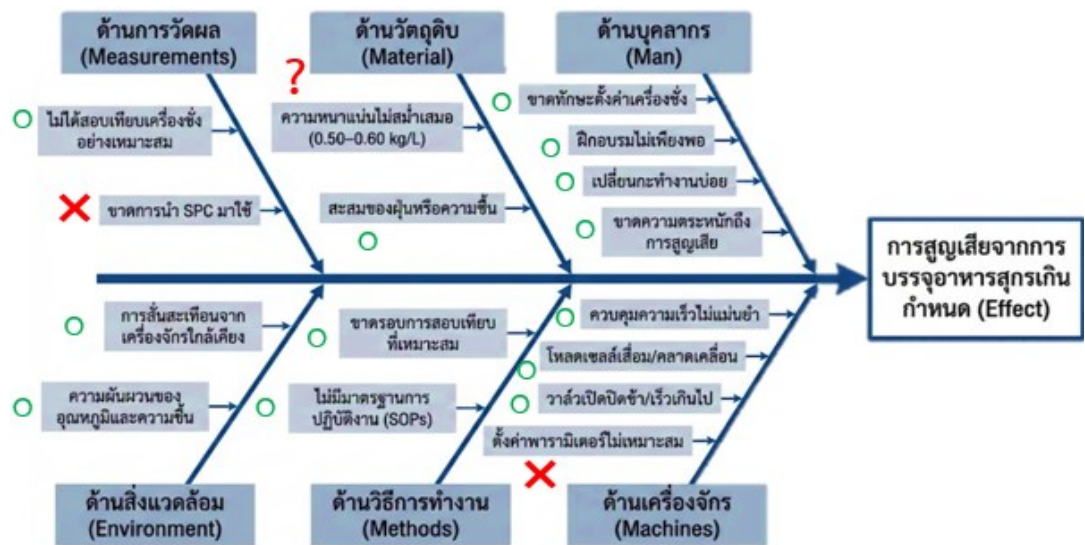
จากผลการศึกษาดังกล่าวนำมาตั้งเป้าหมายการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการบรรจุ โดยมีตัวชี้วัด ดังนี้ 1) ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการบรรจุ มากกว่าหรือเท่ากับ 1.33 2) ลดค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าส่วนเกินไม่น้อยกว่าร้อยละ 20

6.2.3 วิเคราะห์หาสาเหตุ (A, Analyze Phase)

จากขั้นตอนการวัดกระบวนการ สรุปได้ว่ามีความแปรปรวนของกระบวนการสูงและค่ากลางกระบวนการเบี่ยงออกจากเป้าหมาย เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ค่าความสามารถของกระบวนการต่ำ การปรับปรุงจำเป็นต้องลดความแปรปรวนของกระบวนการ การปรับตำแหน่งค่าเฉลี่ยให้อยู่ใกล้จุดกึ่งกลางสเปค และการแก้ปัญหาความแปรปรวนผิดปกติที่ปรากฏบนแผนภูมิควบคุมทางสถิติ ในงานวิจัยใช้วิธีวิเคราะห์หาสาเหตุโดยใช้เครื่องมือผังสาเหตุและผล ในการวิเคราะห์ 5M 1 E ซึ่งการระดมสมอง ประกอบด้วย 3 กลุ่มลักษณะบุคคล ได้แก่ กลุ่มบุคคลที่ปฏิบัติงานจริง กลุ่มผู้เชี่ยวชาญมีความรู้ในงาน หัวหน้างานหรือผู้นำการระดมสมอง โดยหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์จะเป็นไปตามรูปที่ 5

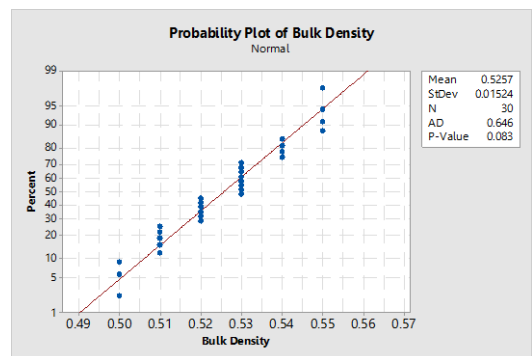
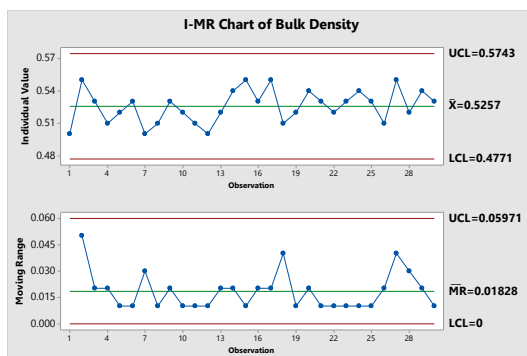
จากรูปที่ 5 สามารถสรุปสาเหตุที่ต้องพัฒนาปรับปรุงแก้ไข ทั้งหมด 3 ประเด็น ได้แก่

- 1) ด้านเครื่องจักร เรื่องการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมของเครื่องชั่งน้ำหนัก ที่อาจไม่สัมพันธ์กับอาหารสุกร
- 2) ด้านวัตถุดิบ เรื่องความไม่คงที่ของค่าความหนาแน่นรวมของอาหารสุกร (0.50 ถึง 0.60 กิโลกรัมต่อลิตร)
- 3) ด้านการวัด เรื่องการขาดระบบควบคุมกระบวนการชั่งและบรรจุด้วยหลักการทางสถิติ



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยผังสาเหตุและผล

จากสาเหตุด้านวัตถุดิบ เรื่องความไม่คงที่ของค่าความหนาแน่นรวม จึงทำการเก็บข้อมูลค่าความหนาแน่นอาหารสุกรมาตรวจสอบการกระจายตัว เพื่อทวนสอบสาเหตุอีกครั้ง โดยเก็บข้อมูลจำนวน 30 ตัวอย่าง มาวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิควบคุมทางสถิติ I-MR Chart และการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์ I-MR Chart การแจกแจงแบบปกติและค่าความหนาแน่นรวม

จากรูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์การแจกแจงปกติพบว่าค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าความหนาแน่นรวมมีการกระจายตัวแบบปกติ จาก I-MR Chart ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.53 กิโลกรัมต่อลิตร โดยที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.5199 ถึง 0.5313 กิโลกรัมต่อลิตร และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของการกระจายตัวอยู่ที่ 0.0121 ถึง 0.0205 และเมื่อดูจาก แผนภูมิควบคุม

ทางสถิติพบว่าอยู่ในช่วงการควบคุมที่ดี แสดงว่าค่าความหนาแน่นรวมค่อนข้างคงที่มีเสถียรภาพ และอยู่ในมาตรฐานที่กำหนด จึงไม่ใช่สาเหตุที่ต้องปรับปรุงแก้ไข สรุปได้ว่าขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุมีข้อที่ต้องนำไปพัฒนาปรับปรุง 2 ข้อ ได้แก่ 1) ด้านเครื่องจักร มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องซึ่งที่ไม่เหมาะสม และ 2) ด้านกระบวนการวัด ยังขาดระบบการติดตามและควบคุม น้ำหนักต่อถุงที่มีประสิทธิภาพ

6.2.4 พัฒนาปรับปรุง (I, Improvement Phase)

จากสาเหตุที่ต้องพัฒนาปรับปรุงแก้ไข ด้านการวัดจะใช้ระบบควบคุมกระบวนการซึ่งและบรรจุด้วย แผนภูมิควบคุมทางสถิติและวิเคราะห์ค่าความสามารถกระบวนการ ด้านเครื่องจักรหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องซึ่งบรรจุใหม่ที่เหมาะสมกับอาหารสุกร โดยวิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลทั่วไป และการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาค่าตัวแปร SPL และ SPL Int และความเร็วในการบรรจุที่เหมาะสมในกระบวนการ ซึ่งน้ำหนักและบรรจุอาหารสุกร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำและการเกิดน้ำหนักส่วนเกิน ซึ่งเดิมก่อนวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง ค่า SPL เท่ากับ 10, SPL Int เท่ากับ 5 และ Pack Speed เท่ากับ 20 โดยงานวิจัยได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียล 2^3 (3 ปัจจัย x 2 ระดับ) 3 ซ้ำ 24 รัน โดยมีค่าน้ำหนักเป็นตัวแปรตอบสนองแสดงระดับปัจจัยและแผนการทดลองดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลองการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k แบบ 2 ระดับ

ปัจจัย	ระดับปัจจัย		หน่วย
	ต่ำ (-)	สูง (+)	
SPL (Set Point Low)	1	10	กิโลกรัม
SPL Int (Interlock or Interval)	5	60	กรัม
ความเร็วในการบรรจุ (Pack Speed)	10	20	ถุงต่อนาที

ตารางที่ 6 แผนการทดลองการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k ที่ 2 ระดับ 3 ชั้น

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	SPL	SPL Int	Pack Speed
23	1	1	1	10	60	10
9	2	1	1	1	5	10
17	3	1	1	1	5	10
5	4	1	1	10	5	10
10	5	1	1	1	5	20
11	6	1	1	1	60	10
1	7	1	1	1	5	10
13	8	1	1	10	5	10
3	9	1	1	1	60	10
19	10	1	1	1	60	10
14	11	1	1	10	5	20
12	12	1	1	1	60	20
2	13	1	1	1	5	20
18	14	1	1	1	5	20
24	15	1	1	10	60	20
7	16	1	1	10	60	10
20	17	1	1	1	60	20
15	18	1	1	10	60	10
21	19	1	1	10	5	10
8	20	1	1	10	60	20
22	21	1	1	10	5	20
4	22	1	1	1	60	20
6	23	1	1	10	5	20
16	24	1	1	10	60	20

ผลการคำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab17 สรุปผลค่าทางสถิติการวิเคราะห์ความแปรปรวนและแบบจำลองความถดถอย การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 7

General Factorial Regression: Weight versus SPL, SPL Int, Pack Speed

Factor Information

Factor	Levels	Values
SPL	2	1, 10
SPL Int	2	5, 60
Pack Speed	2	10, 20

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0.009372	0.001339	67.22	0.000
Linear	3	0.000963	0.000321	16.12	0.000
SPL	1	0.000600	0.000600	30.13	0.000
SPL Int	1	0.000182	0.000182	9.11	0.008
Pack Speed	1	0.000182	0.000182	9.11	0.008
2-Way Interactions	3	0.003009	0.001003	50.36	0.000
SPL*SPL Int	1	0.002321	0.002321	116.52	0.000
SPL*Pack Speed	1	0.000600	0.000600	30.13	0.000
SPL Int*Pack Speed	1	0.000098	0.000098	4.43	0.052
3-Way Interactions	1	0.005400	0.005400	271.13	0.000
SPL*SPL Int*Pack Speed	1	0.005400	0.005400	271.13	0.000
Error	16	0.000319	0.000020		
Total	23	0.009690			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0044628	96.71%	95.27%	92.60%

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 7 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าปัจจัยหลัก ได้แก่ SPL, SPL Int และ Pack Speed มีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักบรรจุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย SPL เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงที่สุด ในส่วนของการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองอยู่ในระดับต่ำ ($S = 0.0044628$) จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมและสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและค่าน้ำหนักบรรจุได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้การออกแบบการทดลองที่กำหนดระดับปัจจัยอย่างเหมาะสมร่วมกับการทำซ้ำส่งผลให้แบบจำลองมีพลังของการทดสอบเพียงพอในการตรวจจับอิทธิพลของปัจจัย โดยพิจารณาจากค่า F-value ที่สูงและค่า P-value ที่ต่ำอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\text{Weight} = 30.0498 - 0.0050 \text{ SPL} - 0.00275 \text{ SPL Int} - 0.00275 \text{ Pack Speed} - 0.00983 \text{ SPL*SPL Int} - 0.0050 \text{ SPL*Pack Speed} + 0.0150 \text{ SPL*SPL Int*Pack Speed}$$

จากสมการเชิงเส้นแสดงค่า R-sq เท่ากับร้อยละ 96.71 แสดงว่าโมเดลสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้สูง ค่า R-sq (adj) เท่ากับร้อยละ 95.27 ค่า R-sq (pred) เท่ากับร้อยละ 92.60 แสดงว่าโมเดลมีความแม่นยำสูงและคาดการณ์ได้ดี งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทางสถิติต่อเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวของเครื่องจักรที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 8

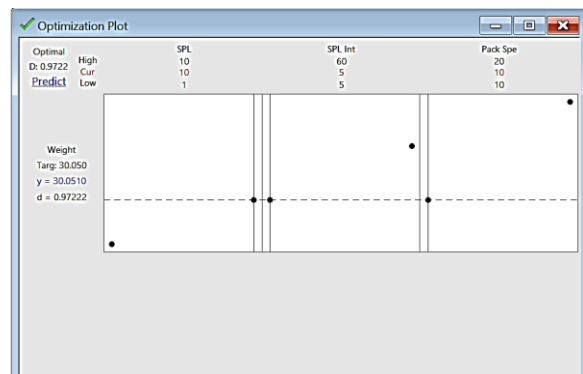
Response Optimization: Weight

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Weight	Target	30.018	30.05	30.086	1	1

Solution						
Solution	SPL	Pack	Weight	Composite		
	Int	Speed	Fit	Desirability		
1	10	5	10	30.051	0.972222	

Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
SPL	10					
SPL Int	5					
Pack Speed	10					

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Weight	30.0510	0.0026	(30.0455, 30.0565)	(30.0401, 30.0619)



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของการออกแบบการทดลอง

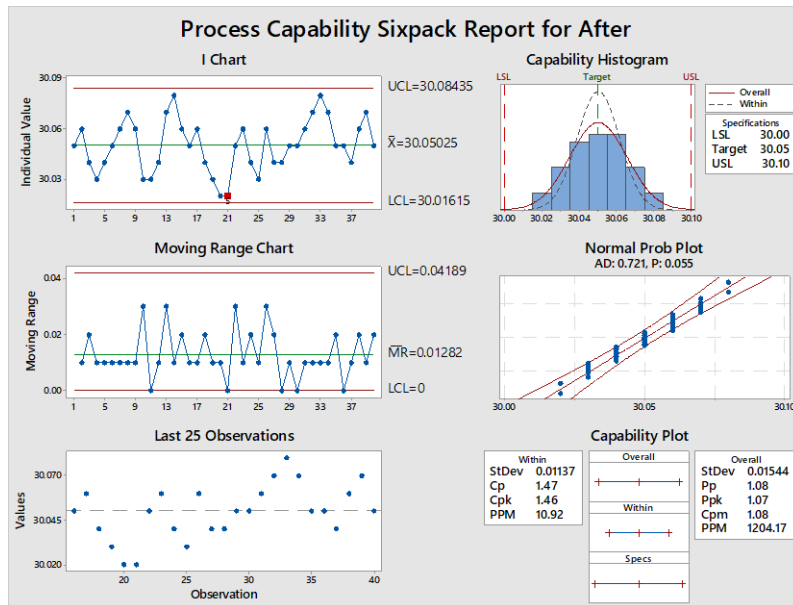
จากการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมน้ำหนักบรรจุให้ใกล้เคียงค่าเป้าหมาย 30.05 กิโลกรัม พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ SPL เท่ากับ 10, SPL Int เท่ากับ 5 และ Pack Speed เท่ากับ 10 ที่ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะมีน้ำหนักต่อถุงอยู่ระหว่าง 30.0455 ถึง 30.0565 กิโลกรัม สามารถนำไปปรับตั้งค่าเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักบรรจุ และเพิ่มความสามารถของกระบวนการให้สอดคล้องกับข้อกำหนดได้อย่างมีนัยสำคัญ

6.2.5 การควบคุมกระบวนการ (C, Control Phase)

- 1) จัดทำคู่มือมาตรฐานการทำงานเพื่อรักษาระดับคุณภาพ
- 2) ฝึกอบรมความรู้การควบคุมคุณภาพด้วยหลักการทางสถิติให้กับพนักงานที่เกี่ยวข้อง
- 3) จัดทำรายงานวิเคราะห์ผลรายเดือน แผนภูมิควบคุมทางสถิติและดัชนีความสามารถของกระบวนการ

หลังจากได้ดำเนินการพัฒนาปรับปรุงตามกรอบซิกซ์ ซิกมาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ได้เก็บข้อมูลของน้ำหนักบรรจุอาหารสุกร และวัดผลอีกครั้งด้วยค่าทางสถิติ ได้ผลตามรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 การทดสอบการแจกแจงปกติพบว่าข้อมูลที่เก็บจากกระบวนการผลิตมีการกระจายตัวแบบปกติและจาก I-MR Chart พบว่ากระบวนการอยู่ในการควบคุม และมีความสามารถในการผลิตในมาตรฐานน้ำหนักบรรจุต่อถุง 30.00 ถึง 30.10 (LSL-USL) กิโลกรัมต่อถุง ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการเท่ากับ 1.46 และระดับซิกมาอยู่ที่ 5.88 ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักต่อถุง 30.05 กิโลกรัมต่อถุงได้ค่าตามเป้าหมายที่กำหนด ดังนั้นสามารถลดน้ำหนักสูญเสียได้ 7,986.69 กิโลกรัมต่อเดือน ที่ปริมาณผลิตต่อเดือน 10,000 ตันต่อเดือน ได้ผลตอบแทน 103,826.94 บาทต่อเดือน หรือ 1,245,923.25 บาทต่อปี อีกทั้งลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าส่วนเกินได้ 6.97 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเดือน หรือ 83.65 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี สามารถสรุปเปรียบเทียบผลได้ดังตารางที่ 7



รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 7 สรุปผลการพัฒนาปรับปรุง

	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	เพิ่ม/ลด
น้ำหนักเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อถุง)	30.07	30.05	ลดลง 0.02
ระดับซิกมา (Sigma Level)	2.07	5.88	เพิ่มขึ้น 3.81
ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Cpk)	0.19	1.46	เพิ่มขึ้น 1.27
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่ลดได้	83.65 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี		

7. ประเมินความสอดคล้องกับ UN Sustainable Development Goals (SDGs)

นอกจากผลการดำเนินงานวิจัยด้านการเงินแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงความสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ขององค์การสหประชาชาติ (United Nation, UN) ประกอบด้วยเป้าหมายรวมทั้งหมด 17 เป้าหมาย ซึ่งได้รับการรับรองและประกาศใช้ในที่ประชุมสุดยอดแห่งสหประชาชาติ (UN Summit) เมื่อวันที่ 25 กันยายน 2558 โดยการประเมินจะใช้วิธีตารางความสัมพันธ์ (Table Mapping) ระหว่างงานวิจัยกับตัวชี้วัดต่าง ๆ ใน SDGs แสดงเป้าหมายและตัวชี้วัด และการมีส่วนร่วมของงานวิจัยอย่างเป็นระบบ ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการประเมินความสอดคล้องของงานวิจัยกับ UN SDGs

SDG Goal	เป้าหมายที่เกี่ยวข้อง (Target)	ตัวชี้วัด (Indicator)	การมีส่วนร่วม ของงานวิจัย
SDG 9: อุตสาหกรรม นวัตกรรมและ โครงสร้าง พื้นฐาน	9.4: พัฒนาหรือปรับปรุง โครงสร้างพื้นฐานและ อุตสาหกรรมให้มี ความยั่งยืน โดยเพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้ ทรัพยากร ส่งเสริมการ ใช้เทคโนโลยีสะอาด	9.4.1: การปล่อย คาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าต่อหน่วย มูลค่าเพิ่ม	การประยุกต์ใช้ ลินซิกซ์ ซิกมา ช่วยเพิ่ม เสถียรภาพ ความสามารถ ของกระบวนการ เพิ่มจาก 0.19 เป็น 1.46 เพิ่มระดับ ซิกมาจาก 2.07 เป็น 5.88
SDG 12: การผลิตและ การบริโภคที่ ยั่งยืน	12.3: ภายในปี 2030 ลด การสูญเสียอาหารและ ลดของเสียตลอดห่วงโซ่ อุปทาน 12.5: ลดการสร้างของ เสียอย่างมีนัยสำคัญผ่าน การป้องกัน รีไซเคิล และ การนำกลับมาใช้ใหม่	12.3.1: ดัชนีการ สูญเสียอาหาร 12.5.1: อัตราการ รีไซเคิลของประเทศ ปริมาณวัสดุที่ถูกนำ กลับมาใช้	- ลดการสูญเสียจาก การบรรจุเกิน ด้วย การปรับค่าพารามิเตอร์ เครื่องจักร - ประหยัดอาหารสัตว์ 7,986.69 กิโลกรัมต่อ เดือน - ลดการบรรจุเกินช่วยลด การสิ้นเปลืองวัตถุดิบ และบรรจุภัณฑ์ - เพิ่มความแม่นยำในการ บรรจุซึ่งสอดคล้องกับ แนวคิดเศรษฐกิจ หมุนเวียน
SDG 13: การรับมือการ เปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศ	13.2: บูรณาการ มาตรการด้าน การเปลี่ยนแปลงสภาพ ภูมิอากาศเข้าสู่ ยุทธศาสตร์และการ วางแผนระดับประเทศ	13.2.2: ปริมาณการ ปล่อยก๊าซเรือน กระจกรวมต่อปี	ลดการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่า 6.97 ตันคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าต่อเดือน จาก การลดการบรรจุเกิน

8. สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถพัฒนากรอบแนวคิดบูรณาการเชิงกลยุทธ์เพื่อความยั่งยืนตั้งแต่การวิเคราะห์พอร์ตโฟลิโอผลิตภัณฑ์ กรีนลีน ชิกซ์ ชิกมา การควบคุมกระบวนการทางสถิติ รวมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบค่อย ๆ ลงลึก ตั้งแต่ ต้นทุนรวมอาหารสุกรไปสู่ต้นทุนความสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต จนถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการบรรจุ ทำให้พบเป้าหมายกระบวนการบรรจุที่สามารถลดต้นทุนและสอดคล้องกับกลยุทธ์การเติบโตของธุรกิจ รวมทั้งคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน ในขณะที่งานวิจัยส่วนใหญ่ของลีน ชิกซ์ ชิกมาจะเป็นเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงกระบวนการเท่านั้น โดยไม่มีการเชื่อมโยงกับกลยุทธ์องค์กรหรือสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีข้อดีกว่าด้วยการบูรณาการกรอบแนวคิดใหม่ด้วยเมทริกซ์ บีซีจี เพื่อเลือกผลิตภัณฑ์เชิงกลยุทธ์ และวัดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมโดยการคำนวณปริมาณการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนได้ชัดเจนกว่าการมองเพียงมิติของผลิตภาพเพียงอย่างเดียว ผลของงานวิจัยนี้สามารถลดความสูญเสียจากการบรรจุอาหารสัตว์เกินซึ่งเป็นความสูญเสียแบบสิ้นในส่วนของที่เป็นการผลิตเกินกว่ามาตรฐานการบรรจุและที่ลูกค้าต้องการซึ่งถือเป็นความสูญเสียเปล่า เพราะทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรวัตถุดิบ และต้นทุนโดยไม่สร้างคุณค่าเพิ่ม และข้อบกพร่องที่เป็นการผลิตที่ไม่ตรงกับข้อกำหนด ทำให้เกิดการแก้ไขงานซึ่งเพิ่มทั้งต้นทุนและเวลาสูญเสีย งานวิจัยนี้ยังส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าส่วนเกิน 6.97 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเดือนหรือ 83.65 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ตอบสนองต่อ SDG 9 (อุตสาหกรรม นวัตกรรม และโครงสร้างพื้นฐาน) SDG 12 (การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน), และ SDG 13 (การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ) โดยตรง ผ่านการลดของเสีย การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ และการลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยสรุปภาพรวมทั้งหมดของงานวิจัยนี้เป็นการบูรณาการ 3 มิติ ได้แก่ 1) มิติกลยุทธ์องค์กร 2) มิติการปรับปรุงกระบวนการ 3) มิติความยั่งยืน เพื่อยกระดับทั้งประสิทธิภาพทางธุรกิจและสิ่งแวดล้อมอย่างสมดุล

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอ ISP–GLSS Framework สามารถนำไปศึกษาและประยุกต์ใช้กับธุรกิจการผลิตอื่นได้เพื่อส่งเสริมธุรกิจให้ยั่งยืน

9.2 สามารถพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม 4.0 ร่วมกับเครื่องมือทางสถิติให้สามารถติดตามและควบคุมความสามารถของกระบวนการได้แบบเรียลไทม์

9.3 ในด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้น ทั้งในด้านการใช้วัตถุดิบ พลังงาน การขนส่ง และการกำจัดของเสีย

References

- [1] Tripathi V, Chattopadhyaya S, Mukhopadhyay AK, Sharma S, Singh J, Pimenov DY, et al. An innovative agile model of smart lean–green approach for sustainability enhancement in Industry 4.0. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 2021;7:215. doi: 10.3390/joitmc7040215.
- [2] Irfan MTH, Rafiquzzaman M, Manik YA. Productivity improvement through lean tools in cement industry: A case study. *Heliyon* 2025;11:e42057. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42057.
- [3] Mittal A, Gupta P, Kumar V, Al Owad A, Mahlawat S, Singh S. The performance improvement analysis using Six Sigma DMAIC methodology: a case study on Indian manufacturing company. *Heliyon* 2023;9:e14625. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14625.
- [4] Shannon N, Trubetskaya A, Iqbal J, McDermott O. A total productive maintenance and reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilizing design for lean Six sigma. *Heliyon* 2023;9:e20516. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e20516.
- [5] Raveendran V, R GR, P T A, Bhasi S, C P R, Kinhikar RA. Moving towards process-based radiotherapy quality assurance using statistical process control. *Physica Medica* 2023;112:102651. doi: 10.1016/j.ejmp.2023.102651.
- [6] Costa JP, Lopes IS, Brito JP. Six Sigma application for quality improvement of the pin insertion process. *Procedia Manufacturing* 2019;38:1592–99. doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.126.
- [7] Widiwati ITB, Liman SD, Nurprinatin F. The implementation of Lean Six Sigma approach to minimize waste at a food manufacturing industry. *Journal of Engineering Research* 2025;13(2):611-26. doi: 10.1016/j.jer.2024.01.022.
- [8] Anh VNM, Anh HKN, Huy VN, Huy HG, Duc ML. Improve productivity and quality using Lean Six Sigma: a case study. *International Research Journal on Advanced Science Hub* 2023;5:71-83. doi: 10.47392/irjash.2023.016.
- [9] Shahriar MM, Parvez MS, Islam MA, Talapatra S. Implementation of 5S in a plastic bag manufacturing industry: a case study. *Cleaner Engineering and Technology* 2022;8:100488. doi: 10.1016/j.clet.2022.100488.

- [10] Hernandez AEB, Lu T, Beno T, Fredriksson C, Jawahir IS. Process sustainability evaluation for manufacturing of a component with the 6R application. *Procedia Manufacturing* 2019;33:546-53. doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.068.
- [11] Boumsisse I, Benhadou M, Haddout A. Optimizing green Lean Six Sigma using Industry 5.0 technologies. *Cleaner Waste Systems* 2025;10:100234. doi: 10.1016/j.clwas.2025.100234.
- [12] Egorova A, Pitenko K, Karminsky A. Analysis of the industry-specific characteristics of ESG components in company. *Procedia Computer Science* 2024;242:1206-17. doi: 10.1016/j.procs.2024.08.156.
- [13] Harris S, Tsalidis G, Corbera JB, Gallart JJE, Tegstedt F. Application of LCA and LCC in the early stages of wastewater treatment design: a multiple case study of brine effluents. *Journal of Cleaner Production* 2021;307:127298. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127298.
- [14] Ippolito NM, Amato A, Ferella F, Prisciandaro M, Beolchini F, Vegliò F, Innocenzi V. The application of life cycle assessment and life cycle costing for the treatment of microelectronic industry effluents. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2024;10:100854. doi: 10.1016/j.cscee.2024.100854.
- [15] Lindahl E, Dahlin JE, Bellgran M. A framework on circular production principles and a way to operationalise circularity in production industry. *Cleaner Production Letters* 2023;4:100038. doi: 10.1016/j.clpl.2023.100038.
- [16] Moshrefi S, Abdoli S, Kara S, Hauschild M. Product portfolio analysis towards operationalising science-based targets. *Procedia CIRP* 2020;90:377–82. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.127.
- [17] Bottani E, Montanari R, Volpi A, Tebaldi L, Di Maria G. Statistical process control of assembly lines in a manufacturing plant: process capability assessment. *Procedia Computer Science* 2021;180:1024-33. doi: 10.1016/j.procs.2021.01.353.
- [18] Costa T, Silva FJG, Ferreira LP. Improve the extrusion process in tire production using Six Sigma methodology. *Procedia Manufacturing* 2017;13:1104-11. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.171.
- [19] Babkin A, Shkarupeta E, Tashenova L, Malevskaia-Malevich E, Shchegoleva T. Framework for assessing the sustainability of ESG performance in industrial cluster ecosystems in a circular economy. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 2023;9(2):100071. doi: 10.1016/j.joitmc.2023.100071.

- [20] Wang G, Sadiq M, Bashir T, Jain V, Ali SA, Shabbir MS. The dynamic association between different strategies of renewable energy sources and sustainable economic growth under SDGs. *Energy Strategy Reviews* 2022;42:100886. doi: 10.1016/j.esr.2022.100886.
- [21] Thailand Greenhouse Gas Management Organization. Emission Factor (CFP) database [Internet]. 2026 [cited 2026 Apr 9]. Available from: <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=EN&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายวิรัช ชัยอัศวนันท์ นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาการจัดการทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: 67140094@dpu.ac.th



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภรัชชัย วรรัตน์ ผู้อำนวยการหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: vorarat@dpu.ac.th



ดร.ประยุทธ์ ฤทธิเดช อาจารย์ประจำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ที่อยู่ 110/1-4 ถ.ประชาชื่น เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 E-mail: prayuth.rit@dpu.ac.th

Article History:

Received: January 24, 2026

Revised: July 16, 2026

Accepted: August 11, 2026

**การพัฒนาแบบจำลองแบบเรียลไทม์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุม
เรืออัตโนมัติด้วยอัลกอริทึม Twin Delayed Deep Deterministic Policy
Gradient ในระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก**

**REAL-TIME MODEL DEVELOPMENT AND PERFORMANCE
ENHANCEMENT FOR AUTONOMOUS SHIP CONTROL USING THE
DEEP REINFORCEMENT LEARNING TWIN DELAYED DEEP
DETERMINISTIC POLICY GRADIENT ALGORITHM**

ธนาวุฒิ วิริยะพันธ์¹ สาลินี สมบูรณ์ไพศาล² ก้องเกียรติ ลีกนุช³ และ ทวีศักดิ์ มั่นชวนนท์⁴

^{1,3}อาจารย์, กลุ่มวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ศูนย์ฝึกพาณิชย์นาวี กรมเจ้าท่า
120 หมู่ 7 ซอยเทศบาล 6 ถนนสุขุมวิท อำเภอเมืองสมุทรปราการ สมุทรปราการ 10270,

¹t_wiriya@mmtc.ac.th, ³Lucknuch1959@gmail.com

²อาจารย์, กลุ่มวิชาการทั่วไป ศูนย์ฝึกพาณิชย์นาวี กรมเจ้าท่า
120 หมู่ 7 ซอยเทศบาล 6 ถนนสุขุมวิท อำเภอเมืองสมุทรปราการ สมุทรปราการ 10270,

s_somboo@mmtc.ac.th

⁴อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล-ซ่อมบำรุงอากาศยาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต 60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510,

⁴tmunchawanont@gmail.com

Thanawut Wiriyaphan¹, Salinee Somboompaisan², Kongkiat Luknuch³
and Thaweesak Munchawanont⁴

^{1,3}Lecturer, Marine Engineering Division, Merchant Marine Training Centre, Marine
Department of Thailand, 120 Moo 7, Soi Thetsaban 6, Sukhumvit Road, Bang Duan
Subdistrict, Mueang Samut Prakan District, Samut Prakan Province 10270, Thailand,

¹t_wiriya@mmtc.ac.th, ³Lucknuch1959@gmail.com

²Lecturer, General Education Division, Merchant Marine Training Centre, Marine
Department of Thailand, 120 Moo 7, Soi Thetsaban 6, Sukhumvit Road, Bang Duan
Subdistrict, Mueang Samut Prakan District, Samut Prakan Province 10270, Thailand,

²s_somboo@mmtc.ac.th

⁴Lecturer, Department of Mechanical Engineering-Aircraft Maintenance, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, 60 Romklao Road, Minburi District, Bangkok 10510, Thailand, tmunchawanont@gmail.com

บทคัดย่อ

ตามข้อกำหนดขององค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (IMO) ว่าด้วยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการมุ่งสู่ระบบการเดินเรืออัตโนมัติ การพัฒนาระบบควบคุมเรือที่บูรณาการประสิทธิภาพด้านการจัดการพลังงานและความปลอดภัยเข้าด้วยกันจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้นำเสนอกรอบการทำงานแบบเรียลไทม์บนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink สำหรับเรือ Ro-Pax M/S Nils Holgersson โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ครอบคลุมพลศาสตร์การเคลื่อนที่ระบบขับเคลื่อนแบบหลายเครื่องยนต์ และแรงต้านทานจากสภาพแวดล้อมโดยอาศัยข้อมูลจากเซ็นเซอร์จำลอง นอกจากนี้ยังได้เชื่อมต่อส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (API) เข้ากับฐานข้อมูลสภาพอากาศทางทะเลเพื่อดึงข้อมูลแบบเรียลไทม์มาใช้ในการฝึกฝนแบบจำลอง งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้ระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกร่วมกับอัลกอริทึม Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) เพื่อควบคุมการจัดการภาระกำลังของเครื่องจักรและการบังคับมุมหางเสือของเรือ โดยมีเป้าหมายหลักในการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชน ผลการจำลองพบว่า กรอบการทำงานที่นำเสนอสามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงรวมได้ 1.592% (เทียบเท่า 73.56 กิโลกรัมต่อเที่ยวเดินเรือ) ในเส้นทางจาก Yachthafen Hohe Düne เมืองรอสต็อก ไปยังท่าเรือ Marina Baltica 1 เมืองลิือบะ ประเทศเยอรมนี รวมระยะทาง 43 ไมล์ทะเล ซึ่งช่วยลดการปล่อยก๊าซ CO₂ ได้ถึง 226.71 กิโลกรัมต่อเที่ยว นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังสามารถเพิ่มอัตราความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชนได้ 1.75% เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (เพิ่มขึ้นจาก 93.71% เป็น 95.46%) โดยประเมินจากการรักษาระยะห่างที่ปลอดภัยและระยะเวลาเผื่อในการหักเลี้ยวหลบสิ่งกีดขวาง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า กรอบการทำงานนี้มีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ เนื่องจากสามารถบรรลุเป้าหมายทั้งด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพพลังงานได้พร้อมกัน ซึ่งจะเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาและต่อยอดระบบควบคุมเรืออัตโนมัติในอนาคต

คำสำคัญ: การเดินเรืออัตโนมัติ, การเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก, อัลกอริทึม TD3, การจัดการพลังงาน, การหลีกเลี่ยงการชน, ประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง

ABSTRACT

In accordance with the International Maritime Organization (IMO) regulations concerning greenhouse gas emission reduction and the transition toward autonomous shipping, developing a ship control system that integrates energy management efficiency with safety is imperative. This research proposes a real-time framework on the MATLAB/Simulink platform for the Ro-Pax vessel M/S Nils Holgersson. A comprehensive mathematical model was developed, encompassing ship dynamics, a multi-engine propulsion system, and environmental resistance utilizing simulated sensor data. Furthermore, an Application Programming Interface (API) was integrated with a marine meteorological database to retrieve real-time weather data for model training. This study applied Deep Reinforcement Learning (DRL) via the Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) algorithm to manage the main engines' load distribution and control the rudder angle. The primary objectives were to minimize fuel consumption and enhance collision avoidance success rates. Simulation results demonstrated that the proposed framework reduced total fuel consumption by 1.592% (equivalent to 73.56 kg per voyage) along a 43-nautical-mile route from Yachthafen Hohe Düne, Rostock, to Marina Baltica 1, Lübeck, Germany. This efficiency improvement consequently mitigated CO₂ emissions by 226.71 kg per voyage. Additionally, the system increased the collision avoidance success rate by 1.75% compared to conventional control systems (improving from 93.71% to 95.46%). This was evaluated based on the vessel's ability to maintain a safe distance and allocate adequate time margins for evasive maneuvers. These outcomes clearly demonstrate the proposed framework's high potential for commercial implementation, successfully achieving both safety and energy efficiency targets simultaneously. This research provides a significant foundation for the future development and advancement of autonomous marine vehicle control systems.

KEYWORDS: Autonomous Shipping, Deep Reinforcement Learning (DRL), TD3 Algorithm, Energy Management, Collision Avoidance, Fuel Efficiency

1. บทนำ

ภาคการขนส่งทางทะเล ซึ่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ในระดับโลกประมาณ 3% กำลังเผชิญกับช่วงเปลี่ยนผ่านที่สำคัญ [1] เพื่อตอบสนองต่อความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม องค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (IMO) ได้ปรับปรุงเป้าหมายเชิงกลยุทธ์โดยมุ่งลด

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการขนส่งระหว่างประเทศให้เป็นศูนย์ ภายในหรือใกล้เคียงปี พ.ศ. 2593 [2] เป้าหมายดังกล่าวได้กระตุ้นให้เกิดการให้ความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและการลดการบริโภคเชื้อเพลิง ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนการดำเนินงานและสภาพแวดล้อม [3] ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมการขนส่งทางทะเลกำลังเปลี่ยนผ่านสู่การนำระบบอัตโนมัติมาใช้งาน เพื่อตอบสนองต่อความต้องการด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพในยุคปัจจุบัน โดยเฉพาะเรือเดินทะเลขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Maritime Autonomous Surface Ships: MASS) ซึ่งได้รับการนิยามโดย IMO ว่าเป็นเรือพาณิชย์ที่สามารถปฏิบัติการได้โดยมีการควบคุมจากมนุษย์น้อยที่สุด และอาศัยการทำงานของเซ็นเซอร์ ซอฟต์แวร์ และระบบสื่อสาร เพื่อนำทางหลีกเลี่ยงการชน และปฏิบัติหน้าที่ต่าง ๆ ของเรือแทน ทั้งนี้ IMO ได้จำแนก MASS ออกเป็น 4 ระดับ ดังตารางที่ 1 [4]

ตารางที่ 1 กำหนดระดับการใช้งานเรืออัตโนมัติทางทะเล (MASS)

ระดับ	คำอธิบาย	ลูกเรือบนเรือ
1	เรือที่มีกระบวนการอัตโนมัติและมีระบบสนับสนุนการตัดสินใจ	มี
2	เรือที่ควบคุมจากระยะไกลโดยมีลูกเรืออยู่บนเรือ	มี
3	เรือที่ควบคุมจากระยะไกลโดยไม่มีลูกเรืออยู่บนเรือ	ไม่มี
4	เรือขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยสมบูรณ์	ไม่มี

ตลาดเรืออัตโนมัติมีแนวโน้มการเติบโตอย่างต่อเนื่อง [5] โดยได้รับการสนับสนุนจากความก้าวหน้าทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ซึ่งมีความสามารถในการแก้ปัญหาและพัฒนากลยุทธ์การควบคุมผ่านกระบวนการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก (Deep Reinforcement Learning หรือ DRL) เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเดินเรือทั้งในมิติของประสิทธิภาพและความปลอดภัย เช่น การจัดการพลังงานบนเรือ การวางแผนเส้นทางอัจฉริยะเพื่อลดการปล่อยมลพิษ และการหลีกเลี่ยงการชนเพื่อป้องกันความสูญเสียทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม [6] อย่างไรก็ตาม การพัฒนาระบบอัจฉริยะดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรอย่างมากและมีความเสี่ยงสูงหากทำการทดสอบภายใต้สภาวะจริง [7] ดังนั้น การใช้แบบจำลองขั้นสูงจึงเป็นทางเลือกที่จำเป็น ตัวอย่างเช่น การใช้แพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink ในการสร้างแบบจำลองแผนภาพบล็อก เพื่อออกแบบระบบหลายโดเมน ก่อนนำไปใช้งานจริงบนฮาร์ดแวร์ซึ่งช่วยประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังมีความแม่นยำสูง สามารถทดสอบและปรับปรุงระบบควบคุมภายในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงได้อย่างปลอดภัย [8] ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนารอบการทำงานแบบเรียลไทม์บนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink เพื่อสร้าง

แบบจำลองระบบควบคุมอัจฉริยะสำหรับเรือ Ro-Pax โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม DRL ขั้นสูงอย่าง Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient ในการควบคุมการกระจายภาระกำลังของเครื่องจักรหลักและการบังคับหางเสือ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อรักษาสมดุลระหว่างการลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงให้ได้สูงสุด ควบคู่ไปกับการเพิ่มอัตราความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชนเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบเดินเรืออัตโนมัติที่ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยด้านการหลีกเลี่ยงการชนของเรือได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แนวทางแรกสุดได้แก่ระบบอิงกฎเกณฑ์ เช่น ตัวควบคุมที่ใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ของ Ahmed et al [9] ซึ่งใช้เมตริกจุดเข้าใกล้ที่สุดในการประเมินความเสี่ยง แม้จะมีประสิทธิภาพในสถานการณ์ที่มีเรือหลายลำ แต่ระบบก็ยังแปรปรวนได้ง่ายจากสัญญาณรบกวน อีกทางเลือกหนึ่งคือแนวทางการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยอิงแบบจำลอง เช่น การควบคุมแบบทำนายผลตามแบบจำลอง ดังที่ศึกษาโดย Tengesdal et al [10] ซึ่งผนวกการประเมินความเสี่ยงจากความน่าจะเป็นและตัวกรองคาลมาน เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของสัญญาณรบกวนและสถานะ อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวต้องอาศัยการคำนวณที่แม่นยำของแบบจำลองต้นแบบและขึ้นอยู่กับคุณภาพของการประมาณค่าเส้นทางอย่างมาก ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานแบบเรียลไทม์ ต่อมาจึงเกิดการปรับใช้แนวทางที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่า นั่นคือการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถเรียนรู้นโยบายการควบคุมผ่านการโต้ตอบกับสภาพแวดล้อมได้ด้วยตนเอง [11] อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่สำคัญของระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกคือการทำให้มั่นใจว่าระบบจะเรียนรู้พฤติกรรมที่สอดคล้องกับอนุสัญญาระหว่างประเทศว่าด้วยข้อบังคับเพื่อป้องกันการชนกันทะเล (COLREGs) อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ต้องเผชิญหน้ากับเรือหลายลำ เพื่อแก้ไขปัญหา การออกแบบฟังก์ชันรางวัล จึงกลายเป็นกลยุทธ์หลัก งานวิจัยของ Wang et al [12] ได้แสดงให้เห็นถึงการใช้ฟังก์ชันรางวัลแบบลำดับขั้น ร่วมกับอัลกอริทึม Deep Q-Network (DQN) โดยกำหนดบทลงโทษหรือลดคะแนนความสามารถของระบบตามประเภทของการเผชิญหน้ากันของเรือ (เช่น การเผชิญหน้ากันโดยตรง หรือสถานการณ์ตัดหน้า) นอกจากนี้ Xie et al [13] ได้บูรณาการฟังก์ชันรางวัลที่คำนึงถึง COLREGs เข้ากับโมดูลการประมวลผลแบบขนาน CPU-GPU เพื่อปรับปรุงการทำงานของอัลกอริทึม Proximal Policy Optimization (PPO) จนบรรลุอัตราความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชนได้ถึง 98.6% ทว่าข้อด้อยของ PPO คือความเสี่ยงด้านข้อจำกัดในการสำรวจ ซึ่งอาจทำให้ระบบลู่เข้าสู่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ แทนที่จะเป็นค่าเหมาะสมที่สุดสมบูรณ์ นอกเหนือจาก PPO แล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม DRL รูปแบบอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น Pan et al [14] ได้ปรับปรุงอัลกอริทึม DQN โดยใช้ฟังก์ชันรางวัลที่ถ่วงน้ำหนักความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ แม้จะสามารถบรรลุอัตราการปฏิบัติตาม

COLREGs ได้ 94.3% และลดอุบัติเหตุลงได้ 30.8% แต่การที่อัลกอริทึม DQN ต้องใช้พื้นที่การกระทำแบบไม่ต่อเนื่อง ถือเป็นข้อจำกัดสำคัญที่อาจนำไปสู่ความไม่เสถียรในการควบคุมภายใต้สภาพแวดล้อมพลวัตแบบเรียลไทม์ ในทางตรงกันข้าม Zhang and Sun [15] พบว่าอัลกอริทึม Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) มีอัตราการลู่เข้าที่รวดเร็วกว่าและให้ความแม่นยำสูงกว่า DQN จากการใช้พื้นที่การกระทำแบบต่อเนื่อง ในการประเมินระบบหลักเลี้ยวการชนของเรืออัตโนมัติในแม่น้ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al [16] ที่แก้ไขปัญหาโดยใช้อัลกอริทึม Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (TD3) ซึ่งพัฒนาต่อยอดมาจาก DDPG ร่วมกับฟังก์ชันรางวัลแบบหลายองค์ประกอบ ทำให้มีอัตราความสำเร็จสูงถึง 99.23% อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดที่พึ่งพาเพียงแบบจำลองจลนศาสตร์อย่างง่าย โดยละเลยผลกระทบทางอุทกพลศาสตร์และยังขาดการบูรณาการพฤติกรรมของระบบขับเคลื่อนตลอดจนแรงภายนอกทางสิ่งแวดล้อม

ในมิติของการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เชื้อเพลิง Kim [3] ได้พัฒนาระบบการวางแผนเส้นทางเดินเรือเชิงกลยุทธ์ตามสภาพอากาศโดยใช้สเปกตรัมคลื่น 2 มิติผ่านกรอบงานการเขียนโปรแกรมแบบพลวัต ซึ่งช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงได้ 6% ต่อมา Kim et al [17] ได้นำเสนอวิธีการควบคุมความเร็วร่วมกับตัวควบคุม Wave Feed Forward (WFF) ที่ชดเชยแรงต้านของคลื่นล่วงหน้า ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้ถึง 15% เมื่อพิจารณาในกลุ่มของ DRL งานวิจัยของ Moradi et al [18] พบว่าอัลกอริทึม DDPG ประสบความสำเร็จในการลดเชื้อเพลิงได้สูงสุด (6.64%) ผ่านการปรับปรุงทิศทางและความเร็วจากข้อมูลจริง เมื่อเทียบกับ PPO (1.54%) และ DQN (1.07%) ผลลัพธ์นี้ได้รับการยืนยันโดย Latinopoulos et al [19] ที่ประยุกต์ใช้ DDPG สำหรับการวางแผนเส้นทางเชิงกลยุทธ์ตามสภาพอากาศ ซึ่งลดการใช้เชื้อเพลิงได้ดีกว่า DQN ถึง 4% และดีกว่าแบบจำลองพื้นฐาน 12% สิ่งเหล่านี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า DDPG มีความเหมาะสมสูงต่องานด้านการวางแผนเส้นทางนอกเหนือจากการวางแผนเส้นทาง งานวิจัยของ Alshareef and Alghanmi [20] ได้ประยุกต์ใช้ PPO ในการควบคุมเครื่องจักร ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานได้ 10% ผ่านการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM) และการจัดการระบบเชื้อเพลิงในสภาวะอากาศเลวร้าย ช่วยลดค่าดัชนี EEXI และ CII ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แม้ PPO จะแสดงศักยภาพที่ดี แต่ยังขาดการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการใช้อัลกอริทึมกลุ่ม DDPG ในการควบคุมเครื่องยนต์ นอกจากนี้ การพึ่งพาชุดข้อมูลในอดีตขนาดใหญ่ ทำให้เกิดข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลชุดใหม่ ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการปรับตัวของระบบ เมื่อต้องนำไปปฏิบัติการกับเรือลำอื่นหรือในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างออกไป แม้ว่าการใช้อัลกอริทึม DDPG จะมีแนวโน้มที่ดี แต่ก็มักประสบปัญหาความไม่เสถียรระหว่างการฝึกฝน ดังนั้น Fujimoto et al [21] จึงได้นำเสนออัลกอริทึม TD3 เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว โดยใช้เทคนิค Clipped Double Q-learning เพื่อป้องกันปัญหาการประมาณค่าสูงเกินจริง รวมถึงใช้วิธีการอัปเดตนโยบายแบบ

หน่วงเวลา และการเพิ่มสัญญาณรบกวนในนโยบายเป้าหมาย เพื่อเพิ่มความเสถียร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hadi et al [22] ที่ใช้ TD3 ควบคุมมุมหางเสือได้อย่างปลอดภัยและประหยัดพลังงานโดยไม่ต้องมีความรู้ล่วงหน้าเกี่ยวกับสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม แกนหลักที่ทำหยาที่สุดของ DRL คือการออกแบบฟังก์ชันรางวัล เนื่องจากการใช้วิธีถ่วงน้ำหนักรวมแบบง่ายระหว่างเป้าหมายและบทลงโทษ มักนำไปสู่พฤติกรรมที่ระมัดระวังเกินไปจนสิ้นเปลืองพลังงานโดยใช่เหตุ

แม้จะมีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่กล่าวมา แต่ยังคงมีช่องว่างทางการวิจัยที่สำคัญ เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาแยกส่วนการวิเคราะห์ระหว่างประสิทธิภาพการจัดการเชื้อเพลิงและความปลอดภัยในการเดินเรือออกจากกัน ส่งผลให้ระบบที่ประหยัดเชื้อเพลิงอาจเพิ่มความเสี่ยงในการชน หรือในทางกลับกัน ระบบนำทางอัจฉริยะที่ปลอดภัยอาจออกนอกเส้นทางจนสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเกินความจำเป็น นอกจากนี้ กรอบการทำงานแบบเรียลไทม์ที่บูรณาการตัวแปรทางสภาพแวดล้อมเชิงพลวัต (เช่น ความเร็วลม มุมตกกระทบของคลื่น อุณหภูมิ น้ำทะเล รวมถึงตำแหน่งและความเร็วของเรือเป้าหมาย) ยังไม่ได้รับการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ อีกทั้งอัลกอริทึม TD3 ยังไม่เคยถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาเชิงบูรณาการลักษณะนี้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนากรอบการทำงานสำหรับเรือ Ro-Pax M/S Nils Holgersson บนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม TD3 เพื่อสร้างระบบควบคุมการเดินเรือแบบต่อเนื่องที่ประสานรวมการตัดสินใจด้านความปลอดภัย การหลีกเลี่ยงการชน และประสิทธิภาพการจัดการพลังงานเข้าด้วยกัน ภายใต้สภาพแวดล้อมที่จำลองข้อมูลเซ็นเซอร์แบบเรียลไทม์ เพื่อแก้ไขปัญหาความท้าทายดังกล่าวอย่างบูรณาการ

3. วัตถุประสงค์

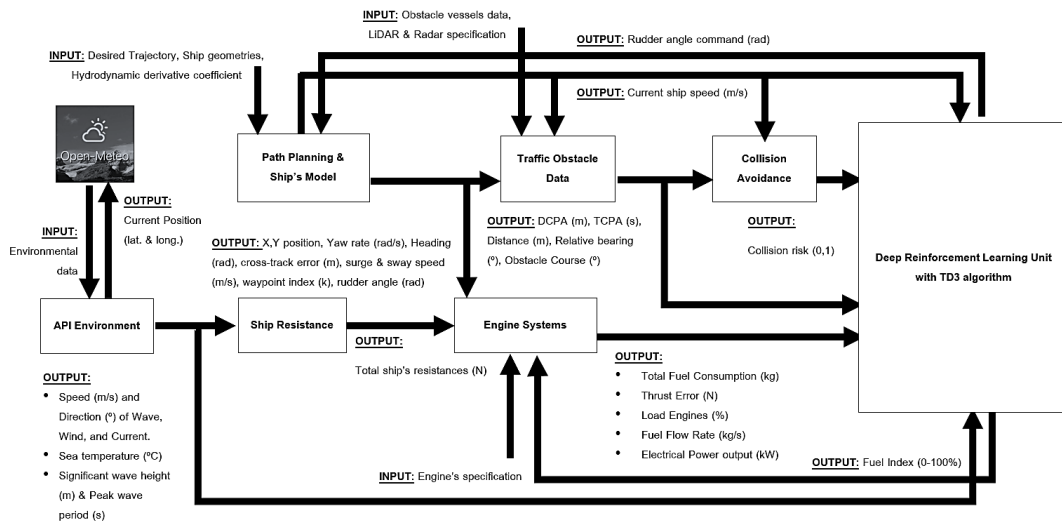
3.1 เพื่อพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือ M/S Nils Holgersson บนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink ให้มีความแม่นยำตามคุณลักษณะเฉพาะจากผู้ผลิต โดยบูรณาการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือ ระบบขับเคลื่อนแบบหลายเครื่องยนต์ ข้อมูลสภาพอากาศ และแรงต้านทานจากสภาพแวดล้อม เพื่อใช้เป็นระบบต้นแบบในการประเมินประสิทธิภาพก่อนการนำไปใช้งานจริง

3.2 เพื่อประยุกต์ใช้และประเมินประสิทธิภาพของระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกผ่านอัลกอริทึม TD3 ในการสร้างนโยบายการควบคุม ที่สามารถบริหารจัดการการทำงานของเครื่องจักรเพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ควบคู่ไปกับการบังคับทิศทางเพื่อหลีกเลี่ยงการชนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 การพัฒนาแบบจำลองเรือบนแพลตฟอร์ม Simulink

กรอบการทำงานของแบบจำลองเรือบน M/S Nils Holgersson ถูกพัฒนาขึ้นบนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink โดยประกอบด้วยโมดูลย่อยที่ทำงานประสานกันแบบเรียลไทม์ ดังแสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างหลักประกอบด้วย ส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ข้อมูลสภาพอากาศ หรือที่ดึงข้อมูลอุตุนิยมวิทยาตามจำนวนร่วมกับโมดูลพลศาสตร์การเคลื่อนที่และเส้นทาง เพื่อประเมินแรงต้านทานของเรือบ และส่งต่อไปยังระบบเครื่องจักร ในขณะเดียวกัน โมดูลข้อมูลอุปสรรคการจราจรจะคำนวณพารามิเตอร์ด้านความปลอดภัย เช่น ระยะห่างที่ใกล้ที่สุด และระยะเวลาที่เรือบจะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันที่สุด เพื่อส่งให้โมดูลการหลีกเลี่ยงการชนประเมินความเสี่ยง ข้อมูลสถานะทางพลวัตและสภาพแวดล้อมทั้งหมดนี้ จะถูกส่งเข้าสู่หน่วยการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกที่ขับเคลื่อนด้วยอัลกอริทึม TD3 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแทน ในการตัดสินใจสั่งการมุมหางเสือและดัชนีเชื้อเพลิงอย่างเหมาะสม นอกจากนี้ โครงสร้างของแบบจำลองยังถูกออกแบบมาให้สามารถสลับการทำงานเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างระบบ DRL และระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID) ได้ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน การเลือกระบบควบคุม PID มาเป็นเกณฑ์อ้างอิง เนื่องจากเป็นวิธีการควบคุมมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมพาณิชย์ในปัจจุบัน โดยตัวควบคุม PID จำนวน 3 ชุดได้รับการกำหนดค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้งาน เพื่อให้ได้สมรรถนะการตอบสนองที่ราบเรียบและมีค่าฟุงเกิน (Overshoot) ต่ำที่สุด พารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดค่าไว้ที่ $K_p = 0.5$, $K_i = 0.01$, $K_d = 0.1$ สำหรับการควบคุมความเร็ว และ $K_p = 1.2$, $K_i = 0.05$, $K_d = 0.2$ สำหรับการควบคุมหางเสือ ทั้งนี้ เพื่อให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพมีความเที่ยงตรงสูงสุดทั้งสองระบบจึงถูกทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุมตัวแปรอย่างเข้มงวด ได้แก่ การใช้เส้นทางเดินเรือบเดียวกัน ข้อมูลสภาพอากาศแบบเรียลไทม์จากส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ชุดเดียวกัน และการตั้งค่าเรือกัดขวางจำนวน 5 ลำในพิกัดตำแหน่งเริ่มต้นที่เหมือนกันทุกประการ



รูปที่ 1 แผนผังแบบจำลองเรืออัตโนมัติบนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink

4.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเรือและระบบขับเคลื่อน

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของเรือถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบ 3 แกนอิสระบนระนาบแนวนอน โดยอ้างอิงตามหลักการของ Maneuvering Modeling Group (MMG) [23] ซึ่งครอบคลุมพลศาสตร์ของแรงและความเร่งในแนวแกนพุ่งไปข้างหน้า (Surge, X), แกนเลื่อนด้านข้าง (Sway, Y) และแกนหมุนหันเห (Yaw, N) รวมถึงพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและมุมหักเหของเรือ นอกจากนี้ เรือต้นแบบใช้ระบบขับเคลื่อนแบบดีเซล-ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยเครื่องยนต์ MAN B&W M43 series จำนวน 5 เครื่อง โดยแต่ละเครื่องยนต์ได้รับการจำลองให้เป็นระบบย่อยที่เป็นอิสระจากกัน โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนดังนี้

1) ความดันประสิทธิภาพเฉลี่ยทางเบรค หรือ Brake Mean Effective Pressure (Pa) ดังสมการ

$$BMEP = \frac{2\pi T}{V_d} \quad (1)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดทางเบรค (Nm)

V_d คือ ปริมาตรกระบอกสูบรวม (m^3)

2) แรงบิดของใบจักร หรือ Propeller Load Torque (Nm) ดังสมการ

$$T_{load} = \rho \cdot K_Q \cdot n^2 \cdot D^5 \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

K_Q คือ สัมประสิทธิ์แรงบิดของใบจักร

n คือ ความเร็วรอบการหมุนของใบจักร (rev/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของใบจักร (m)

4.3 แบบจำลองแรงต้านทานของเรือ

แรงต้านทานรวมที่กระทำต่อตัวเรือในแบบจำลอง ประกอบด้วยผลรวมของแรงต้านทานจากสภาพแวดล้อมและแรงต้านทานทางอุทกพลศาสตร์ ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบหลัก ดังนี้

4.3.1 แรงต้านทานจากคลื่น (Wave Resistance)

ประเมินโดยใช้วิธีการของ Alexandersson [24] ดังสมการ

$$\overline{R_{AW}} = 2 \int_0^\infty R(\omega) \cdot S(\omega) d(\omega) \quad (3)$$

เมื่อ $R(\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนแรงต้านทานคลื่นเพิ่ม ($\text{N}/(\text{m}^2/\text{s})$)

$S(\omega)$ คือ สเปกตรัมพลังงานคลื่น (m^2/s)

ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่น (rad/s)

4.3.2 แรงต้านทานจากลม (Wind Resistance)

ประเมินจากผลรวมของแรงต้านที่เกิดจากลมสัมพัทธ์ (Relative Wind) และแรงต้านที่เกิดจากความเร็วของเรือเอง (Self-Induced Air Resistance) ตามวิธีการของ Park et al [25] ดังสมการ

$$R_{wind} = \frac{1}{2} \rho_A C_X(\psi_R) A_T \alpha V_R^2 - \frac{1}{2} \rho_A C_X(0) A_T \alpha V_S^2 \quad (4)$$

เมื่อ ρ_A คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

$C_X(\psi_R)$ คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านลมตามแนวแกน (ที่มุม ψ_R)

- A_T คือ พื้นที่ฉายด้านหน้าเหนือแนวน้ำ (m^2)
 A คือ ตัวแปรโปรไฟล์ลม
 V_R คือ ความเร็วลมสัมพัทธ์ (m/s)
 V_S คือ ความเร็วของเรือผ่านน้ำ (m/s)

4.3.3 แรงต้านทานตามยาวจากกระแสหน้า (Longitudinal Current Resistance)

คำนวณตามแนวลำตัวเรือในทิศทางเดินทางตามวิธีการของ Beji [26] ซึ่งประยุกต์ใช้พื้นฐานจากสมการ Morison ดังสมการ

$$R_C = \frac{1}{2} \rho A_{px} u_r \left| \left[1 + \frac{B}{A_{px}} \cdot \frac{\sin^2 \beta_x}{2g} u_r^2 \right] \sin^2 \beta_x + 0.072 \left(\frac{Re_x}{\sqrt{\nabla}} \right)^{-1/5} \cdot \frac{S_\omega}{A_{px}} \right| \quad (5)$$

- เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
 A_{px} คือ พื้นที่ฉายด้านหน้าของเรือ (m^2)
 u_r คือ ความเร็วสัมพัทธ์ตามยาว (m/s)
 B คือ ความกว้างของเรือ (m)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
 $\sin^2 \beta_x$ คือ ฟังก์ชันมุมรูปทรง
 Re_x คือ เลขเรย์โนลด์ตามยาว
 ∇ คือ ปริมาตรการแทนที่ของเรือ (m^3)
 S_ω คือ พื้นที่ผิวเปียกของเรือ (m^2)

4.3.4 แรงต้านทานในน้ำเรียบ (Calm Water Resistance)

คำนวณตามวิธีการของ Holtrop and Mennen ผ่านการประมวลผลด้วยโปรแกรม MAXSURF Resistance โดยในกรณีศึกษาของเรือลำนี้ มีค่าแรงต้านทานในน้ำเรียบอยู่ที่ประมาณ 2,150 กิโลนิวตัน ณ ความเร็วปฏิบัติการเฉลี่ยที่ 9.62 m/s (18.69 นอต)

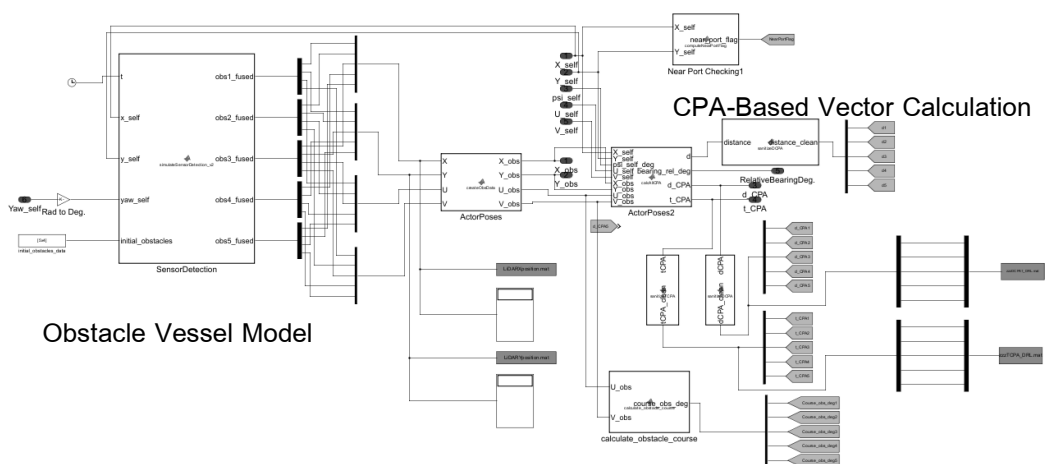
4.4 ระบบการรับรู้สภาพแวดล้อมและการประเมินความเสี่ยงในการชน

ระบบการรับรู้สภาพแวดล้อมของแบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นโดยบูรณาการข้อมูลจากเซ็นเซอร์จำลองเรดาร์และไลดาร์ เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับและติดตามพิกัดของเรือเป้าหมาย หรือสิ่งกีดขวางในบริเวณใกล้เคียง เนื่องจากข้อมูลดิบที่ได้รับจากเซ็นเซอร์มักมีความคลาดเคลื่อนและถูกรบกวน

ด้วยสัญญาณรบกวนสภาพแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ตัวกรองคาลมาน [27] ในการทำหน้าที่เป็นตัวประมาณค่าสถานะแบบเวียนซ้ำ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนและประมาณค่าพิกัดตำแหน่ง รวมถึงความเร็วของเรือเป้าหมายพลวัตให้มีความแม่นยำสูงสุด โดยข้อมูลสถานะของเรือเป้าหมายที่ผ่านการกรองแล้ว จะถูกนำมาคำนวณดัชนีความเสี่ยงในการชนโดยใช้หลักการประเมินจุดเข้าใกล้ที่สุด [28] ซึ่งพิจารณาจากพารามิเตอร์หลัก 2 ประการ ได้แก่ ระยะห่างที่ใกล้ที่สุด และระยะเวลาที่เรือจะเคลื่อนที่เข้าใกล้กันที่สุด โดยสามารถคำนวณได้จากพิกัดตำแหน่งและความเร็วสัมพัทธ์ และผลการคำนวณดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก เพื่อใช้เป็นตัวแปรสถานะในการประเมินระดับความเสี่ยงและกำหนดนโยบายการหลีกเลี่ยงพลวัตต่อไป

4.5 การจำลองสภาพแวดล้อมทางทะเลและสถานการณ์จราจรทางน้ำ

ระบบจำลองสภาพแวดล้อมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสร้างสภาวะการเดินเรือที่สมจริง โดยมีการนำเข้าตัวแปรทางอุทุนิยมวิทยาและสมุทรศาสตร์จำนวน 10 พารามิเตอร์หลัก อาทิ ความเร็วและทิศทางของคลื่น ลม กระแสน้ำ ตลอดจนอุณหภูมิของน้ำทะเล ข้อมูลเหล่านี้ถูกดึงมาใช้งานแบบเรียลไทม์ผ่านส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์จากฐานข้อมูล Open-Meteo Marine Weather [29] โดยอาศัยชุดคำสั่งภาษา Python ในการประมวลผลข้อมูลและส่งต่อไปยังแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink อย่างต่อเนื่อง นอกเหนือจากสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ แบบจำลองยังได้ออกแบบสถานการณ์จำลองการจราจรทางน้ำ เพื่อทดสอบขีดความสามารถของระบบโดยกำหนดให้มีเรือเป้าหมาย จำนวน 5 ลำ เคลื่อนที่ผ่านในพิกัดต่าง ๆ ตลอดเส้นทางเดินเรือ การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพและอัตราความสำเร็จในการตัดสินใจหลีกเลี่ยงการชนแบบพลวัตของระบบควบคุม



รูปที่ 2 แบบจำลองระบบการรับรู้และการหลีกเลี่ยงการชนกัน

4.6 การตั้งค่าและการฝึกฝนแบบจำลองด้วยอัลกอริทึม TD3

งานวิจัยนี้เลือกใช้อัลกอริทึม TD3 เป็นแกนหลักในการเรียนรู้ของตัวแทน เนื่องจากมีกลไกที่สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของอัลกอริทึม กลุ่ม DDPG ตั้งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ 1) การป้องกันปัญหาการประมาณค่าสูงเกินจริง ผ่านเทคนิค Clipped Double Q-Learning ซึ่งใช้โครงข่าย Critic สองชุดประเมินค่าและเลือกค่าที่ต่ำกว่ามาใช้งาน 2) การเพิ่มความเสถียรในการฝึกฝนผ่านการอัปเดตนโยบายแบบหน่วงเวลา โดยจะอัปเดตโครงข่าย Actor ทุก ๆ 2 รอบของการอัปเดตโครงข่าย Critic เพื่อให้มั่นใจว่า Critic มีความแม่นยำเพียงพอก่อนนำไปชี้แนะ Actor และ 3) การใช้เทคนิค Target Policy Smoothing โดยการเพิ่มสัญญาณรบกวน ลงในการกระทำเป้าหมาย เพื่อลดความผันผวนและทำให้พื้นที่การเรียนรู้มีความราบเรียบขึ้น

การฝึกฝนแบบจำลองดำเนินการผ่านชุดเครื่องมือ Reinforcement Learning Toolbox บนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink สถาปัตยกรรมการเรียนรู้ประกอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบสองส่วนหลัก ได้แก่ โครงข่าย Actor ทำหน้าที่สร้างนโยบายการควบคุม และโครงข่าย Twin Critics ทำหน้าที่ประเมินคุณภาพของนโยบายผ่านค่าผลตอบแทนที่คาดหวัง (Q-Value) ในการออกแบบตัวแปรสถานะและคำสั่ง แบบจำลองจะรับข้อมูลสถานะสิ่งแวดล้อม (Observation Space, $S \in R^{37}$) จำนวน 37 พารามิเตอร์ และส่งออกคำสั่งการกระทำแบบต่อเนื่อง (Continuous Action Space, $A \in R^6$) จำนวน 6 ชุดคำสั่ง ซึ่งประกอบด้วยคำสั่งบังคับมุมหางเสือ 1 คำสั่ง และคำสั่งดัชนีการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์หลักทั้ง 5 เครื่อง

ทิศทางการเรียนรู้ของแบบจำลอง TD3 ถูกกำหนดโดยฟังก์ชันรางวัลแบบหลายวัตถุประสงค์ซึ่งทำหน้าที่ประเมินและให้คะแนนการกระทำใน 4 มิติหลัก ได้แก่ มิติด้านประสิทธิภาพพลังงาน มิติด้านความปลอดภัย มิติด้านการนำทาง และมิติด้านความสำเร็จของภารกิจ นอกจากนี้ยังมีการกำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุดรอบการฝึกไว้ 2 กรณี ได้แก่ ความล้มเหลว ซึ่งระบบจะตัดจบและลงโทษเมื่อเรือเป้าหมายมีระยะห่างน้อยกว่า 10 เมตร (เกิดการชน) และ ความสำเร็จ เมื่อเรือสามารถเดินทางถึงจุดหมายปลายทางที่กำหนดได้อย่างปลอดภัย

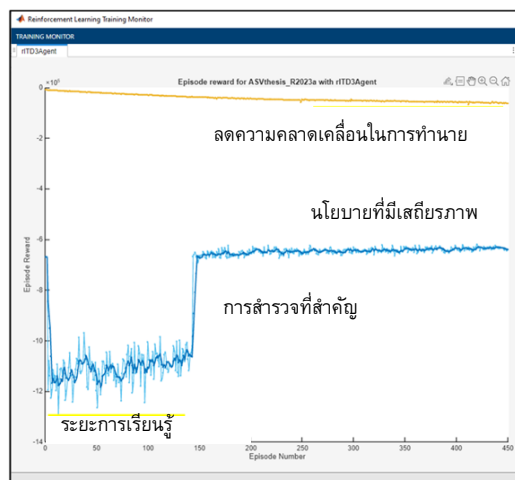
ในการทดลองนี้ การตั้งค่าจำนวนรอบการฝึกฝนสูงสุดถูกกำหนดไว้ที่ 450 รอบ โดยพิจารณาจากผลการประเมินเบื้องต้นซึ่งพบว่า พฤติกรรมการเรียนรู้ของแบบจำลองเริ่มแสดงการลู่เข้าและมีเสถียรภาพในระดับที่เพียงพอต่อการนำนโยบาย ไปใช้งานเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์หลักได้ อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีนั้นการขยายจำนวนรอบการฝึกฝนให้สูงขึ้น (เช่น 1,000 รอบ) มีแนวโน้มที่จะช่วยเปิดโอกาสให้ตัวแทนสามารถสำรวจและค้นพบจุดเหมาะสมที่สุดสมบูรณ์ได้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดด้านทรัพยากรฮาร์ดแวร์สำหรับการประมวลผลที่ไม่ได้ใช้หน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) เฉพาะทาง ทำให้การจำลองสภาพแวดล้อมต้องใช้ระยะเวลา

ค่อนข้างสูง ดังนั้น การกำหนดรอบการฝึกฝนที่ 450 รอบจึงเป็นจุดสมดุล ที่เหมาะสมที่สุดระหว่างขีดความสามารถในการเรียนรู้ของระบบและทรัพยากรเวลาที่ใช้ในการประมวลผล

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

5.1 พฤติกรรมการเรียนรู้และการลู่เข้าของตัวแทน TD3

จากข้อมูลการติดตามการฝึกฝนระบบด้วยอัลกอริทึม TD3 ตลอด 450 รอบ ดังรูปที่ 3 ผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการและพฤติกรรมการเรียนรู้เชิงลึกของตัวแทนอย่างชัดเจน ในช่วง 150 รอบแรกของการจำลอง ผลตอบแทนเฉลี่ยต่อรอบ มีความผันผวนค่อนข้างสูง โดยแกว่งตัวอยู่ที่ระดับประมาณ $-1,100,000$ ซึ่งเป็นพฤติกรรมปกติที่บังชี้ถึงช่วงการเริ่มต้นเรียนรู้และการสำรวจสภาพแวดล้อม ของตัวแทน ตามมาด้วยช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการสำรวจเชิงลึกที่สำคัญขณะที่ระบบกำลังพยายามก้าวข้ามจุดเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่หลังจากผ่านพ้นช่วงการสำรวจดังกล่าว ผลตอบแทนสะสมได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและลู่เข้าสู่สถานะที่มีเสถียรภาพ ที่ระดับผลตอบแทนประมาณ $-639,640$ อย่างต่อเนื่องจนถึงรอบที่ 450 ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่าตัวแทนสามารถกำหนดนโยบายการควบคุม ที่มีประสิทธิภาพได้อย่างสมบูรณ์ การลู่เข้านี้ยังมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมของค่าเมตริก Q0 (Q-value) ของแต่ละรอบการจำลอง ซึ่งปรับตัวลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 0 ไปสู่ระดับ $-61,196.03$ การลดลงของความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า Q-value ดังกล่าว เป็นตัวบ่งชี้สำคัญทางวิศวกรรมที่ยืนยันว่า โครงข่าย Critic สามารถเรียนรู้และทำนายผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้เกิดการพัฒนาขีดความสามารถในการเรียนรู้ตลอดกระบวนการฝึกฝน จนบรรลุวัตถุประสงค์หลักทั้งด้านการรักษาระยะปลอดภัยและการบริหารจัดการพลังงานได้อย่างบูรณาการ



รูปที่ 3 การติดตามการฝึกฝนของระบบกระบวนการเรียนรู้เชิงลึกโดยใช้อัลกอริทึม TD3

5.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ก่อนการนำแบบจำลองไปใช้ฝึกฝนระบบปัญญาประดิษฐ์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับคุณลักษณะทางวิศวกรรมของเครื่องจักรในเรือ M/S Nils Holgersson จากข้อมูลของผู้ผลิต ผลการจำลอง (ดังแสดงในตารางที่ 2) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อน ของพารามิเตอร์หลัก อาทิ รอบเครื่องยนต์สูงสุด รอบใบพัด แรงดันประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุด และช่วงกำลังขับเคลื่อน มีค่าอยู่ในระดับต่ำระหว่าง 0.77% ถึง 5.68% ซึ่งยืนยันให้เห็นถึงความแม่นยำและศักยภาพของแบบจำลองในการประยุกต์ใช้เป็นสภาพแวดล้อมเสมือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์	ข้อมูลจากผู้ผลิต	ผลลัพธ์จากแบบจำลอง	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	รอบเครื่องยนต์สูงสุด (รอบต่อนาที)	507	500	-1.38
2	รอบใบพัดสูงสุด (รอบต่อนาที)			
	- 8M43C	155	153.7	-0.84
	- 7M43C	155	153.8	-0.77
	- 6M43C	160	157.4	-1.62
3	แรงดันประสิทธิผลเฉลี่ยสูงสุด (บาร์)			
	- 8M43C		25.51	-4.63
	- 7M43C		25.23	-5.68
	- 6M43C	26.75	27.7	3.55
4	ช่วงกำลังขับเคลื่อนสูงสุด (กิโลวัตต์)			
	- 8M43C	7,200	7072	-1.78
	- 7M43C	6,300	6119	-2.87
	- 6M43C	2,880	2766	-3.95

5.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะโดยรวม

ผลการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวิธีการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกมีสมรรถนะเหนือกว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิมในหลายมิติ โดยเฉพาะด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ระบบสามารถลดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสะสมได้ 1.592%

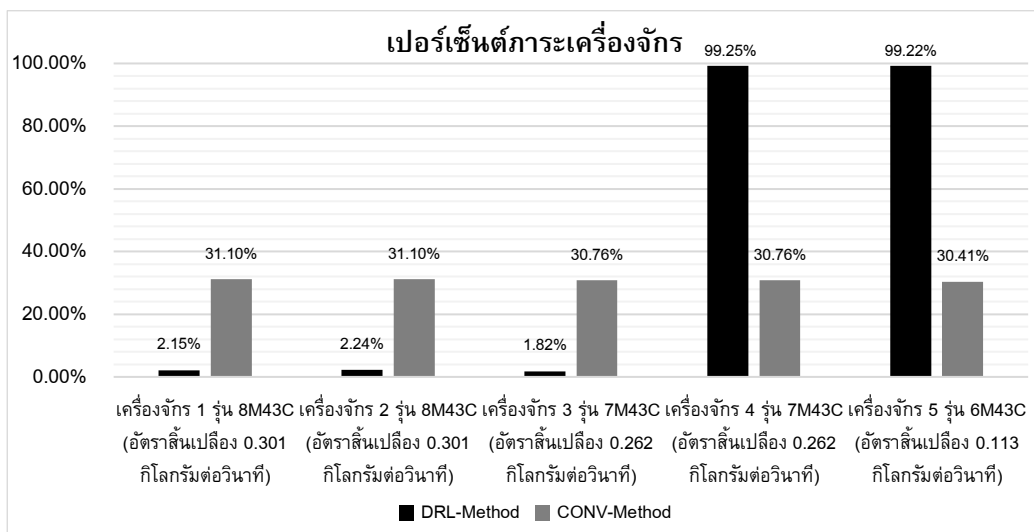
พร้อมทั้งยกระดับความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชนได้ 1.75% ยิ่งไปกว่านั้น ระบบ DRL ยังมีความสามารถในการควบคุมที่แม่นยำกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยสามารถลดความคลาดเคลื่อนของแรงขับเคลื่อนได้อย่างมีนัยสำคัญถึง 27.12% และสามารถรักษาความเร็วให้สอดคล้องกับค่าเป้าหมายได้ดีขึ้น 4.21% พร้อมทั้งลดแรงต้านทานของเรือสะสมได้ 0.01% อย่างไรก็ดี สมรรถนะที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวจำเป็นต้องแลกมาด้วยการเบี่ยงเบนจากเส้นทางที่กำหนด โดยระบบ DRL มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดจากเส้นทางเพิ่มขึ้น 19.64% และมีระยะเวลาเดินทางยาวนานขึ้นเล็กน้อยที่ 0.65% การค้นพบนี้สะท้อนให้เห็นถึงกลยุทธ์ของตัวแทนอัจฉริยะที่ให้น้ำหนักกับการค้นหาสมดุลระหว่างความปลอดภัยสูงสุดและการประหยัดเชื้อเพลิงเหนือกว่าการยึดมั่นในเส้นทางและเวลาเดิมอย่างเคร่งครัด ทั้งนี้ หากต้องการปรับปรุงสมรรถนะในอนาคต สามารถดำเนินการได้โดย 1) การปรับจูนน้ำหนักของฟังก์ชันรางวัล เช่น เพิ่มบทลงโทษสำหรับความล่าช้า เพิ่มรางวัลสำหรับการประหยัดเชื้อเพลิง 2) การขยายจำนวนรอบการฝึกฝนบนฮาร์ดแวร์ประมวลผลประสิทธิภาพสูง และ 3) การออกแบบฟังก์ชันรางวัลแบบลำดับขั้น เพื่อจัดลำดับความสำคัญของวัตถุประสงค์ให้ยืดหยุ่นยิ่งขึ้น

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์ของการประยุกต์ใช้ระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึก (DRL)

ลำดับ	ตัวชี้วัด	วิธี DRL	วิธีดั้งเดิม	การพัฒนา (%)
1	ปริมาณการใช้น้ำมันสะสม (กิโลกรัม)	4,546.39	4,619.95	1.592
2	ประสิทธิภาพความปลอดภัยในการหลีกเลี่ยงการชน (%)	95.46	93.71	1.75
3	ค่าเบี่ยงเบนความเร็วเรือ (เมตร/วินาที) จากความเร็วเรือที่กำหนด (9.62 เมตร/วินาที)	0.0091	0.0095	4.21
4	ระยะเวลาการเดินทางเรือ (นาที)	152.24	151.25	-0.65
5	ค่าความคลาดเคลื่อนแรงขับเคลื่อน (นิวตัน)	9.655	13.24	27.12
6	ค่าความคลาดเคลื่อนจากเส้นทางสูงสุด (เมตร)	883.72	738.61	-19.64
7	แรงต้านทานของเรือสะสม (กิโลนิวตัน)	23,045,790	23,048,158	0.010276

5.4 กลยุทธ์การจัดการพลังงานและการะเครื่องยนต์

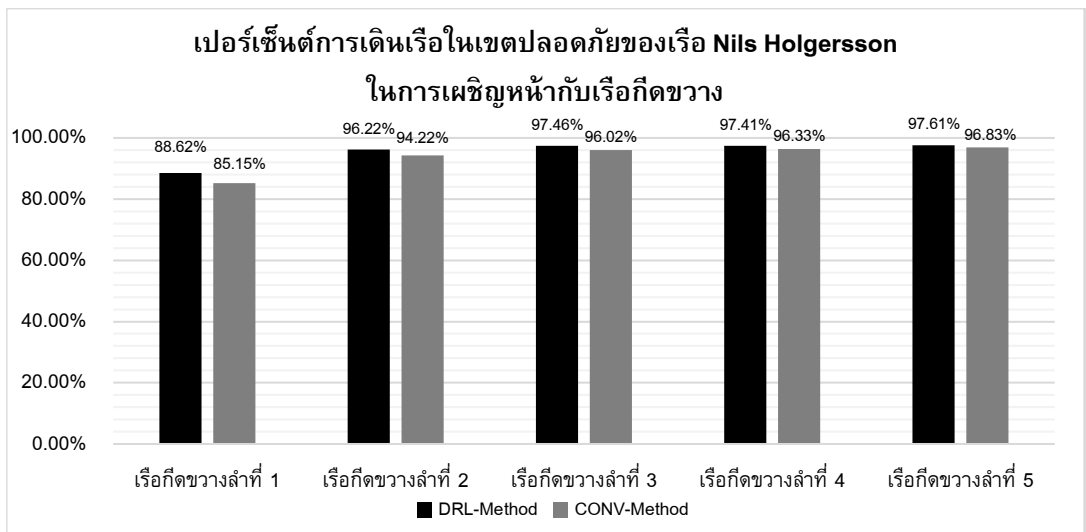
กลยุทธ์สำคัญที่ขับเคลื่อนความสำเร็จด้านพลังงานของระบบ DRL คือความสามารถในการหาค่าเหมาะสมของการกระจายภาระ ให้กับเครื่องยนต์ทั้ง 5 เครื่องที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4 พบว่าระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมีแนวโน้มที่จะกระจายภาระงานให้เครื่องยนต์ทั้งห้าเครื่องอย่างเท่าเทียมกันที่ระดับประมาณ 30% ซึ่งตกอยู่ในช่วงที่เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพต่ำ ในทางตรงกันข้าม ระบบ DRL ได้เรียนรู้กลยุทธ์การจัดการที่เหมาะสมกว่าแบบพอสมควร โดยตัดสินใจปิดการทำงานของเครื่องยนต์ 3 เครื่อง และสั่งการให้เครื่องยนต์ 2 เครื่องที่เหลือทำงานด้วยภาระระดับสูง (ประมาณ 99.2%) ซึ่งเป็นจุดที่เข้าใกล้บริเวณที่เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงสุด (ค่าความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด) แม้ว่าการเดินเครื่องที่ 99.2% จะมีประสิทธิภาพด้อยกว่าจุดเหมาะสมที่สุดสมบูรณ์ (ที่ระดับ 85%) เล็กน้อย แต่ผลลัพธ์โดยรวมยังคงเหนือกว่าการเดินเครื่องหลายตัวที่ภาระต่ำอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4 เปอร์เซนต์ภาระของเครื่องจักร โดยวิธีการควบคุมแต่ละแบบ

5.5 สมรรถนะด้านความปลอดภัยและการหลีกเลี่ยงการชน

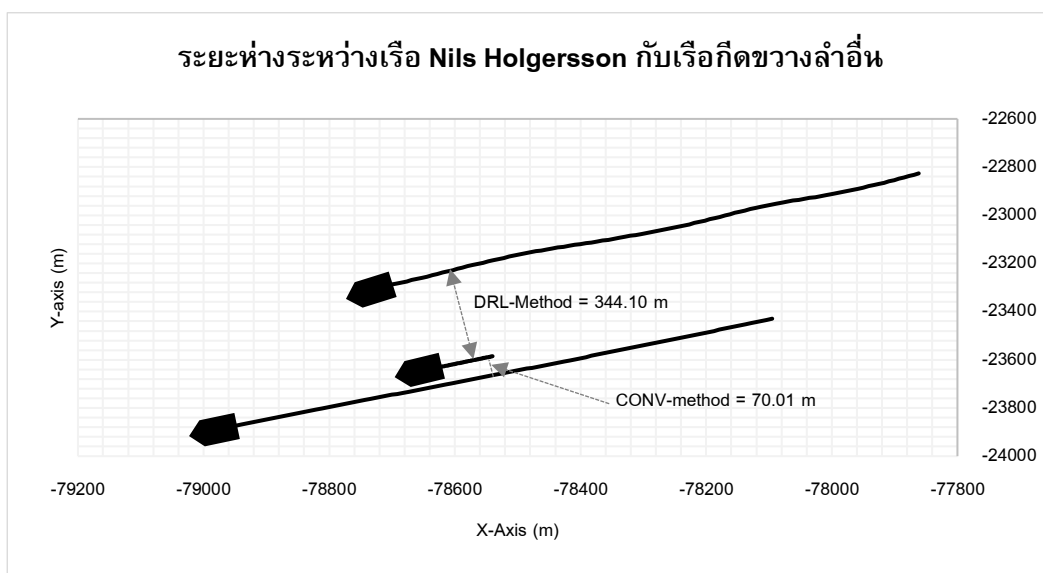
การประเมินสมรรถนะด้านความปลอดภัย พิจารณาจากสัดส่วนเวลาที่เรือสามารถรักษาสถานะอยู่นอกรัศมีเขตอันตราย โดยรัศมีดังกล่าวคำนวณจากความเร็วเรือแบบพลวัตผนวกกับระยะเวลาเพื่อสำหรับการหักเลี้ยวหลบสิ่งกีดขวางซึ่งกำหนดไว้ที่ 60 วินาที ตัวอย่างเช่น หากเรือมีความเร็ว ณ ปัจจุบัน 9.62 เมตรต่อวินาที รัศมีเขตอันตรายจะถูกประเมินไว้ที่ 577.2 เมตร



รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์การเดินเรือในเขตปลอดภัย โดยวิธีการควบคุมแต่ละแบบ

ผลลัพธ์การจำลองดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ระบบ DRL มีสมรรถนะด้านความปลอดภัยสูงกว่า โดยสามารถประคองเรือให้อยู่ในเขตปลอดภัยได้เฉลี่ย 95.46% ตลอดการเผชิญหน้าในทุกสถานการณ์ ในขณะที่วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมทำได้เพียง 93.71% ซึ่งหมายถึงระบบ DRL เพิ่มความปลอดภัยได้ 1.75%

ความแตกต่างนี้เกิดจากระเบียบวิธีคิดของระบบ ดังแสดงพฤติกรรมการรักษาระยะห่างในรูปที่ 6 วิธีการดั้งเดิมอาศัยกฎเกณฑ์ตายตัวแบบตอบสนอง ซึ่งจะเริ่มดำเนินการหักเลี้ยวก็ต่อเมื่อเข้าใกล้เกณฑ์ความเสี่ยง ส่งผลให้เกิดการเผชิญหน้าในระยะกระชั้นชิดเพียง 70.01 เมตร ซึ่งไม่พึงประสงค์ในการปฏิบัติงานจริง ในขณะที่ระบบ DRL ซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยฟังก์ชันรางวัลทางคณิตศาสตร์ จะประเมินและจดจำผลลัพธ์จากการกระทำเพื่อเพิ่มผลตอบแทนสะสม ให้ได้สูงสุด ระบบจึงแสดงพฤติกรรมเชิงรุก โดยเรียนรู้ที่จะริเริ่มการหลบหลีกอย่างราบรื่นตั้งแต่ระยะไกล ส่งผลให้สามารถรักษาระยะห่างขั้นต่ำได้กว้างขวางถึง 344.10 เมตร ซึ่งยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในการเดินเรือได้อย่างเด่นชัด



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบระยะห่างของเรือ โดยวิธีการควบคุมแต่ละแบบ

6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของกรอบการทำงานบนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink สำหรับประเมินระบบควบคุมการเดินเรืออัตโนมัติ M/S Nils Holgersson โดยประยุกต์ใช้ระบบการเรียนรู้เสริมกำลังเชิงลึกผ่านอัลกอริทึม TD3 ผลการวิจัยพิสูจน์ให้เห็นว่าระบบสามารถจัดการกับปัญหาแบบพหุวัตถุประสงค์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้ 1.592% (เทียบเท่า 73.56 กิโลกรัมต่อเที่ยวเดินเรือ) ควบคู่ไปกับการยกระดับความสำเร็จในการหลีกเลี่ยงการชนเพิ่มขึ้น 1.75% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม การค้นพบนี้สนับสนุนสมมติฐานที่ว่า ระบบปัญญาประดิษฐ์มีศักยภาพเหนือกว่าระบบที่อิงกฎเกณฑ์แบบดั้งเดิม เนื่องจากตัวแทนอัจฉริยะสามารถตัดสินใจสั่งการมุ่งหาทางเลือกและดัชนีการใช้เชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ได้อย่างยืดหยุ่น โดยเรียนรู้ที่จะยอมรับการเบี่ยงเบนจากเส้นทางเดิมในระดับที่ปลอดภัย เพื่อแลกกับผลลัพธ์ด้านความปลอดภัยและการประหยัดพลังงานที่คุ้มค่าสูงสุด ความสำเร็จนี้ยังเป็นการยืนยันว่า การจำลองสถานการณ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง เป็นแนวทางที่มีประสิทธิผลและคุ้มค่าในการออกแบบ ทดสอบ และลดความเสี่ยงของระบบควบคุมเรืออัตโนมัติในอนาคต

ในมิติด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน การลดปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลสำหรับเรือเดินทะเลจำนวน 73.56 กิโลกรัมต่อเที่ยวนั้น นำไปสู่การลดการปล่อยมลพิษทางอากาศได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยอ้างอิงจากค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษมาตรฐานที่ 3.082 ตันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อเชื้อเพลิง 1 ตัน [30] พบว่ากรอบการทำงานนี้สามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO_2)

ได้ถึง 226.71 กิโลกรัมต่อเที่ยวเดินเรือ ผลลัพธ์ดังกล่าวนอกจากจะสร้างความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจจากการลดต้นทุนเชื้อเพลิงแล้ว ยังตอบสนองต่อนโยบายการลดก๊าซเรือนกระจกขององค์การทางทะเลระหว่างประเทศ (IMO) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมสอดคล้องกับวิสัยทัศน์และแนวทางปฏิบัติด้านความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการเดินทางเรือสมัยใหม่อย่างแท้จริง

7. ข้อจำกัดของงานวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการนำเสนอและตรวจสอบความถูกต้องของกรอบการทำงานบนแพลตฟอร์ม MATLAB/Simulink สำหรับการควบคุมเรืออัตโนมัติแบบบูรณาการด้วยอัลกอริทึม TD3 ผลการวิจัยยืนยันว่าระบบสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพพลังงานพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการที่สามารถนำไปพัฒนาและต่อยอดได้ในอนาคต ดังนี้

1) ด้านความละเอียดของแบบจำลองพลศาสตร์: แบบจำลองการเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นบนพื้นฐาน 3 แกนอิสระ (3-DOF) ในระนาบแนวนอน ซึ่งละเว้นผลกระทบของการโคลง (Roll) และการยกกระดืบหัวเรือ (Pitch) ที่อาจมีนัยสำคัญในสภาวะคลื่นลมแรง นอกจากนี้แบบจำลองเครื่องยนต์ยังอ้างอิงข้อมูลจากเซ็นเซอร์สมรรถนะของผู้ผลิต ซึ่งอาจไม่สะท้อนถึงการเสื่อมสภาพที่แท้จริงตามอายุการใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรขยายขีดความสามารถของแบบจำลองเป็น 6 แกนอิสระ (6-DOF) และประเมินผลร่วมกับข้อมูลสมรรถนะเครื่องยนต์ที่ได้จากการปฏิบัติงานจริง

2) ด้านความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมและการจราจร: การจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้จำกัดจำนวนเรือเป้าหมายไว้ที่ 5 ลำ ซึ่งอาจยังไม่เพียงพอต่อการจำลองสถานการณ์การจราจรที่หนาแน่น บริเวณช่องแคบหรือร่องน้ำเข้าท่าเรือ แนวทางการพัฒนาในระยะต่อไปคือการเพิ่มจำนวนเรืออุปสรรคและพัฒนาระบบจำลองการจราจรทางน้ำให้มีความพลวัตและซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

3) ด้านความสามารถในการประยุกต์ใช้กับข้อมูลใหม่และทรัพยากรการประมวลผล: ระบบถูกฝึกฝนและประเมินผลบนเส้นทางทดสอบเฉพาะระยะทาง 43 ไมล์ทะเล ซึ่งอาจจำกัดความสามารถในการนำไปปรับใช้กับเส้นทางเดินเรืออื่นๆ นอกจากนี้ การฝึกฝนยังมีข้อจำกัดด้านทรัพยากรการคำนวณเนื่องจากไม่ได้ใช้หน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) เฉพาะทาง ทำให้ระบบมีความเสี่ยงที่จะเข้าสู่ค่าเหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ การวิจัยในอนาคตจึงควรขยายขอบเขตการฝึกฝนบนฮาร์ดแวร์ประสิทธิภาพสูง ทดสอบกับเส้นทางที่หลากหลาย รวมถึงศึกษาเทคนิคการเรียนรู้แบบถ่ายทอด หรือ Transfer Learning เพื่อนำแบบจำลองไปปรับใช้กับเรือประเภทอื่น

4) ด้านความสมจริงของสถานการณ์ปฏิบัติงาน: แบบจำลองปัจจุบันยังไม่ครอบคลุมถึงอัลกอริทึมสำหรับการนำเรือเทียบท่า ซึ่งส่งผลต่อความสมบูรณ์ของโปรไฟล์การดำเนินงานจริง ตลอดจนยังไม่มีกำหนดข้อจำกัดด้านกรอบเวลาการเดินทางที่เข้มงวด ซึ่งเป็น

ตัวแปรสำคัญในอุตสาหกรรมพาณิชย์นาวี การพัฒนาระบบย่อยสำหรับการเทียบท่าและการเพิ่มเงื่อนไขด้านเวลาเข้าเป็นหนึ่งในตัวแปรของฟังก์ชันรางวัล จึงเป็นก้าวสำคัญที่จะทำให้ระบบสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

References

- [1] Sinay. How much does the shipping industry contribute to global CO2 emissions? [Internet]. 2023 [cited 2025 Sep 1]. Available from: <https://sinay.ai/en/how-much-does-the-shipping-industry-contribute-to-global-co2-emissions/>.
- [2] International Maritime Organization. IMO's work to cut GHG emissions from ships [Internet]. 2023 [cited 2025 Sep 1]. Available from: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/cutting-ghg-emissions.aspx>.
- [3] Kim SW. The development of route decision-making method based on tailor-made forecast 2d wave spectra due to the operation profile of the vessel. Ocean Engineering 2020;197:106907. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106907.
- [4] McKie R. Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) and SAR [Internet]. International Maritime Rescue Federation; 2023 [cited 2025 Sep 1]. Available from: <https://www.international-maritime-rescue.org/news/maritime-autonomous-surface-ships-mass-and-sar# ftn1>.
- [5] Fortune Business Insights. Autonomous ships market size, share, industry analysis & Russia-Ukraine war analysis, by autonomy, by solution, by ship type, by end user, and regional forecast, 2026-2034 [Internet]. Pune: Fortune Business Insights; 2025 [cited 2025 Oct 9]. Report No.: FBI101797. Available from: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/autonomous-ship-market-101797>.
- [6] Xiao G, Pan L, Lai F. Application, opportunities, and challenges of digital technologies in the decarbonizing shipping industry: a bibliometric analysis. Frontiers in Marine Science 2025;12:1523267. doi: 10.3389/fmars.2025.1523267.
- [7] Heo S, Kang M, Choi J, Yun S, Park J. A preliminary study for development of digital twin ship technology using autonomous surface vehicle. In: 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR); 2023 Jun 25-28; Honolulu, HI, USA. Piscataway (NJ): IEEE; 2023. p. 255-60. doi: 10.1109/UR57808.2023.10202274.

- [8] MathWorks. Simulink: simulation and model-based design [Internet]. Natick, MA: The MathWorks, Inc.; c1994-2026 [cited 2026 Jul 21]. Available from: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.
- [9] Ahmed YA, Hannan MA, Oraby MY, Maimun A. COLREGs compliant fuzzy-based collision avoidance system for multiple ship encounters. *Journal of Marine Science and Engineering* 2021;9(8):790. doi: 10.3390/jmse9080790.
- [10] Tengesdal T, Brekke EF, Johansen TA. On collision risk assessment for autonomous ships using scenario-based MPC. *IFAC-PapersOnLine* 2020;53(2):14509-16. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1454.
- [11] Sutton RS, Barto AG. Reinforcement learning: An introduction. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press; 2018.
- [12] Wang W, Huang L, Liu K, Wu X, Wang J. A COLREGs-compliant collision avoidance decision approach based on deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering* 2022;10(7):944. doi: 10.3390/jmse10070944.
- [13] Xie W, Gang L, Zhang M, Liu T, Lan Z. Optimizing multi-vessel collision avoidance decision making for autonomous surface vessels: a COLREGs-compliant deep reinforcement learning approach. *Journal of Marine Science and Engineering* 2024;12(3):372. doi: 10.3390/jmse12030372.
- [14] Pan R, Zhang W, Wang S, Kang S. Deep reinforcement learning model for Multi-Ship collision avoidance decision making design implementation and performance analysis. *Scientific Reports* 2025;15:21250. doi: 10.1038/s41598-025-05636-3.
- [15] Zhang X, Sun T. Deep reinforcement learning for collision avoidance of autonomous ships in inland rivers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport* 2025;178(5):343-58. doi: 10.1680/jtran.24.00068.
- [16] Liu Z, Zhou Z, Zhang M, Liu J. A twin delayed deep deterministic policy gradient method for collision avoidance of autonomous ships. *Journal of Transport Information and Safety* 2022;40(3):60-74. doi: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.03.007.
- [17] Kim S, Yun S, You Y. Eco-friendly speed control algorithm development for autonomous vessel route planning. *Journal of Marine Science and Engineering* 2021;9(6):583. doi: 10.3390/jmse9060583.

- [18] Moradi MH, Brutsche M, Wenig M, Wagner U, Koch T. Marine route optimization using reinforcement learning approach to reduce fuel consumption and consequently minimize CO₂ emissions. *Ocean Engineering* 2022;259:111882. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111882.
- [19] Latinopoulos C, Zavvos E, Kaklis D, Leemen V, Halatsis A. Marine voyage optimization and weather routing with deep reinforcement learning. *Journal of Marine Science and Engineering* 2025;13(5):902. doi: 10.3390/jmse13050902.
- [20] Alshareef MH, Alghanmi AF. Optimizing maritime energy efficiency: a machine learning approach using deep reinforcement learning for EEXI and CII compliance. *Sustainability* 2024;16(23):10534. doi: 10.3390/su162310534.
- [21] Fujimoto S, van Hoof H, Meger D. Addressing function approximation error in actor-critic methods. In: Dy J, Krause A, editors. *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning (ICML)*; 2018 Jul 10-15; Stockholm, Sweden. PMLR; 2018. p. 1587-96. doi: 10.48550/arXiv.1802.09477.
- [22] Hadi B, Khosravi A, Sarhadi P. Deep reinforcement learning for adaptive path planning and control of an autonomous underwater vehicle. *Applied Ocean Research* 2022;129:103326. doi: 10.1016/j.apor.2022.103326.
- [23] Yasukawa H, Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology* 2015;20:37-52. doi: 10.1007/s00773-014-0293-y.
- [24] Alexandersson M. A study of methods to predict added resistance in waves [Master's thesis]. Stockholm: KTH Centre for Naval Architecture; 2009. doi: 10.13140/RG.2.2.18796.69767.
- [25] Park H, Lee P, Kim J, Kim H, Lee H, LeeY. Study on the estimation method of wind resistance considering self-induced wind by ship advance speed. *Journal of Marine Science and Engineering* 2024;12:1694. doi: 10.3390/jmse12101694.
- [26] Beji S. Formulation of wave and current forces acting on a body and resistance of ships. *Ocean Engineering* 2020;218:108121. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108121.
- [27] Welch G, Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter [Internet]. Chapel Hill, NC: Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill; 1995 [cited 2025 Oct 9]. Available from: <https://cis.temple.edu/~latecki/Courses/CIS750-03/Papers/KalmanFilterSIGGRAPH2001.pdf>.

- [28] Lazarowska A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships utilizing radar remote sensing. Remote Sensing 2021;13:3265. doi: 10.3390/rs13163265.
- [29] Open-Meteo. Marine weather API [Internet]. Open-Meteo; c2022-2026 [cited 2026 Jun 8]. Available from: <https://open-meteo.com/en/docs/marine-weather-api>.
- [30] Wang H, Zhou P, Wang Z. Reviews on current carbon emission reduction technologies and projects and their feasibilities on ships. Journal of Marine Science and Application 2017;16:129-36. doi: 10.1007/s11804-017-1413-y.

ประวัติผู้เขียนบทความ



ธนาวุฒิ วิริยะพันธ์ อาจารย์กลุ่มวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ศูนย์ฝึกพาณิชย์นาวี กรมเจ้าท่า 120 หมู่ 7 ซอยเทศบาล 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางด้วน อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270 โทรศัพท์ 02-7564971 E-mail: t_wiriya@mmtc.ac.th



ดร.สาลินี สมบูรณ์ไพศาล อาจารย์กลุ่มวิชาการทั่วไป ศูนย์ฝึกพาณิชย์นาวี กรมเจ้าท่า 120 หมู่ 7 ซอยเทศบาล 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางด้วน อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270 โทรศัพท์ 02-7564971 E-mail: s_somboo@mmtc.ac.th



พล.ร.ต.ดร.ก้องเกียรติ ลีกนุช อาจารย์ประจำหลักสูตรกลุ่มวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ศูนย์ฝึกพาณิชย์นาวี กรมเจ้าท่า 120 หมู่ 7 ซอยเทศบาล 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลบางด้วน อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270 โทรศัพท์ 02-7564971 E-mail: Lucknuch1959@gmail.com



ผศ. พล.ร.ท. ทวีศักดิ์ มั่นช้วนนท์ อาจารย์ประจำหลักสูตร กลุ่มวิชาเอก
วิศวกรรมเครื่องกล-ซ่อมบำรุงอากาศยาน มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
60 ถนนร่มเกล้า แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510 โทรศัพท์
02-904-2222 E-mail : tmunchawanont@gmail.com

Article History:

Received: October 16, 2025

Revised: July 31, 2026

Accepted: August 19, 2026

การวิเคราะห์การกระจายตัวและแนวโน้มดัชนีองศาวันความเย็น
รายภูมิภาคของประเทศไทย
REGIONAL DISTRIBUTION AND TREND ANALYSIS OF COOLING
DEGREE-DAY INDICES IN THAILAND

อภิวัฒน์ ชัยสุกัญญาสันต์¹ พงศกร คชาพงศ์กุล² และ สิริชัย จิรวงศ์นุสรณ์^{3*}

¹นักศึกษา,วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลรัตนโกสินทร์, 96 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ศาลายา อำเภอพุทธมณฑล นครปฐม 73170,
aphiwat.chai@rmutr.ac.th

²อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม, วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 96 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ศาลายา อำเภอพุทธมณฑล
นครปฐม 73170, E-mail: pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

^{3*}อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก, สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, 96 ถนนพุทธมณฑลสาย 5 ศาลายา อำเภอพุทธมณฑล
นครปฐม 73170, E-mail: sirichai.jir@rmutr.ac.th

Aphiwat Chaisukanyasan¹, Pongsakorn Kachapongkun², Sirichai Jirawongnuson^{3*}

¹Student, Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, 96 Mu 3 Phutthamonthon Sai 5
Road, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170 Thailand,
E-mail: aphiwat.chai@rmutr.ac.th

²Co-advisor, Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, Rajamangala
University of Technology Rattanakosin, 96 Mu 3 Phutthamonthon Sai 5 Road, Salaya,
Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170 Thailand,
E-mail: pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

^{3*}Major-advisor, Department of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, 96 Phutthamonthon Sai 5 Road, Salaya, Phutthamonthon District, Nakhon
Pathom 73170, E-mail: sirichai.jir@rmutr.ac.th

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding author)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแผนที่ค่าดัชนี CDDs ทั้ง 6 ภูมิภาคของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันระหว่างปี 2020-2024 ของ 6 จังหวัดตัวแทนในแต่ละภูมิภาค ใช้อุณหภูมิฐาน 25 °C ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard สำหรับภูมิอากาศร้อนชื้น ผลของงานวิจัยพบว่าภาคกลางและภาคตะวันออกมี CDDs สูงสุด 1739 และ 1732 ขณะที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือต่ำสุด 1206 และ 1175 และค่าเฉลี่ยรวมทั้งประเทศเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 ในช่วง 5 ปี ผลมาจากภาวะโลกร้อน ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานเพื่อระบบปรับอากาศที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างระดับความสูงกับ CDDs $R^2 = 0.51$, $p\text{-value} = 0.11$, $t\text{-stat} = -2.07$ บ่งชี้ว่าพื้นที่ราบลุ่มต้องใช้พลังงานเพื่อปรับอากาศมากกว่าพื้นที่สูงเป็นผลมาจาก CDDs ที่สูงกว่า โดยภาคที่มีค่า CDDs สูง เช่น ภาคกลางและภาคตะวันออก ควรเพิ่มความหนาแน่นและกำหนดเกณฑ์ OTTV/RTTV ตามมาตรฐาน BEC ให้เข้มงวดกว่าภาคที่มีค่า CDDs ต่ำ งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนอนุรักษ์พลังงาน และการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานของประเทศได้.

คำสำคัญ: ดัชนีองศาวันความเย็น, การใช้พลังงานในอาคาร, ภูมิอากาศของประเทศไทย

ABSTRACT

This study aims to develop a CDDs map covering all six regions of Thailand based on daily average temperature data from 2020-2024 for six representative provinces. The base temperature of 25 °C was applied in accordance with ASHRAE standards for hot-humid climates. The results reveal that the Central and Eastern regions exhibit the highest CDDs values of 1739 and 1732 respectively, while the Northern and Northeastern regions record the lowest values of 1206 and 1175. The national average CDDs increased by 5.9% over the five-year period, reflecting the influence of global warming and a continuing rise in cooling energy demand. Linear regression analysis indicates a negative correlation between altitude and CDDs ($R^2 = 0.51$, $p = 0.11$, $t = -2.07$), suggesting that lowland areas require greater cooling energy compared with highland areas. Regions with higher CDDs, such as the Central and Eastern regions, should adopt thicker insulation and stricter OTTV/RTTV criteria under Thailand's Building Energy Code (BEC) than regions with lower CDDs. The outcomes of this study can be applied to energy conservation planning and the design of energy-efficient buildings in Thailand.

KEYWORDS: Cooling Degree Day Index, Building Energy Consumption, Thailand Climate

1. บทนำ

ภาคอาคารเป็นภาคที่ใช้พลังงานสูงร้อยละ 40 ของการใช้พลังงานทั้งหมดทั่วโลก [1] ปัญหาสำคัญคือแนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยโลกที่สูงขึ้นส่งผลให้ระบบปรับอากาศต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย การใช้พลังงานในภาคอาคารนั้นส่วนใหญ่ใช้กับระบบปรับอากาศ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 50 ของการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารภาครัฐทั้งหมด [2]

ค่าดัชนีองศาวันความเย็น (Cooling Degree Days: CDDs) คือผลรวมสะสมของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับอุณหภูมิฐานที่กำหนด สะท้อนภาระความร้อนที่ระบบปรับอากาศต้องรับมือ ยิ่งค่า CDDs สูง ระบบปรับอากาศยังต้องใช้พลังงานมากขึ้น [3] CDDs มีความเหมาะสมกว่าดัชนีภูมิอากาศอื่นด้วยเหตุผล 3 ประการ ได้แก่ 1) ใช้ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่มีพร้อมและครอบคลุมทุกพื้นที่ ต่างจาก Heat Index ที่ต้องใช้ข้อมูลความชื้นรายชั่วโมง 2) เป็นดัชนีสะสมรายปีที่เปรียบเทียบระหว่างภูมิภาคและช่วงเวลาได้โดยตรง เหมาะกับการวางแผนอนุรักษ์พลังงาน และ 3) ได้รับการยอมรับในมาตรฐานสากล ASHRAE [3] และใช้แพร่หลายในงานวิจัยพลังงานอาคารทั่วโลก [4-6] ทำให้เปรียบเทียบกับงานวิจัยนานาชาติได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ CDDs เป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินความต้องการพลังงานของระบบปรับอากาศและการออกแบบขนาดกันความร้อนที่เหมาะสมของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย

งานวิจัยของ Miranda et al [4] วิเคราะห์แนวโน้ม CDDs พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยโลกจาก 1.5 °C เป็น 2.0 °C ทำให้ CDDs เพิ่มขึ้น 12-34% โดยเฉพาะในเอเชียและแอฟริกา Cros et al [7] ได้ประเมินการเปลี่ยนแปลง CDDs ของประเทศฝรั่งเศส พบว่าปัจจัยด้านประชากรมีอิทธิพลต่อ CDDs เนื่องจากความต้องการพลังงานเพื่อปรับอากาศ Tringa et al [8] พบว่า CDDs ในกรีซมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ฤดูร้อนยาวนานขึ้น และภาระด้านพลังงานสูงขึ้นจากสภาพภูมิอากาศที่ปรับตัวสูงขึ้น Verichev et al [5] ได้วิจัยวิธีคำนวณ CDDs เพื่อหาความหนาแน่นที่เหมาะสม โดยใช้อุณหภูมิรายชั่วโมงของ 42 สถานีในแคว้นอันดาลูเซีย ประเทศสเปน ด้วยวิธี Hourly, ASHRAE และ UKMO และนำค่าดังกล่าวไปใช้ในการรอบวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน พบว่าวิธีคำนวณที่ต่างกันให้ CDDs/ร้อนและความหนาแน่นแตกต่างกันราว 10-20% โดยวิธี ASHRAE ให้ค่าต่ำสุด

ในส่วนของงานวิจัยในเอเชีย Thakur and Kumar [6] คาดว่า CDDs ในอินเดียจะเพิ่มขึ้น 12%, 16% และ 34% ภายในปี 2030, 2050 และ 2100 ตามลำดับ Amber et al [9] ได้สร้างแผนที่ CDDs ของปากีสถาน พบว่าพื้นที่ที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลต่ำกว่าจะมี CDDs สูงกว่าพื้นที่ที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลมากกว่าถึง 8 เท่า Liu et al [10] พบว่าอุณหภูมิฐาน 26 °C ที่ใช้อยู่ในประเทศจีนสูงเกินไป ควรปรับเป็น 18–22 °C เนื่องจากอุณหภูมิฐาน 26 °C ไม่สะท้อนความต้องการพลังงานจริง เพราะอาคารยังมีภาระความร้อนจากภายในและรังสีแสงอาทิตย์ Mehmood et al [11] ได้พัฒนา

heat index-based CDDs ที่รวมผลของภาระความร้อนแฝงและสัมผัส เพิ่มความแม่นยำในการทำนายพลังงานถึง 20% และ Mehmood et al [12] ใช้ CDDs เพื่อจำแนกเขตภูมิอากาศร้อนจัด พร้อมเสนอแนวคิด Resilient Cooling Pathway เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและลดการใช้พลังงานของอาคารในเอเชียใต้

สำหรับประเทศไทย งานวิจัยเกี่ยวกับดัชนี CDDs ยังมีอยู่จำกัด Assawamartbunlue [13] ศึกษาดัชนีองศาชั่วโมงความเย็น (CDH) ที่อุณหภูมิฐาน 18.5°C ของ 4 เมืองหลักในช่วงปี 1994-2008 พบว่ากรุงเทพมหานครมีค่า CDH รายปีสูงสุดที่ 91,374 องศา-ชั่วโมง รองลงมาคือ สงขลา 75,298 อุบลราชธานี 75,093 และเชียงใหม่ 64,117 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า CDH ของทุกเมือง สูงกว่าค่าดัชนีองศาชั่วโมงความร้อน (HDH) อย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนว่าประเทศไทยมีความต้องการพลังงานปรับอากาศตลอดปีมากกว่าการทำความร้อน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าว ใช้หน่วยองศา-ชั่วโมง ข้อมูลเพียง 4 จังหวัด และอุณหภูมิฐาน 18.5°C ต่างจากมาตรฐาน ASHRAE Standard 55 [14] ที่กำหนดไว้ 25°C สำหรับภูมิอากาศร้อนชื้น จึงยังขาดฐานข้อมูล CDDs ที่ทันสมัย ครอบคลุมทั้ง 6 ภูมิภาค และใช้อุณหภูมิฐานที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศปัจจุบันของประเทศไทย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นขยายขอบเขตจากองค์ความรู้เดิมโดยจัดทำฐานข้อมูลที่มีความทันสมัย ครอบคลุมพื้นที่ให้มากขึ้น โดยเลือกใช้อุณหภูมิฐานที่ 25°C ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะสบายและสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50-60% ซึ่งเหมาะสมกับภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทยตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55 [14] Yamtraipat et al [15] ได้วิจัยการตั้งค่าอุณหภูมิของระบบปรับอากาศภายในอาคารสำนักงานของประเทศไทย พบว่าช่วงอุณหภูมิที่ผู้ใช้งานรู้สึกสบายและใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพอยู่ที่ $24.6\text{--}26.2^{\circ}\text{C}$ และพบว่าพฤติกรรมการใช้งานจริงส่วนใหญ่ที่ 77.64% จะตั้งอุณหภูมิต่ำกว่า 26.2°C โดยการปรับตั้งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุก 1°C สามารถลดพลังงานได้เฉลี่ย 6.14% นอกจากนี้ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานยังแนะนำการตั้งอุณหภูมิที่ 25°C เพื่อสร้างความเย็นสบายอย่างเหมาะสมพร้อมทั้งลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ประมาณร้อยละ 10 [16] จึงนับเป็นค่าที่มีความเหมาะสมทั้งด้านสภาวะสบายและด้านประสิทธิภาพพลังงานสำหรับสภาพภูมิอากาศประเทศไทย

อุณหภูมิฐาน T_b ในบริบทของ CDDs คืออุณหภูมิที่ระบบปรับอากาศต้องทำงานเพื่อรักษา สภาวะสบาย ไม่ใช่ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก การที่อุณหภูมิของประเทศไทยสูงกว่า 25°C อยู่บ่อยครั้งจึงยืนยันว่าระบบปรับอากาศต้องทำงานมากและต่อเนื่อง ซึ่งตรงกับสิ่งที่ CDDs ออกแบบมาเพื่อวัด ส่วนกรณีจีนที่ Liu et al [10] เสนอให้ปรับ T_b จาก 26°C เป็น $18\text{--}22^{\circ}\text{C}$ นั้น เป็นเพราะ $T_b = 26^{\circ}\text{C}$ สูงเกินไปจนไม่สะท้อนภาระความร้อนจริง ยิ่งสนับสนุนว่า $T_b = 25^{\circ}\text{C}$ ของไทยเหมาะสมกว่า สำหรับช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า 25°C โดยเฉพาะภาคเหนือและภาค ตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว ค่า CDDs จะเป็นศูนย์ตามนิยาม ASHRAE [3] ซึ่งสอดคล้องกับ

ความเป็นจริงที่ระบบปรับอากาศไม่จำเป็นต้องทำงานในช่วงนั้น ดังนั้น $T_b = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงสะท้อนความต้องการพลังงานจริงของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ดัชนี CDDs กับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล จัดทำแผนที่ CDDs และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ CDDs เฉลี่ยรวม โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันที่จากกรมอุตุนิยมวิทยา [17] ระหว่างปี 2020-2024 ครอบคลุมพื้นที่ 6 ภูมิภาคของประเทศไทย

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ผู้เขียนดำเนินการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยอาศัยกรอบแนวคิดของ CDDs (Cooling Degree Days: CDDs) ตามนิยามและสมการ (1)-(4) ในทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยกำหนดอุณหภูมิฐาน T_b เท่ากับ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะสบายและเหมาะสมกับภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทยตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55 และงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง จากนั้นจึงนำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของสถานีตรวจอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา [17] มาคำนวณค่า CDDs รายวัน รายเดือน รายปี และค่าเฉลี่ย 5 ปี เพื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลและจัดทำแผนที่การกระจายตัวของค่า CDDs ของประเทศไทย โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้

2.1 ดัชนีองศาวันความเย็น (Cooling Degree Days: CDDs)

นิยามของค่าดัชนีองศาวันความเย็น (Cooling Degree Days: CDDs) คือหน่วยวัดความต้องการพลังงานสำหรับระบบปรับอากาศ ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันกับอุณหภูมิฐานที่กำหนดไว้ หากอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันสูงกว่าอุณหภูมิฐาน จะนับเป็น CDDs และหากต่ำกว่าหรือเท่ากับก็จะถือเป็นศูนย์ตาม ASHRAE [3] โดยคำนวณได้ตามสมการ (1)-(4)

$$CDDs_{Daily} = \sum (T_i - T_b)^+ \quad (1)$$

สมการ (1) ใช้คำนวณ CDDs รายวัน ($CDDs_{Daily}$) โดย T_i คืออุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน $= (T_{max} + T_{min})/2$, T_b คืออุณหภูมิฐานที่กำหนดไว้ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ เครื่องหมาย “+” จะพิจารณาเฉพาะค่าบวกเท่านั้น

$$CDDs_{Monthly} = \sum_{i=1}^{n \text{ Days}} CDDs_{Daily.i} \quad (2)$$

สมการ (2) ใช้คำนวณ CDDs รายเดือน ($CDDs_{Monthly}$) โดยนำค่า $CDDs_{Daily,i}$ จากสมการ (1) ของทุกวันในเดือนนั้นมารวมกัน โดยที่ n คือจำนวนวันจริงของแต่ละเดือน (28 หรือ 29 วันสำหรับเดือนกุมภาพันธ์ และ 30 หรือ 31 วันสำหรับเดือนอื่น) ทั้งนี้ในช่วงข้อมูลดังกล่าว มีปีอธิกสุรทิน 2 ปี ได้แก่ 2020 และ 2024 ซึ่งเดือนกุมภาพันธ์มี 29 วัน

$$CDDs_{Yearly} = \sum_{i=1}^{12 \text{ Months}} CDDs_{Monthly,i} \quad (3)$$

สมการ (3) ใช้คำนวณ CDDs รายปี ($CDDs_{Yearly}$) โดยนำค่า $CDDs_{Monthly}$ จากสมการ (2) ทั้ง 12 เดือน มารวมกัน

$$CDDs_{5 \text{ Yearly average}} = \frac{\sum_{i=Year \ 2020}^{Year \ 2024} CDDs_{Yearly,i}}{5} \quad (4)$$

สมการ (4) ใช้คำนวณ CDDs เฉลี่ย 5 ปี ($CDDs_{5 \text{ Yearly average}}$) ระหว่างปี 2020-2024 โดยใช้ค่า $CDDs_{Yearly,i}$ (ระหว่างปี 2020-2024) จากสมการ (3) มาหาค่าเฉลี่ย 5 ปี และใช้ค่าที่ได้จากสมการ (4) นี้สำหรับนำไปใช้เพื่อออกแบบคำนวณกันความร้อนที่เหมาะสม

2.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันระหว่างปี 2020-2024 และระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลจากสถานีตรวจอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา [17] โดยเลือก 6 จังหวัดเป็นตัวแทนของแต่ละภูมิภาค ได้แก่ เชียงใหม่ (เหนือ) ขอนแก่น (ตะวันออกเฉียงเหนือ) กาญจนบุรี (ตะวันตก) กรุงเทพมหานคร (กลาง) ชลบุรี (ตะวันออก) และสงขลา (ใต้) โดยใช้อุณหภูมิฐาน 25 °C ช่วงเวลา 5 ปี (ปี 2020-2024) ได้รับการคัดเลือกด้วยเหตุผล 2 ประการ ได้แก่ 1) ช่วงเวลาดังกล่าวครอบคลุมทั้งปรากฏการณ์ลานีญา (ปี 2020-2022) และเอลนีโญ (ปี 2023-2024) [18] ทำให้ค่าเฉลี่ย CDDs สะท้อนความผันผวนของสภาพภูมิอากาศได้ครบถ้วนทั้งสองทิศทาง และ 2) สอดคล้องกับแนวปฏิบัติสากลด้านการออกแบบอาคารที่แนะนำให้ใช้ข้อมูลอย่างน้อย 5 ปี เพื่อลดการเบี่ยงเบนจากสภาพอากาศของปีใดปีหนึ่งและสะท้อนแนวโน้มอุณหภูมิในปัจจุบันได้ดีกว่าค่าเฉลี่ยระยะยาว

การเลือกจังหวัดตัวแทนพิจารณาจากความหนาแน่นประชากร (คน/ตร.กม.) สูงสุดของแต่ละภูมิภาคเป็นหลัก ดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเหตุผล 3 ประการ ได้แก่ 1) พื้นที่ความหนาแน่นสูงมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณรอบข้าง 1-3 °C จาก Urban Heat Island Effect [19] ซึ่งส่งผลต่อค่า CDDs

โดยตรง 2) ความหนาแน่นประชากรสะท้อนปริมาณอาคารและความต้องการพลังงานปรับอากาศต่อพื้นที่ได้ดีกว่าจำนวนประชากรรวม และ 3) จังหวัดตัวแทนครอบคลุมระดับความสูงที่หลากหลายตั้งแต่ 2 เมตร (กรุงเทพมหานคร) ถึง 314 เมตร (เชียงใหม่) ทำให้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงกับ CDDs มีความครอบคลุมเพียงพอ

ตารางที่ 1 จังหวัดตัวแทนภูมิภาค ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล และความหนาแน่นประชากร

ภูมิภาค	จังหวัดตัวแทน	ความสูง (ม.)	ความหนาแน่นประชากร (คน/ตร.กม.) [20,21]	เหตุผลหลักในการเลือก
เหนือ	เชียงใหม่	314	89.4	ความหนาแน่นสูงสุด ศูนย์กลางเศรษฐกิจ
ตะวันออก	ขอนแก่น	157	163.5	ความหนาแน่นสูงสุด ศูนย์กลางการศึกษา/สุขภาพ
ตะวันตก	กาญจนบุรี	40	45.9	ความหนาแน่นสูงสุด ครอบคลุมพื้นที่ราบสูง
กลาง	กรุงเทพฯ	2	3,487.4	ความหนาแน่นสูงสุดประเทศ (UHI)
ตะวันออก	ชลบุรี	9	371.0	ความหนาแน่นสูงสุด ศูนย์กลาง EEC
ใต้	สงขลา	7	193.7	ความหนาแน่นสูงสุด ศูนย์กลางภาคใต้ตอนล่าง

2.3 การคำนวณ CDDs เฉลี่ยรวมของประเทศ

การคำนวณ CDDs เฉลี่ยรวมของประเทศ (CDDs National) ใช้สมการที่ (5) โดยนำค่า CDDs เฉลี่ย 5 ปีของแต่ละภูมิภาคมาเฉลี่ยแบบเท่ากัน (Simple Average) ดังนี้

$$CDDs \text{ National} = \frac{1}{6} \sum_{r=1}^6 CDDs_{5yr,r} \quad (5)$$

เมื่อ r คือ ภูมิภาค ($r = 1$ ถึง 6) ทั้งนี้การใช้ Simple Average มีเหตุผลเนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้จังหวัดตัวแทน 1 จังหวัดต่อภูมิภาค

2.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติ

การหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางภูมิศาสตร์กับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยและ CDDs ของแต่ละภูมิภาค จะใช้การวิเคราะห์เชิงสถิติ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นโดยใช้สมการดังนี้

$$Y = aX + b \quad (6)$$

โดยที่ Y = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย หรือ CDDs, X = ความสูงเฉลี่ยจากระดับน้ำทะเล (เมตร), a = สัมประสิทธิ์ความชัน, b = ค่าคงที่

การวิเคราะห์ทำได้ด้วยโปรแกรม Excel Data Analysis เพื่อหาค่า R^2 , t-statistic และ p-value โดยใช้พิกัดทางภูมิศาสตร์ของจังหวัดตัวแทน 6 ภูมิภาคลงในตารางข้อมูล และใช้ระดับเฉลี่ยเพื่อแสดง CDDs ตามช่วงค่าที่คำนวณได้ โดยตั้งค่ามาตราสวให้สอดคล้องกับช่วงค่าของ CDDs เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้อย่างชัดเจน

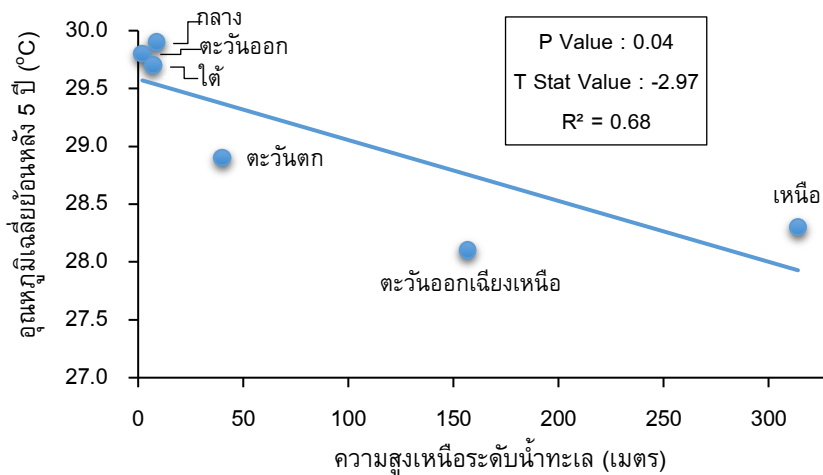
3. ผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันระหว่างปี 2020-2024 และระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสถานีตรวจอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา [17] มาหาความสัมพันธ์ด้านต่าง ๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล และอุณหภูมิเฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024) ของแต่ละภูมิภาค

ภูมิภาค	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (เมตร)	อุณหภูมิ (°C) เฉลี่ย ระหว่างปี 2020-2024
เหนือ	314	28.3
ตะวันออกเฉียงเหนือ	157	28.1
ตะวันตก	40	28.9
กลาง	2	29.8
ตะวันออก	9	29.9
ใต้	7	29.7

ข้อมูลในตารางที่ 2 เมื่อนำมาวิเคราะห์ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือน้ำทะเล (เมตร) และอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) เฉลี่ยระหว่างปี 2020-2024 ดังนี้ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 29.8°C 29.9°C และ 29.7°C ตามลำดับ ในขณะที่ภูมิภาคที่มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากกว่าเช่น ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าที่ 28.3°C และ 28.1°C ซึ่งเป็นผลมาจากภูมิภาคที่มีความสูงใกล้เคียงระดับน้ำทะเลนั้น จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าภูมิภาคที่มีระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลที่มากกว่า



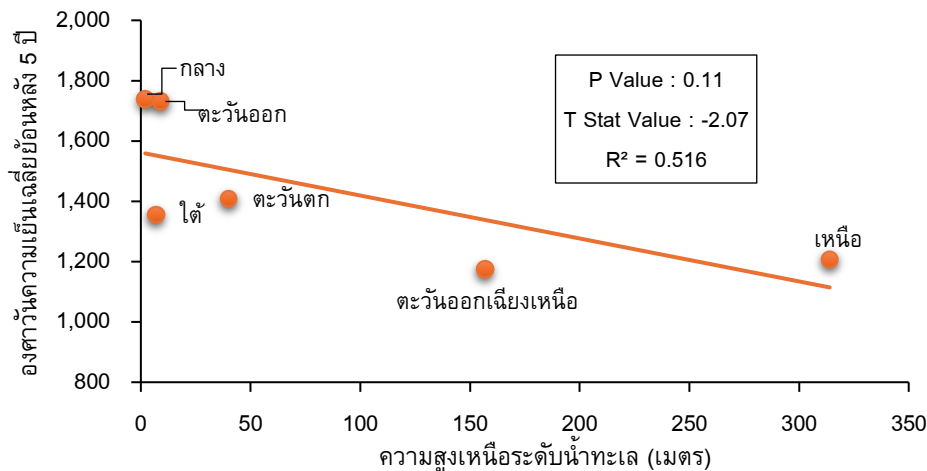
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความสูงเหนือระดับน้ำทะเลกับอุณหภูมิเฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024) ของภูมิภาค

รูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติแบบถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลและอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างปี 2020-2024 โดยใช้ Excel Data Analysis นั้นได้ค่า $p\text{-value} < 0.04$, $t\text{-statistic} = -2.97$ และค่า $R^2 = 0.68$ และจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ (6) ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลกับอุณหภูมิเฉลี่ย ดังนี้ $T = -0.0053X + 29.58$ เมื่อ T คืออุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$) และ X คือระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (เมตร) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $a = -0.0053$ และค่าคงที่ $b = 29.58$ บ่งชี้ว่าเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น 1 เมตร อุณหภูมิเฉลี่ยจะลดลง 0.0053°C ตามรูปที่ 1 บ่งชี้ว่าระดับความสูงเหนือน้ำทะเลมีอิทธิพลอย่างมีนัยทางสถิติต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกล่าวคือ เมื่อภูมิภาคที่มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2 มาคำนวณหา CDDs โดยใช้สมการที่ (1)-(4) และใช้อุณหภูมิฐานที่ 25 °C ตามมาตรฐาน ASHRAE [3] ได้ผลลัพธ์ตามตารางที่ 3 พบว่าภาคกลางและตะวันออกมีค่าเฉลี่ย CDDs สูงที่สุดคือ 1739 และ 1732 รองลงมาคือภาคตะวันตก 1409 และภาคใต้ 1355 ในขณะที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าเฉลี่ยดัชนี CDDs ต่ำสุดคือ 1206 และ 1175 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ข้อมูลความสูงเหนือระดับน้ำทะเลและ CDDs ของภูมิภาค

ภูมิภาค	ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (เมตร)	CDDs เฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024)
เหนือ	314	1206
ตะวันออกเฉียงเหนือ	157	1175
ตะวันตก	40	1409
กลาง	2	1739
ตะวันออก	9	1732
ใต้	7	1355



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความสูงเหนือระดับน้ำทะเลกับ CDDs เฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024) ของแต่ละภูมิภาค

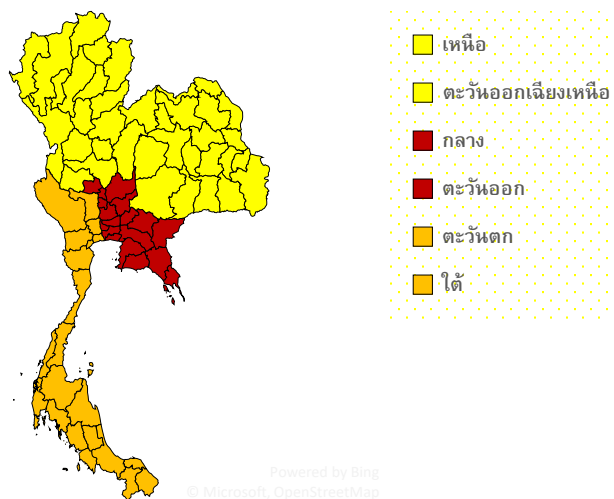
จากรูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือระดับน้ำทะเล และ CDDs เฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024) ของภูมิภาค ผลการวิเคราะห์พบความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงลบปานกลาง $p\text{-value} = 0.11$, $t\text{-stat} = -2.07$ และ $R^2 = 0.51$

จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ (6) ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลกับ CDDs ดังนี้ $CDDs = -1.4242X + 1561.57$ เมื่อ CDDs ($^{\circ}\text{C}$ วัน) และ X คือระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (เมตร) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความชัน $a = -1.4242$ และค่าคงที่ $b = 1561.57$ บ่งชี้ว่าเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น 1 เมตร CDDs จะลดลง 1.42°C วัน บ่งชี้ว่ายิ่งภูมิภาคที่มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากกว่าจะมีแนวโน้ม CDDs ลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amber et al [9] ที่สร้างแผนที่ CDDs ของประเทศปากีสถานในพื้นที่ที่มีช่วงความสูงกว้างตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึง 2,656 เมตร พบว่าพื้นที่ระดับต่ำมีค่า CDDs สูงกว่าพื้นที่ระดับสูงถึง 8 เท่า ในขณะที่งานวิจัยนี้มีช่วงความสูงของพื้นที่ศึกษาเพียง 2-314 เมตร ซึ่งแคบกว่ามาก จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ค่า R^2 ของงานวิจัยนี้ต่ำกว่า

อย่างไรก็ตาม พบว่าบางภูมิภาคมีค่าเบี่ยงเบนจากแนวโน้มของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ เช่น ภาคตะวันออกและภาคใต้มีความสูงใกล้เคียงกันแต่มีค่า CDDs ต่างกันถึง 377°C วัน ในขณะที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความสูงต่างกันเกือบ 2 เท่าแต่มีค่า CDDs ใกล้เคียงกัน สะท้อนให้เห็นว่าปัจจัยภูมิอากาศเฉพาะถิ่นมีอิทธิพลต่อค่า CDDs นอกเหนือจากระดับความสูงและยืนยันความจำเป็นในการใช้แบบจำลองตัวแปรพหุในงานวิจัยอนาคต

ค่า $R^2 = 0.68$ และ 0.51 จากรูปที่ 1 และรูปที่ 2 บ่งชี้ว่าระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่า CDDs ได้ร้อยละ 68 และ 51 ตามลำดับ ซึ่งยอมรับได้สำหรับการถดถอยที่ใช้ตัวแปรเดียว เนื่องจากสภาพภูมิอากาศจริงยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่น เช่น ระยะห่างจากทะเล ทิศทางลม และ Urban Heat Island Effect [19] เมื่อเทียบกับ Amber et al [9] ที่ใช้ข้อมูล 30 ปีจาก 30 สถานีในปากีสถาน ได้ $R^2 = 0.93$ และ 0.78 สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยและ CDDs ตามลำดับ ค่า R^2 ของงานวิจัยนี้ต่ำกว่าเนื่องจากใช้เพียง 6 จังหวัดตัวแทน อย่างไรก็ตาม ยังสะท้อนแนวโน้มเชิงลบระหว่างระดับความสูงและ CDDs สอดคล้องกับงานวิจัยนานาชาติ และการเพิ่มสถานีตรวจวัดในอนาคตจะช่วยให้ R^2 แม่นยำขึ้น ค่า R^2 ที่ต่ำกว่าที่คาดมีสาเหตุหลักจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงกับ CDDs อาจไม่เป็นเส้นตรงในทุกช่วง โดย Mourshed et al [22] พบว่าแบบจำลองไม่เชิงเส้นที่รวมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิและละติจูดจาก 5,511 สถานีทั่วโลกให้ R^2 สูงถึง 0.99 2) ช่วงความสูงของจังหวัดตัวแทนในไทยแคบ (2-314 เมตร) เทียบกับ Amber et al [9] ที่ครอบคลุมกว่า 2,000 เมตร ทำให้ข้อมูลไม่เพียงพอต่อการแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ชัดเจน และ 3) ปัจจัยภูมิอากาศเฉพาะถิ่น เช่น มรสุม ความชื้นจากอ่าวไทยและอันดามัน และ Urban Heat Island Effect [19] ทำให้ความสัมพันธ์ซับซ้อนเกินกว่าแบบจำลองตัวแปรเดียวจะอธิบายได้ครบถ้วน จากวรรณกรรมที่

เกี่ยวข้องพบว่ามีแบบจำลองที่อธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดีกว่าเส้นตรง โดย Mourshed et al [22] พบว่าแบบจำลองไม่เชิงเส้นให้ R^2 สูงถึง 0.99 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการจัดทำแผนที่ CDDs ของประเทศไทย การเปรียบเทียบโมเดลหลายรูปแบบจึงอยู่นอกเหนือขอบเขต และผู้วิจัยได้ระบุไว้เป็นทิศทางสำหรับงานวิจัยอนาคตในส่วนผลการทดลองแล้ว 4) การเลือกจังหวัดตัวแทนเพียง 1 จังหวัดต่อภูมิภาคโดยพิจารณาจากความหนาแน่นประชากรสูงสุด ทำให้ปัจจัยด้านลักษณะการใช้ที่ดินและความเป็นเมือง เช่น กิจกรรมการจราจรและความร้อนจากการระบายความร้อนของระบบปรับอากาศปรากรวม (confound) กับผลของระดับความสูง โดยเฉพาะกรณีกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นทั้งจังหวัดที่มีระดับความสูงต่ำที่สุดและมีความเป็นเมืองสูงที่สุดในกลุ่มข้อมูล ทำให้ผลการถดถอยเชิงเส้นที่ได้ยังไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์เชิงสาเหตุระหว่างระดับความสูงและค่า CDDs ได้อย่างชัดเจน งานวิจัยในอนาคตจึงควรเพิ่มจำนวนจังหวัดตัวแทนต่อภูมิภาคให้มากกว่า 1 จังหวัด และคัดเลือกพื้นที่ที่มีลักษณะการใช้ที่ดินและระดับความเป็นเมืองใกล้เคียงกัน เพื่อควบคุมปัจจัยกวนดังกล่าวและเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองถดถอยเชิงเส้น



รูปที่ 3 แผนที่ CDDs ของประเทศไทย

จากรูปที่ 3 แผนที่ CDDs ของประเทศไทยเฉลี่ย 5 ปี โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3 นำมากำหนดเขตให้สอดคล้องกับช่วงของ CDDs เฉลี่ย 5 ปี ได้ดังต่อไปนี้

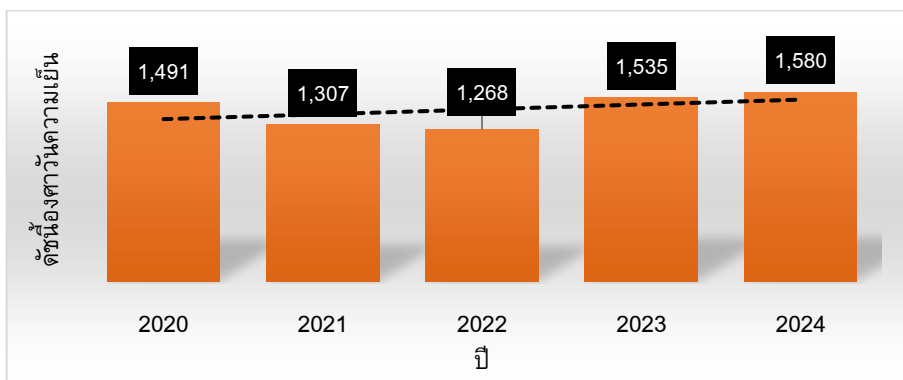
1) สีเหลือง แทน CDDs เฉลี่ย 5 ปี ช่วง 1150-1299 โดยภูมิภาคที่มี CDDs เฉลี่ย 5 ปีอยู่ในช่วงนี้ได้แก่ ภาคเหนือ มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ย 1206 และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ย 1175 มีปัจจัยจากภาคภูมิอากาศดังกล่าวมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากที่สุดเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น

2) สีส้มอ่อน แทน CDDs เฉลี่ย 5 ปี ช่วง 1300-1449 โดยภูมิภาคที่มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี อยู่ในช่วงนี้ ได้แก่ ภาคตะวันตก มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ย 1409 และภาคใต้ มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ย 1355 มีปัจจัยจากภาคภูมิภาสดังกล่าวมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น

3) สีแดง แทน CDDs เฉลี่ย 5 ปี ช่วง 1600-1799 โดยภูมิภาคที่มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี อยู่ในช่วงนี้ ได้แก่ ภาคกลาง มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ยสูงสุดของประเทศ เท่ากับ 1739 และภาคตะวันออก มี CDDs เฉลี่ย 5 ปี เฉลี่ยใกล้เคียงกับภาคกลาง เท่ากับ 1732 มีปัจจัยจากภาคภูมิภาสดังกล่าวมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับภูมิภาคอื่น

การกระจายตัวของค่า CDDs ในรูปที่ 3 สะท้อนให้เห็นว่าภูมิภาคที่อยู่ในระดับต่ำกว่ามีค่า CDDs สูงกว่า สอดคล้องกับ Amber et al [9] อย่างไรก็ดี ยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบกันในภูมิภาคหรือพื้นที่ของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งถือเป็นช่องว่างทางการวิจัยสำหรับงานวิจัยในอนาคต

CDDs เฉลี่ย 5 ปี (ปี 2020-2024) ในตารางที่ 3 คือค่าเดียวกับที่แนะนำให้นำไปใช้สำหรับออกแบบคำนวณกันความร้อนที่เหมาะสมของแต่ละภูมิภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Verichev et al [5] ที่นำ CDDs ไปคำนวณหาความหนาแน่นที่เหมาะสม ที่ประยุกต์ใช้ค่าดัชนีองศาวันความร้อนและความเย็นโดยวิธีการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life-Cycle Cost Analysis: LCCA) เพื่อหาความหนาแน่นโพลีโพลีสไตรีนอัด (EPS) ที่เหมาะสมของผนังอาคารในภูมิภาคเมดิเตอร์เรเนียนและกึ่งแห้งแล้ง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CDDs เป็นตัวชี้วัดสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมสำหรับใช้คำนวณความหนาแน่นกันความร้อนที่เหมาะสมในกระบวนการออกแบบอาคาร สำหรับบริบทของประเทศไทย ค่า CDDs ในตารางที่ 3 สามารถใช้จัดกลุ่มภูมิภาคตามระดับภาระความร้อนเพื่อปรับเกณฑ์ OTTV/RTTV ภายใต้มาตรฐาน Building Energy Code (BEC) [23] ให้เหมาะสมกับแต่ละภูมิภาคมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของ CDDs เฉลี่ยรวมของประเทศไทย ปี 2020-2024

รูปที่ 4 คำนวณจากค่าเฉลี่ยแบบเท่ากัน (Simple Average) ของ 6 ภูมิภาค ตามสมการที่ (5) สอดคล้องกับโครงสร้างข้อมูลที่ใช้จังหวัดตัวแทน 1 จังหวัดต่อภูมิภาค ทั้งนี้งานวิจัยอนาคตอาจพิจารณาใช้การถ่วงน้ำหนักตามพื้นที่หรือประชากรเพื่อความแม่นยำยิ่งขึ้น พบว่าปี 2020 มีค่า 1491 และลดลงในปี 2021-2022 การลดลงของ CDDs นั้น เป็นผลจากปรากฏการณ์ลานีญา ในช่วงปี 2021-2022 ซึ่งทำให้อุณหภูมิผิวน้ำทะเลในมหาสมุทรแปซิฟิกเขตร้อนต่ำกว่าปกติ ส่งผลให้ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีปริมาณฝนมากกว่าปกติและอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยลดลง Thai Meteorological Department. [24] ก่อนที่ค่า CDDs จะกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในปี 2023-2024 โดยมีค่าสูงสุดในปี 2024 เท่ากับ 1580°C วัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.9 เมื่อเทียบกับปี 2020

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ผลลัพธ์จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ย และดัชนี CDDs กับ ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ทำแผนที่ CDDs และการเปลี่ยนแปลงของ CDDs เฉลี่ยรวมเพื่อจัดทำ ข้อมูลและแผนที่ CDDs ของประเทศไทยที่ใช้ข้อมูลเป็นปัจจุบัน ครอบคลุมทั้ง 6 ภูมิภาค โดยใช้ อุณหภูมิฐาน 25°C ซึ่งเหมาะสมกับสภาวะความสบายของมนุษย์ตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55 [14] โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันย้อนหลัง 5 ปี (ปี 2020-2024) จากกรมอุตุนิยมวิทยา [17] สามารถสรุปผลงานวิจัยได้ดังนี้

1) ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลนั้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของภูมิภาค โดยภาคที่อยู่เขตรอบลุ่ม เช่น ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือค่าอุณหภูมิเฉลี่ย สูงที่สุด และภาคที่อยู่ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากกว่า เช่น ภาคเหนือและภาค ตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าต่ำที่สุด

2) ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลนั้นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ CDDs ของภูมิภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amber et al [9] โดยภาคที่อยู่เขตรอบลุ่ม เช่น ภาคกลางและภาค ตะวันออกเฉียงเหนือค่าสูงที่สุด และภาคที่อยู่ระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลมากกว่า เช่น ภาคเหนือและ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าต่ำที่สุด

3) การกระจายของดัชนี CDDs ของประเทศไทยในภูมิภาค พบว่าภาคเหนือและ ตะวันออกเฉียงเหนือมี CDDs ต่ำที่สุด ภาคใต้และตะวันตกอยู่ระดับปานกลาง และภาคกลางและ ตะวันออกมีค่าสูงที่สุด

4) ค่าการเปลี่ยนแปลงของ CDDs เฉลี่ยรวมของประเทศไทย พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วง 5 ปี (ปี 2020-2024) ที่ผ่านมา สอดคล้องกับการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกจาก 1.5°C เป็น 2.0°C ทำให้ CDDs เพิ่มขึ้น [4, 6] ส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานในภาคอาคารเพิ่มสูงขึ้นส่วนใหญ่ใช้กับ ระบบปรับอากาศ คิดเป็นสัดส่วนมากกว่าร้อยละ 50 ของการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารภาครัฐทั้งหมด [2]

5) CDDs สำหรับนำไปใช้เพื่อออกแบบฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสม ผลลัพธ์ของงานวิจัยฉบับนี้ สามารถนำ CDDs สำหรับนำไปใช้เพื่อออกแบบฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมของแต่ละภูมิภาค สอดคล้องกับงานวิจัยของ Verichev et al [5] ที่ได้นำค่า CDDs ไปคำนวณหาความหนาของฉนวนที่เหมาะสม โดยภูมิภาคที่มีค่า CDDs สูง เช่น ภาคกลางและภาคตะวันออก ควรพิจารณาเพิ่มความหนาฉนวนและกำหนดเกณฑ์ OTTV/RTTV ตามมาตรฐาน BEC [23] ให้เข้มงวดกว่าภูมิภาคที่มีค่า CDDs ต่ำ

6) งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดด้านการเลือกจังหวัดตัวแทนเพียง 1 จังหวัดต่อภูมิภาค ซึ่งปัจจัยด้านความเป็นเมืองอาจส่งผลร่วมกับระดับความสูงดังที่กล่าวในหัวข้อ 3 งานวิจัยในอนาคตจึงควรเพิ่มจำนวนจังหวัดตัวแทนต่อภูมิภาคและคัดเลือกพื้นที่ที่มีลักษณะการใช้ที่ดินใกล้เคียงกัน เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างระดับความสูงและค่า CDDs มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบการวางแผนอนุรักษ์พลังงานและการออกแบบระบบปรับอากาศของอาคารประหยัดพลังงาน รวมถึงเป็นข้อมูลสนับสนุนการบริหารจัดการพลังงานของประเทศได้

References

- [1] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 2008;40(3):394-98.
- [2] Bureau of Energy Regulation and Conservation, Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE). Prototype energy-saving government building manual [Internet]. Bangkok: Ministry of Energy; 2015 [cited 2026 Aug 2]. Available from: <http://berc.dede.go.th/wp-content/uploads/2018/05/GuideLine-SPD57.pdf> (In Thai).
- [3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Degree day [Internet]. ASHRAE terminology; [cited 2025 Oct 12]. Available from: <https://terminology.ashrae.org/?entry=degree%20day>.
- [4] Miranda ND, Lizana J, Sparrow S, Zachau-Walker M, Watson P, Wallom D, et al. Change in cooling degree days with global mean temperature rise increasing from 1.5 °C to 2.0 °C. *Nature Sustainability* 2023;6:1326-30. doi: 10.1038/s41893-023-01155-z.
- [5] Verichev K, Serrano-Jimenez A, Carpio M, Barrios-Padura A, Diaz-Lopez C. Influence of degree days calculation methods on the optimum thermal insulation thickness in life-cycle cost analysis for building envelopes in Mediterranean and semi-arid climates. *Journal of Building Engineering* 2023;79:107783. doi: 10.1016/j.jobbe.2023.107783.

- [6] Thakur R, Kumar A. Degree days dynamics under extreme representative concentration pathways (RCPs) scenarios in the Indian context. *Energy and Buildings* 2025;348:116459. doi: 10.1016/j.enbuild.2025.116459.
- [7] Cros S, Drobinski P, Giraudet LG, Meulemans J. The comparative influence of climate change and demography in spatially distributed degree-day projections for France in the 21st century. *Climate Services* 2025;37:100539. doi: 10.1016/j.cliser.2024.100539.
- [8] Tringa E, Tolika K, Anagnostopoulou Ch, Kostopoulou E. Assessing future changes in heating and cooling degree days using multiple base temperatures for cultural heritage sites in Greece: a case study of Thessaloniki and Delphi. *Science of The Total Environment* 2025;977:179352. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179352.
- [9] Amber KP, Aslam MW, Ikram F, Kousar A, Ali HM, Akram N, et al. Heating and cooling degree-days maps of Pakistan. *Energies* 2018;11(1):94.
- [10] Liu Y, Wen Z, Lyu K, Yang L, et al. Introducing degree days to building thermal climatic zoning in China. *J Therm Sci.* 2023;32(3):1155-1170. doi: 10.3390/en11010094.
- [11] Mehmood S, Amber KP, Usman M, Friedrich D. Integrating latent load into the cooling degree days concept for current and future weather projections. *Buildings* 2024;14(1):106. doi: 10.3390/buildings14010106.
- [12] Mehmood S, Lizana J, Núñez-Peiró M, Maximov SA, Friedrich D. Resilient cooling pathway for extremely hot climates in Southern Asia. *Applied Energy* 2022;325:119811. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119811.
- [13] Assawamartbunlue K. An investigation of cooling and heating degree-hours in Thailand. *Journal of Clean Energy Technologies* 2013;1(2):87-90. doi: 10.7763/JOCET.2013.V1.21.
- [14] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE; 2013.
- [15] Yamtraipat N, Khedari J, Hirunlabh J, Kunchornrat J. Assessment of Thailand indoor set-point impact on energy consumption and environment. *Energy Policy* 2006;34(7):765-77. doi: 10.1016/j.enpol.2004.07.009.
- [16] Energy Policy and Planning Office. 9 ways to use air conditioners to save energy [Internet]. Bangkok: Ministry of Energy; 2024 [cited 2025 Oct 12]. Available from: https://e-report.energy.go.th/EPPO_files/doc-01.pdf. (In Thai).

- [17] Thai Meteorological Department (TMD). Daily temperature statistics of Thailand 2020-2024. Bangkok: Thai Meteorological Department; 2025.
- [18] World Meteorological Organization (WMO). State of the global climate 2023. Geneva: WMO; 2024.
- [19] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy 2001;70(3):295-310.
- [20] Central Registration Office, Department of Provincial Administration, Ministry of Interior. Announcement of total population throughout the kingdom according to household registration evidence as of December 31, 2023 [Internet]. Bangkok: Ministry of Interior; 2024 [cited 2026 Jun 11]. Available from: https://stat.bora.dopa.go.th/stat/pk/pk_66.pdf. (In Thai)
- [21] Department of Provincial Administration, Ministry of Interior. Area classified by region and province, B.E. 2555-2566 (2012–2023). Bangkok: Ministry of Interior; [date unknown].
- [22] Mourshed M. Relationship between annual mean temperature and degree-days. Energy and Buildings 2012;54:418-25. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.024.
- [23] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Building energy code (BEC) standard according to ministerial regulations prescribing types or sizes of buildings and standards, criteria, and methods for building design for energy conservation B.E. 2563 [Internet]. Bangkok: Ministry of Energy; 2020 [cited 2026 Jun 14]. Available from: <https://bec.dede.go.th>. (In Thai)
- [24] Thai Meteorological Department. Thailand climate report 2022 [Internet]. Bangkok: Thai Meteorological Department; 2022 [cited 2025 Oct 12]. Available from: <https://tmd.go.th/climate/summaryyearly>. (In Thai)

ประวัติผู้เขียนบทความ



อภิวัดน์ ชัยสุกัญญาสันต์ นักศึกษาปริญญาเอก วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ E-mail: aphiwat.chai@rmutr.ac.th



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



ผศ.ดร.ศิริชัย จิรวงศ์สุรณ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองอธิการบดี และ
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ E-mail: sirichai.jir@mutr.ac.th

Article History:

Received: March 19, 2026

Revised: August 3, 2026

Accepted: August 19, 2026

**APPLICATION OF LAND USE AND TRANSPORTATION INTERACTION
(LUTI) MODEL FOR TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT (TOD):
THE CASE STUDY OF CITY AND ACTIVITY CENTER DEVELOPMENT ALONG
THE MRT PINK LINE CORRIDOR, BANGKOK METROPOLITAN REGION**

Sikkawat Sukhumaumnuychai

Master Student, The Cluster of Logistics and Rail Engineering, Faculty of Engineering,
Mahidol University, 25/25 Phuttamonthon 4 Rd, Salaya, Phuttamonthon, Nakhon Pathom
73170 Thailand, icesikkawat@gmail.com

ABSTRACT

Bangkok Metropolitan Region continues to face severe traffic congestion and high dependence on private vehicles, while major investment in rail transit has been promoted as a mechanism to support more sustainable urban development. This paper applies a Land Use and Transportation Interaction (LUTI) model using TRANUS to assess Transit-Oriented Development (TOD) along the MRT Pink Line corridor, focusing on two contrasting activity areas: Chaeng Watthana Government Center (CWG) and Muang Thong Thani (MTT). The study's contribution is a corridor-scale framework that translates TOD concepts into model outputs, including density, diversity, accessibility, consumer surplus, land consumption, and travel demand. The model was developed using population, employment, land use, land price, traffic network, public transport, travel behavior, and traffic count data, and was validated against survey observations in the base year. Scenario testing indicates that the MRT Pink Line, feeder services, and pedestrian improvements reduce private-car trips from 466,611 trips/day in BAU2030 to 396,799 trips/day in Scenario A and 390,175 trips/day in Scenario B, representing reductions of 15.0% and 16.4%, respectively. Walking trips increase by 43.2%-47.3%, and bus trips increase by 25.1%-59.2%, indicating improved access to public transport. However, transport infrastructure alone generates only limited land-use restructuring. When the Floor Area Ratio (FAR) policy is added in TOD target areas, residential floor area increases from 1.42 to 2.11 million square meters in MTT and from 0.19 to 0.56 million square meters in CWG. The findings show that TOD implementation requires integrated rail infrastructure, feeder systems, pedestrian facilities, mixed-use zoning, and FAR-based planning controls.

KEYWORDS: Transit-Oriented Development (TOD), Land Use and Transportation Interaction (LUTI), TRANUS, MRT Pink Line, Floor Area Ratio, Bangkok Metropolitan Region

1. Introduction

Bangkok, Thailand, is widely regarded as a highly congested metropolitan area with concentrated urban development and high private vehicle use [1-4]. Congestion creates direct and indirect costs through longer travel times, increased fuel consumption, reduced reliability, environmental impacts, and reduced access to jobs and services. The transport challenge is therefore not only an engineering problem of road capacity but also a land-use problem in which activities, residences, employment, schools, services, and commercial functions are distributed across the city in ways that shape travel demand [3,5-7].

In response to this challenge, rail transit investment has become a major urban development strategy in Bangkok and its surrounding provinces. The MRT Pink Line is particularly important because it serves a corridor that includes large residential districts, government offices, commercial centers, education-related activities, and major intermodal connections. The corridor also contains sites that are not simply station areas but large activity centers with different institutional and market conditions. These conditions present a useful case for investigating whether rail investment alone is sufficient to support TOD or must be paired with feeder, pedestrian, and land-use measures.

The TOD concept emphasizes compact mixed-use development within convenient access distance of high-capacity public transport. A TOD area should not only be close to a station. It should also have sufficient density, diverse land use, walkable design, and a development-control framework that allows activities to locate near transit while reducing the need for private car travel [8-11]. In practice, however, many rail corridors can become transit-adjacent development (TAD), where land development occurs near stations but remains weakly connected to station access, local services, affordability, and multimodal circulation.

The research gap addressed in this paper is therefore not merely the lack of LUTI applications in Thailand. The more specific gap is the lack of a corridor-scale, site-specific TOD assessment framework that links rail service, feeder connection, pedestrian improvement, and FAR-based land-use policy to both transport and land-use outcomes. Conventional four-step travel-demand models can represent trips, mode choice, and assignment, but they are not designed to

endogenously account for how changes in accessibility influence the location of activities and land consumption. Conversely, land-use analysis without a transport model cannot reveal how changes in generalized transport cost alter travel behavior and consumer surplus [5,6,12,13].

This study contributes by: (1) demonstrating how TRANUS can be structured as a LUTI tool for TOD assessment in a Bangkok rail corridor; (2) translating TOD indicators into model outputs that can be compared across scenarios; (3) quantifying the relative contribution of rail, feeder, pedestrian, and FAR measures; and (4) deriving policy implications for corridor planning in Thailand. The paper uses only the model structure, data, and results from the study documents, and it interprets these outputs through a TOD planning lens.

The research questions are as follows. First, how does the MRT Pink Line affect travel behavior and accessibility in the study corridor? Second, how much do feeder and pedestrian improvements add to the transport benefits of the rail line? Third, why does transport infrastructure alone have a limited effect on land-use restructuring? Fourth, how can FAR policy and local land-use controls strengthen TOD outcomes in activity-center and city-center contexts? These questions guide the model design, scenario testing, results interpretation, and policy discussion.

2. TOD Assessment and LUTI Indicators

TOD assessment normally begins with the three dimensions of density, diversity, and design. Density concerns the concentration of population and employment near transit. Diversity concerns the mixture of residential, office, commercial, retail, service, and community use. Design concerns the ease of accessing the station by walking, cycling, feeder services, and local public transport. These dimensions are not independent; density can support transit ridership only if the area is accessible, while diversity reduces trip length and increases the possibility that daily activities can be completed without private vehicles [10,14-16].

For a LUTI model, TOD indicators must be expressed as model outputs rather than only as physical planning descriptions. Density can be represented by population and employment in each zone. Diversity can be represented by the proportion of income groups and land-use categories. Design and accessibility can be represented by disutility, travel costs, public transport access, walking trips, and mode shifts. Economic effects can be represented by consumer surplus and land consumption. Transport effects can be represented by the number of trips by mode. This translation is important because it allows TOD policies to be evaluated in a consistent scenario framework [5,6,16,17].

The use of TRANUS is appropriate in this context because the program models the interaction among activity location, land consumption, transport costs, and travel demand [13]. The land-use model represents the relationship between economic sectors, population groups, service employment, and land sectors. The transport model represents travel categories, modes, generalized costs, and assignment. The model, therefore, provides a practical bridge between engineering analysis of the transport network and urban-planning analysis of the spatial distribution of development [12,13].

This paper focuses on five groups of indicators. The first group is density, including population and employment. The second group is diversity, including income groups and land-use shares. The third group is accessibility, represented by disutility for income groups and trip purposes. The fourth group is economic effects, represented by consumer surplus and land consumption. The fifth group is travel demand, represented by trips by mode. These indicators are suitable because they can be extracted from TRANUS outputs and directly connected to TOD policy questions [5,6,13,17].

Table 1 TOD indicators selected for LUTI/TRANUS assessment

No.	Group	Indicator	TRANUS output/interpretation	Unit
1	Density	Population density	Residents by income group in each TAZ	People
2	Density	Employment density	Basic and service employment in each TAZ	People/jobs
3	Diversity	Income-level composition	High-, middle-, and low-income population shares	Percent
4	Diversity	Land-use composition	Office, commercial, and residential land sectors	Percent / sq.m
5	Design/ accessibility	Disutility by income group	Generalized travel cost and accessibility	Baht
6	Design/ accessibility	Disutility by purpose	School, service, and shopping accessibility	Baht

Table 1 TOD indicators selected for LUTI/TRANUS assessment (continued)

No.	Group	Indicator	TRANUS output/interpretation	Unit
7	Economic	Consumer surplus	Benefit from changes in generalized travel cost	Baht
8	Economic	Land consumption	Change in land use multiplied by land price	Million baht
9	Travel demand	Mode-specific trips	Car, bus, van, walking, rail, feeder	Trips/day

3. Study Area

The study area is located along the eastern section of the MRT Pink Line corridor in northern Bangkok and Nonthaburi. The MRT Pink Line is a secondary mass-transit system connecting the northern and eastern parts of the metropolitan region. The broader corridor includes 30 stations and provides interchange opportunities with other rail systems. For this analysis, the model focuses on the part of the corridor most relevant to Chaeng Watthana Road and associated activity centers. The internal study area is divided into 24 Traffic Analysis Zones (TAZs), with external zones added to represent travel entering and leaving the area.

The 2020 base year represents the condition prior to the full operation of the MRT Pink Line. The base-year area contains approximately 255,946 residents and 101,490 employment-related activities. The population distribution comprises 39.8% low-income, 42.0% middle-income, and 18.2% high-income groups. The study area is primarily residential, with approximately 60% residential land, 30% commercial land, and 10% office land. The transport network is dominated by an east-west arterial corridor with eight lanes, supported by tertiary and service roads.

The morning peak hour is concentrated between 7:00 and 8:00 AM, with inbound traffic to the study area of approximately 24,420 vehicles per hour and outbound traffic of 14,290 vehicles per hour. The evening peak hour is concentrated between 5:00 and 6:00 PM, with inbound traffic of 17,110 vehicles per hour and outbound traffic of 20,480 vehicles per hour. The average daily traffic volume on the main east-west corridor is approximately 80,470 PCU per day. These values show that the corridor is not only a rail-planning corridor but also a road-capacity and access-management corridor.

Two TOD target areas are emphasized. The first is the Chaeng Watthana Government Center (CWG), which has a strong office and public-sector activity profile. It contains more than 30 government agencies, over 18,000 staff members, and about 7,000 daily visitors. Planned expansion adds approximately 400,000 square meters of office space and is expected to increase daily trips. The second is Muang Thong Thani (MTT), a large mixed-use urban district with exhibition and convention facilities, shopping, markets, offices, residences, and the planned Pink Line spur. The contrast between these areas allows the study to compare a specialist activity center and a city-center-style mixed-use area.

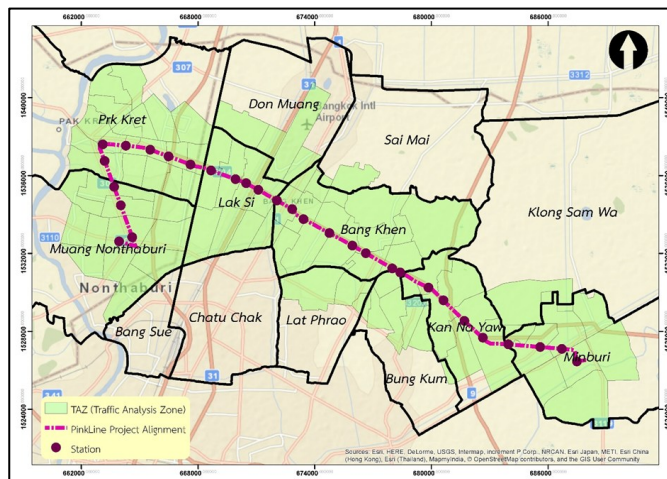


Figure 1 Alignment of the MRT Pink Line and broader study corridor

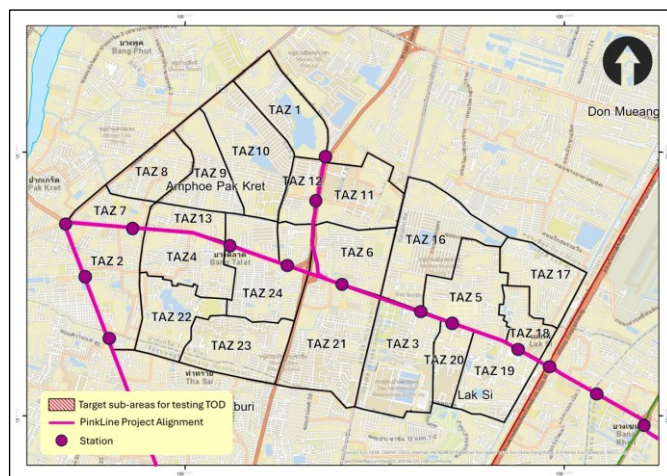


Figure 2 Internal TAZ structure and model study area

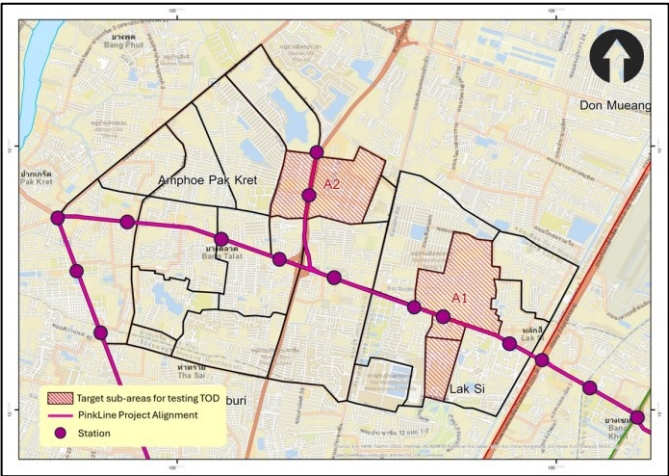


Figure 3 TOD target areas: A1 is CWG and A2 is MTT

Table 2 Key base-year characteristics of the study area

No.	Item	Value/description	Interpretation for TOD assessment
1	Population	255,946 residents	Base demand for residence-linked trips and local services
2	Employment	101,490 workers/activity units	Base attraction for work and service trips
3	Income groups	39.8% low, 42.0% middle, 18.2% high income	Supports equity-oriented interpretation of accessibility
4	Land-use structure	About 60% residential, 30% commercial, 10% office	Provides the initial diversity profile
5	Main corridor traffic	80,470 PCU/day on the main primary road	Represents strong road dependence before rail opening
6	Public transport context	33 bus stops and van services of approximately 125 daily trips	Existing access system before feeder and rail scenarios
7	CWG activity profile	Government complex with staff, visitors, and planned office expansion	Specialist activity center with land-use constraints
8	MTT activity profile	MICE, retail, markets, offices, residences, and Pink Line spur	City-center-style mixed-use TOD target

4 Methodology: TRANUS Model Design and Calibration

The model is structured as a Land Use and Transportation Interaction system. The TRANUS land-use component represents economic sectors and land sectors. The transport component represents trip categories, modes, generalized costs, and network assignment. The model is then iterated until the land-use and transport components are consistent with each other. This structure allows accessibility changes from the transport network to influence location and land consumption, while changes in activities and population influence travel demand.

The sector design follows the logic of the study area. Basic employment is treated as exogenous because it represents activities that attract work trips and are not generated solely by the local population. Service employment is treated as endogenous because it is induced by residence and local activity. Residents are grouped into three income levels because vehicle availability, time value, and travel behavior differ by income. Land sectors include industrial, office, commercial, and residential land. This set of sectors is sufficient to capture the TOD questions without over-complicating the model.

The transport categories include home-based work trips for high-income, middle-income, and low-income groups, home-based education trips, service trips, and retail or shopping trips. Travel modes include private car, van, bus, walking, rail, and feeder. These modes allow the model to test whether the MRT Pink Line and supporting access systems reduce private-car dependence and increase public-transport-related trips. The model also calculates consumer surplus by accounting for changes in generalized travel cost and trip volume.

Model inputs were compiled from survey data, public datasets, and project data. The most important inputs are population, employment, land use, land prices, traffic network, public transport service, value of travel time, value of waiting time, vehicle availability, trip generation rates, and external travel demand. The base-year model was calibrated in three parts: land-use consumption rates, external demand, and traffic assignment. The validation results were then used to assess whether the model was suitable for strategic scenario analysis rather than link-by-link operational design.

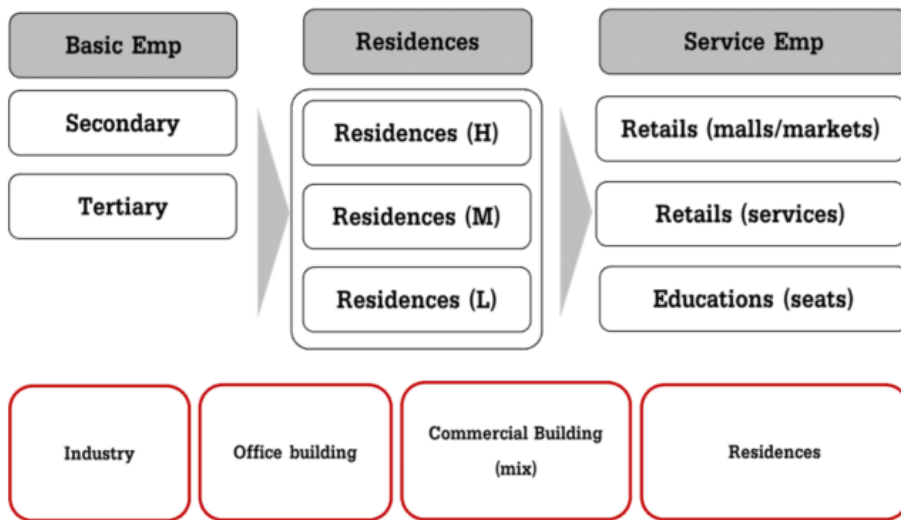


Figure 4 Structure and relationships between activity sectors and land sectors in the TRANUS model

Table 3 Activity sectors used in the TRANUS model

No.	Sector	Main category	Treatment in the model
1	Industry (secondary)	Basic employment	Exogenous final demand
2	Services (tertiary)	Basic employment	Exogenous final demand
3	Education	Service employment	Induced by residences and education trips
4	Retail mix / local services	Service employment	Induced by local population and activity
5	Retail malls / markets	Service employment	Induced by shopping and commercial activity
6	High-income residences	Residential sector	Induced by employment and land availability
7	Middle-income residences	Residential sector	Induced by employment and land availability
8	Low-income residences	Residential sector	Induced by employment and land availability

Table 4 Principal model inputs and sources

No.	Data	Description	Source / basis
1	Population by TAZ	Population data by traffic analysis zone	World population and project zonal processing
2	Employment by TAZ	Industrial and service employment	Census of Business and Industry / survey data
3	Land use	Land plot size by land-use type	Project survey data
4	Land price	Land value by land-use category	Individual land-plot valuation data
5	Traffic network	Road and network structure	OpenStreetMap and project processing
6	Public transport	Bus stops, vans, rail and feeder assumptions	Project survey and scenario design
7	VOT and VWT	Value of travel and waiting time	Project parameter assumptions
8	Vehicle availability	Household vehicle-ownership shares by income group	Project survey data
9	Trip generation rate	Trip rates by income group and purpose	Project survey data
10	External demand	Travel demand between external and internal zones	Cordon and external-zone calibration

4.1 Calibration of Land Use Consumption

The land-use calibration adjusted both inelastic and elastic demand functions. For the inelastic component, the intersectoral relationship matrix was revised until the model reproduced the observed activity totals for industrial employment, services, education, local retail, retail malls, and the three residential income groups. The calibrated values match the survey totals for these sectors, which indicates that the production-consumption relationship among sectors is internally consistent in the base year.

For the elastic component, the demand-function parameters were adjusted by economic sector and land sector. The objective was not to estimate a universal land-market model but to represent how each activity sector in the corridor consumes industrial, office, commercial,

and residential land. The calibrated elastic functions show that different sectors have different sensitivities to land availability and price, which is important when testing the FAR policy. The calibration charts are retained to show that the parameter adjustment was not purely descriptive but was linked to observed land-use quantities.

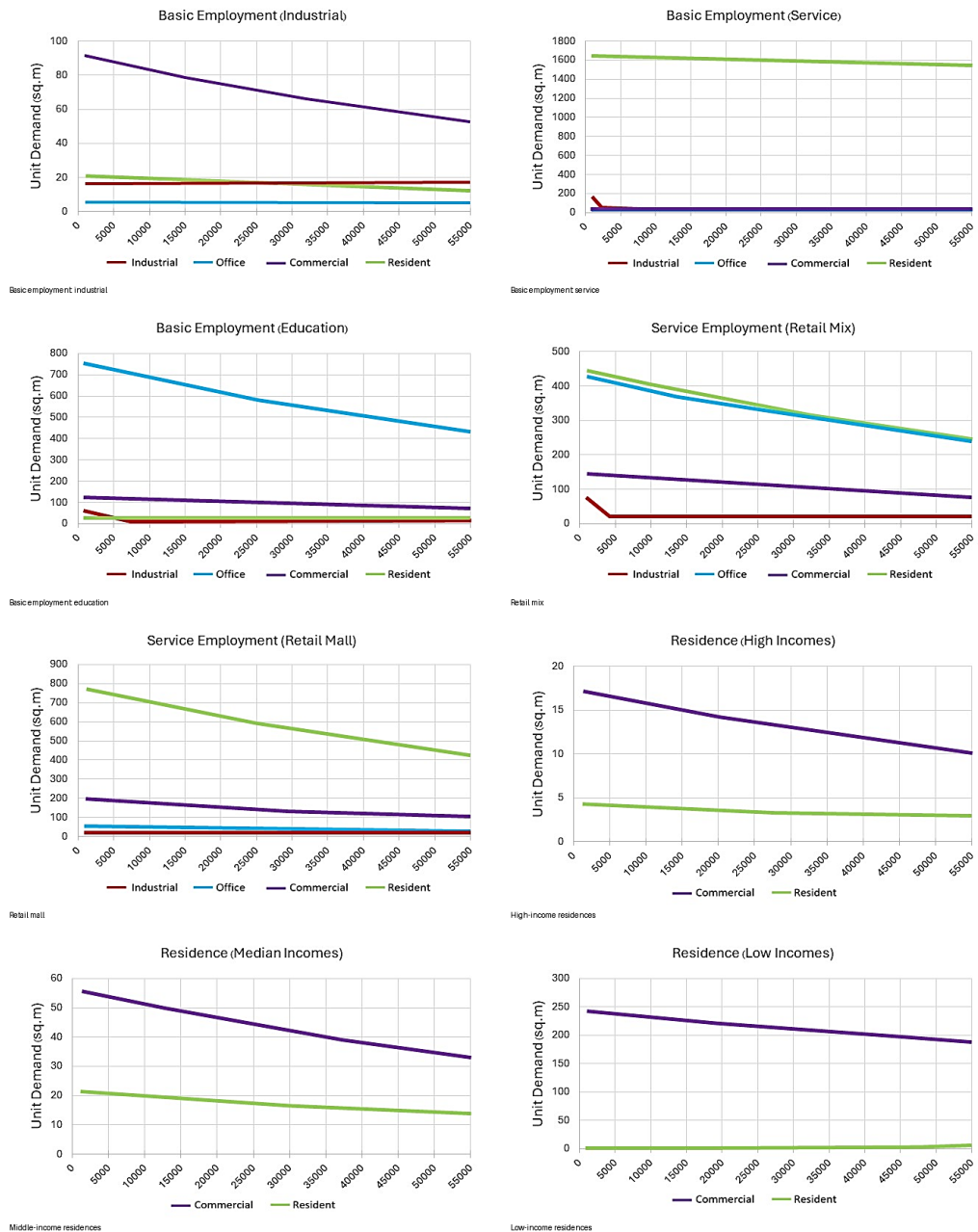


Figure 5 Calibrated elastic demand functions for employment and residential sectors

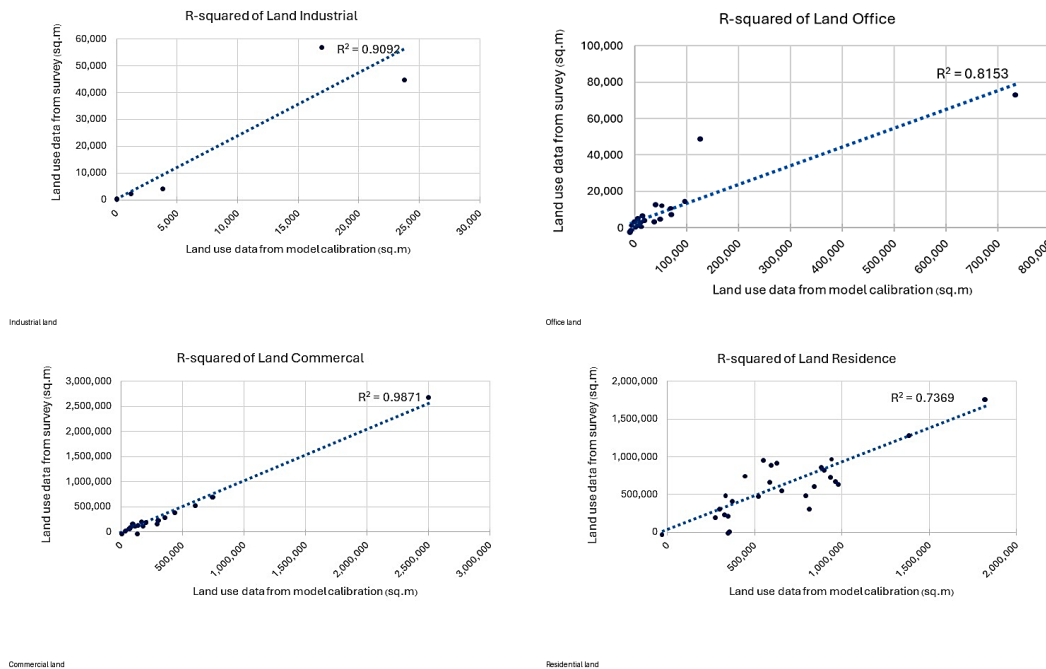


Figure 6 Relationship between modeled and observed land-use data in the base-year calibration

4.2 Calibration of External Demand and Traffic Assignment

Because the study area is a corridor embedded in the larger Bangkok Metropolitan Region, external travel demand is important. Eight external zones were defined to capture demand entering and leaving the internal TAZ system. These external zones represent trips that are not generated only by the internal land-use system but still load the transport network and influence access conditions in the corridor. The external-demand adjustment, therefore, prevents the model from underestimating traffic volumes on Chaeng Watthana Road and associated access roads.

Traffic assignment validation was conducted at two main survey points: the area in front of the Software Park and the area in front of the Government Complex. The error values vary by direction and time period, as expected in a strategic corridor model. The average error at B1 is 18.67% in the morning peak and 16.68% in the evening peak. The average error at B2 is 11.65% in the morning peak and 15.36% in the evening peak. These errors are acceptable for comparing strategic policy scenarios, although they should not be interpreted as a microsimulation-level fit for detailed signal or intersection design.

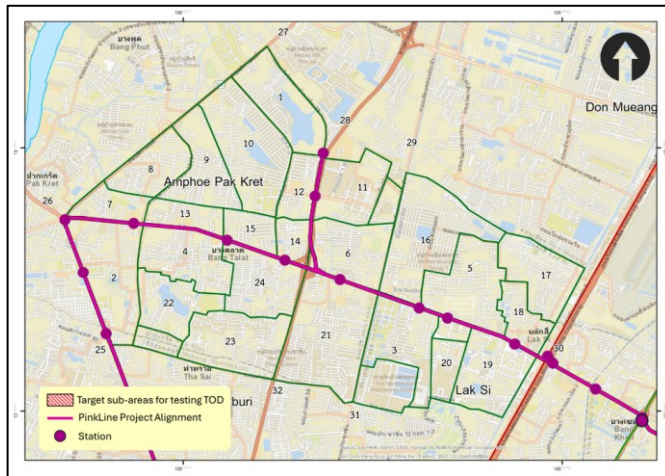


Figure 7 External zones used to connect the corridor model to surrounding travel demand

Table 5 Summary of traffic-assignment validation on Chaeng Watthana Road

Survey point	Direction	AM survey	AM model	AM error	PM survey	PM model	PM error
B1: Software Park	Pak Kret to Lak Si	3,980	3,535	11.18%	3,140	3,102	1.21%
B1: Software Park	Lak Si to Pak Kret	5,020	3,707	26.16%	4,100	2,782	32.15%
B2: Government Complex	Pak Kret to Lak Si	5,550	5,204	6.23%	3,590	3,791	5.60%
B2: Government Complex	Lak Si to Pak Kret	3,590	4,203	17.08%	3,920	2,935	25.13%
Average by point	B1 / B2	-	-	18.67% / 11.65%	-	-	16.68% / 15.36%

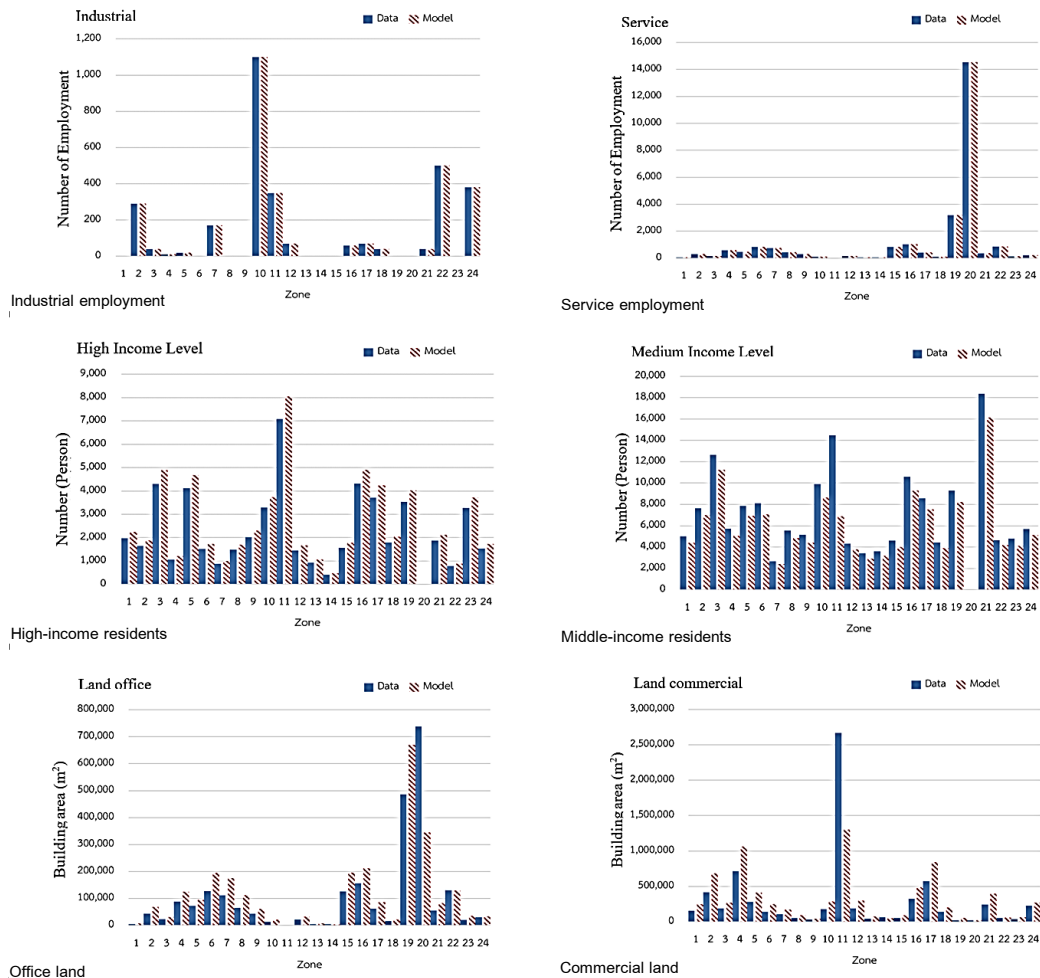


Figure 8 Selected comparisons between observed data and modelled outputs by zone

5. Scenario Design

Scenario development follows the logic of TOD policy implementation. The base case compares the 2020 condition without the MRT Pink Line and the 2030 condition with the rail line. Scenario A (SCA) adds a feeder system to improve connections to the station and to the two TOD target areas. Scenario B (SCB) builds on Scenario A by improving walking and pedestrian facilities. Scenario C (SCC) adds land-use policy through FAR adjustment in the TOD target areas. In the detailed target-area comparison, the paper uses SCB as the transport-improvement case, following the project results table for MTT and CWG.

The reason for this scenario order is important. The sequence separates the effects of the rail line from those of access improvements, and then separates the effects of transport improvements from land-use regulatory changes. This is consistent with the practical policy question faced by Thai agencies: whether investment in rail infrastructure is sufficient, or whether feeder services, pedestrian investment, and land-use policy must be prepared as a package.

Table 6 Scenario structure for TOD assessment

Scenario	Transport condition	Access / land-use policy	Main planning question
BAU2020	No MRT Pink Line	Observed base-year conditions	What is the pre-rail reference condition?
BAU2030	MRT Pink Line in operation	No additional feeder, pedestrian, or FAR package	What is the rail-only effect under growth?
SCA	MRT Pink Line plus feeder	Feeder connection to MTT and CWG	How much does feeder improve access?
SCB	MRT Pink Line plus feeder	Pedestrian and walkway improvement	How much does walkability add?
SCC	Transport improvement package	FAR adjustment in TOD target areas	How does land-use policy strengthen TOD outcomes?

6. Results

6.1 Transport and Accessibility Effects

The model results show that transport improvements have the clearest and most immediate effect on travel behavior. In BAU2030, private-car trips reach 466,611 trips/day. With feeder service in SCA, car trips declined to 396,799 trips/day, a reduction of 69,812 trips/day or 15.0%. With pedestrian improvements added in SCB, car trips decline further to 390,175 trips/day, a reduction of 76,436 trips/day, or 16.4%, from BAU2030. These reductions indicate that the rail line requires access support to translate infrastructure supply into mode shift.

Public transport and non-motorized indicators move in the opposite direction. Bus trips increase from 11,971 trips/day in BAU2030 to 14,971 in SCA and 19,054 in SCB. Walking trips

increase from 49,705 trips/day in BAU2030 to 71,180 in SCA and 73,195 in SCB. The model also generates 49,645 rail trips/day in SCA and 47,407 in SCB, with feeder trips totaling 3,385 and 3,475/day, respectively. The slight difference between SCA and SCB rail trips does not mean that walkability is ineffective; instead, it indicates that pedestrian improvements redistribute access behavior and support broader public transport access rather than simply maximizing the rail count.

Accessibility improves substantially for some user groups. For high-income residents, disutility falls from 89,380 baht in BAU2030 to 47,788 baht in SCA and 47,785 baht in SCB, a reduction of about 46.5%. Middle-income disutility falls from approximately 134,370 baht to 115,215-116,367 baht. Low-income disutility falls from 137,090 baht to 130,289-131,506 baht. The improvement is therefore not evenly distributed across income groups, highlighting the need to consider feeder fares, walking quality, and service coverage in equity-oriented TOD planning.

Consumer surplus results reinforce the interpretation of accessibility. Low-income home-based work trips receive the largest consumer-surplus values in the public-transport improvement scenarios, increasing to 368,469 baht in SCA and 406,762 baht in SCB. Service and shopping trips also receive substantial benefits. These results support the conclusion that the transport package improves user welfare, especially when access to stations becomes more convenient.

Table 7 Main scenario results for the whole study area

Group	Indicator	Unit	BAU2020	BAU2030	SCA	SCB
Density	Population	People	255,946	374,266	347,368	347,151
Density	Employment	People/jobs	101,490	149,851	143,266	143,233
Diversity	High-income share	%	18.3	22.0	22.2	22.2
Diversity	Middle-income share	%	41.9	30.6	29.8	29.8
Diversity	Low-income share	%	39.8	47.4	48.0	48.0
Accessibility	HINC disutility	Baht	41,786	89,380	47,788	47,785
Accessibility	MINC disutility	Baht	106,916	134,370	115,215	116,367
Accessibility	LINC disutility	Baht	124,120	137,090	130,289	131,506
Economic	Consumer surplus: LINC	Baht	-	5,332	368,469	406,762

Table 7 Main scenario results for the whole study area (continued)

Group	Indicator	Unit	BAU2020	BAU2030	SCA	SCB
Transport	Car trips	Trips/day	353,236	466,611	396,799	390,175
Transport	Bus trips	Trips/day	10,552	11,971	14,971	19,054
Transport	Walking trips	Trips/day	37,041	49,705	71,180	73,195
Transport	Rail trips	Trips/day	0	0	49,645	47,407
Transport	Feeder trips	Trips/day	0	0	3,385	3,475

6.2 Land-Use Effects and the Limits of Transport-Only TOD

Although the transport effects are clear, the whole-area land-use indicators change only modestly under rail, feeder, and pedestrian scenarios. Population and employment in SCA and SCB are lower than in BAU2030 because improved accessibility also enables some activities to relocate or engage with external opportunities. The shares of land office, commercial land, and residential land change only slightly between SCA and SCB. This is a critical finding for TOD policy: improved transport service can change travel behavior quickly, but land-use restructuring requires planning controls and development capacity.

This result is consistent with the distinction between station proximity and TOD performance. A rail station creates a new accessibility condition, but it does not automatically produce mixed-use redevelopment if existing land ownership, allowable floor area, land-price conditions, and institutional constraints remain unchanged. This issue is particularly relevant in CWG, where a large portion of land is government-owned and dominated by office activity. In contrast, MTT has greater potential for private mixed-use development and a stronger base of commercial and residential activity.

For this reason, the TOD improvement scenario focuses on the FAR policy. The scenario does not simply increase density everywhere. It targets areas where additional development capacity can support the TOD structure. In CWG, the analysis considers the government-center area, together with the opposite residential/commercial area, to form a functional TOD area connected to the Pink Line station. In MTT, the analysis considers the existing mixed-use district and available FAR capacity around the planned station and spur connection.

Table 8 FAR and development-capacity conditions in TOD target areas

Area	TAZ	Planning definition	FAR from plan	Area (sq.m)	Current building area (sq.m)	Model FAR
CWG opposite side	5	Medium density	3.0	1,745,206	979,461	0.56
CWG core	20	Government land	-	757,738	357,808	-
MTT	11	Low density	3.0	1,948,383	3,356,242	1.72
MTT	12	Medium density	4.5	674,185	813,819	1.21

6.3 TOD Target-Area Results

The target-area results show how FAR policy changes the internal composition of land use. In MTT, residential floor area increases from 1,423,743 square meters in SCB to 2,107,061 square meters in SCC, a 48.0% increase. Commercial floor area increases from 1,743,711 to 1,916,160 square meters, while office floor area increases from 137,530 to 141,861 square meters. The share of residential land increases from 43.1% to 50.6%, while the share of commercial floor area decreases from 52.8% to 46.0%. This confirms MTT as a city-center-type TOD target with a strong mixed-use structure.

In CWG, the effect is more dramatic because the initial residential and commercial components are small. Residential floor area increases from 194,464 square meters in SCB to 558,397 square meters in SCC, a 187.1% increase. Commercial floor area increases from 112,395 to 521,157 square meters, a 363.7% increase. Office floor area only slightly from 479,911 to 488,733 square meters. The resulting land-use composition shifts toward a more balanced TOD pattern, with the residential share increasing from 24.7% to 35.6%, while the commercial share increases from 14.3% to 33.2% and the office share decreases from 61.0% to 31.2%.

The land-consumption values reinforce this interpretation. In MTT, residential land consumption increases from 17,655 to 26,804 million baht, while commercial land consumption increases from 2,969 to 3,402 million baht. In CWG, residential land consumption increases from 2,384 to 7,018 million baht, and commercial land consumption increases from 277 to 1,392 million baht. The increase in CWG is large because the base condition lacks residential and commercial diversity, so the FAR policy creates additional development capacity where mixed-use functions were previously limited.

The implication is not that FAR should be increased without control. Instead, the results suggest that FAR is effective when it is targeted to station areas and paired with access improvements. In CWG, FAR policy should be accompanied by pedestrian crossings, station area circulation, and a connection between the government complex and the opposite residential/commercial area. In MTT, FAR policy should support a compact mixed-use district while maintaining walkability and feeder connections to the Pink Line spur.

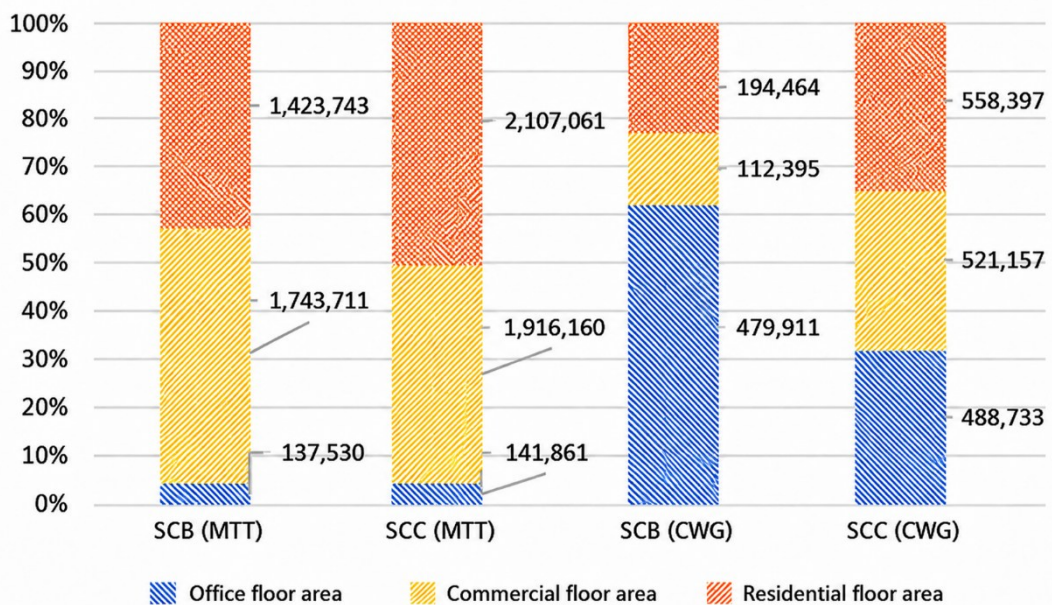


Figure 9 Comparison of land-use composition in SCB and SCC within TOD target areas

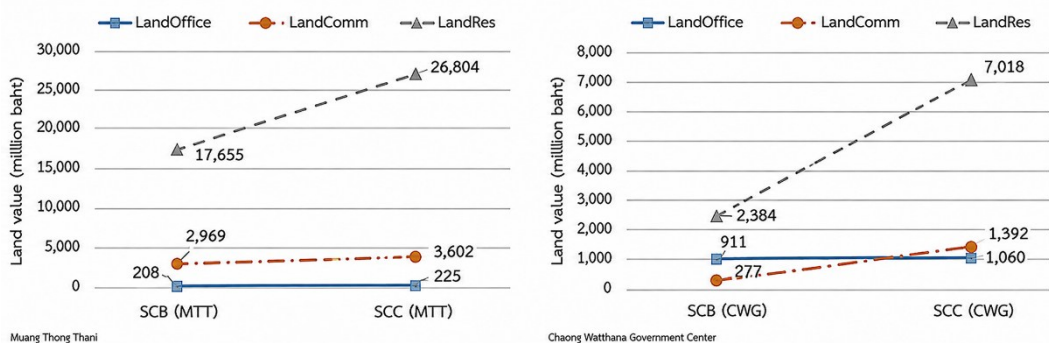


Figure 10 Land-consumption value comparison between transport-only and TOD/FAR policy cases

Table 9 Summary of target-area TOD indicators

Group	Indicator	Unit	SCB (MTT)	SCC (MTT)	SCB (CWG)	SCC (CWG)
Density	Population Residents	People	15,506	15,500	9,909	9,912
Density	Employment	People/jobs	22,743	22,742	14,460	14,460
Diversity	High-income share	%	39.1	39.1	29.1	29.1
Diversity	Middle-income share	%	24.8	24.8	32.2	32.2
Diversity	Low-income share	%	36.1	36.1	38.7	38.7
Land use	Office floor area	sq.m	137,530	141,861	479,911	488,733
Land use	Commercial floor area	sq.m	1,743,711	1,916,160	112,395	521,157
Land use	Residential floor area	sq.m	1,423,743	2,107,061	194,464	558,397
Share	Office share	%	4.2	3.4	61.0	31.2
Share	Commercial share	%	52.8	46.0	14.3	33.2
Share	Residential share	%	43.1	50.6	24.7	35.6
Economic	Office land consumption	Million baht	208	225	911	1,060
Economic	Commercial land consumption	Million baht	2,969	3,402	277	1,392
Economic	Residential land consumption	Million baht	17,655	26,804	2,384	7,018

7. Discussion and Policy Implications

The results show that TOD is a combined transport and land-use process. The MRT Pink Line can reduce overall travel costs and support mode shift, but its land-use effects are limited unless station-area development capacity is also adjusted. This is a central lesson for Bangkok and other Thai metropolitan corridors. Rail investment should not be evaluated only by ridership or car-trip reduction. It should also be evaluated by whether it creates the land-use conditions needed for compact, mixed, and accessible development.

The feeder and pedestrian scenarios show that station access is a key mechanism. A rail line provides high-capacity movement along the corridor, but the traveler still has to reach the station. Feeder services reduce the first-mile and last-mile burden for areas beyond

comfortable walking distance, while pedestrian improvements make short station access safer and more convenient. The increase in walking trips and bus trips in SCA and SCB suggests that TOD accessibility is distributed across multiple access modes, not only rail boardings.

The FAR results explain why land-use policy matters. Transport scenarios affect accessibility, but the land-use response remains constrained by existing land patterns and allowable development capacity. FAR policy expands the allowable floor area in selected zones, allowing additional residential and commercial activities to be located near transit. This mechanism is especially important in CWG because the area is dominated by government office land. Without connecting the station to the opposite residential and commercial side, the government center remains a mono-functional activity center rather than a complete TOD area.

MTT and CWG also illustrate that TOD typologies require different strategies. MTT already has a mixed-use base, including residential, commercial, market, office, and MICE activities. The TOD strategy for MTT should focus on managing density, pedestrian circulation, feeder integration, and station-area development around the spur. CWG has a different problem: it has strong employment concentration but weak residential and commercial diversity within the core government land. The strategy should therefore connect the office core to nearby residential and commercial areas and use FAR policy selectively where redevelopment is possible.

For planning agencies, the model provides a way to test policy packages rather than isolated projects. A rail-only scenario can be compared with feeder, pedestrian, and FAR scenarios using the same model structure. This helps agencies identify whether a proposed TOD policy affects mode choice, consumer surplus, land consumption, and land-use composition. It also supports coordination between transport agencies, local governments, land-use planning authorities, and area developers.

The practical policy implication is that MRT Pink Line station-area planning should combine four elements. First, feeder services should connect activity centers and residential areas to stations, especially in zones where walking distance is too long. Second, pedestrian improvement should be treated as a transport investment, not merely an urban-design add-on. Third, FAR and mixed-use zoning should be applied in target areas where development capacity can support TOD. Fourth, government-owned or institutionally constrained land should be planned together with surrounding private or mixed-use land, so that the functional TOD area is not limited by parcel ownership.

The model also has limitations. TRANUS is a strategic LUTI model and should not be interpreted as a detailed microsimulation of intersections, signal operations, or building-level development. The model depends on assumptions about sector structure, land prices, travel costs, vehicle availability, and scenario design. Full sensitivity analysis of parameters such as VOT, VWT, development capacity, and land-price response would strengthen future research. In addition, the model focuses on selected corridors and target-area effects rather than a full metropolitan rail network.

Future research should expand the model to include a larger rail network and additional station typologies. It should also test affordability and equity mechanisms, including whether low-income households can remain in station areas after land-value increases. A more detailed sensitivity analysis can be used to compare alternative FAR values, feeder frequencies, walking-network investments, and parking policies. Combining LUTI outputs with microsimulation can also help evaluate the operational implications of station-area traffic circulation.

8. Conclusions

This paper revised and expanded the application of a LUTI model using TRANUS to assess TOD potential along the MRT Pink Line corridor. The study focused on Chaeng Watthana Government Center and Muang Thong Thani because these areas represent two distinct TOD challenges: a specialized government activity center and a mixed-use, city-center-style district. The model translates TOD concepts into quantitative outputs covering density, diversity, accessibility, consumer surplus, land consumption, and travel demand.

The results show that improvements to transport infrastructure and access produce clear effects on travel behavior. Compared with BAU2030, feeder services reduce car trips by about 15.0%, while feeder services plus pedestrian improvements reduce car trips by about 16.4%. Walking trips and bus trips increase substantially, and rail and feeder trips become part of the modal structure. These results confirm that the MRT Pink Line should be supported by local access systems if it is expected to shift travelers away from private cars.

However, the results also show that transport infrastructure alone does not automatically restructure land use. Whole-area density and diversity indicators change only modestly in the rail, feeder, and pedestrian scenarios. In contrast, the FAR policy scenario has strong effects in target TOD areas. Residential floor area increases by 48.0% in MTT and 187.1% in CWG, while commercial floor area also increases, especially in CWG. This confirms that

land-use regulation is necessary to convert accessibility improvement into TOD-supportive development.

The key policy message is that TOD implementation in Thailand should be planned as an integrated package. Rail investment should be combined with feeder service, pedestrian infrastructure, mixed-use zoning, FAR policy, and station-area circulation design. The package should be tailored to the local context: MTT requires managing mixed-use growth around the Pink Line spur, while CWG requires integrating the government office core with surrounding residential and commercial areas.

The study demonstrates that TRANUS can support strategic TOD assessment in Thai corridors by linking transport engineering and land-use planning. It cannot replace detailed urban design, financial feasibility, or microsimulation, but it provides a quantitative framework for comparing policy packages and identifying where rail investment must be complemented by land-use measures. The approach can be extended to other station areas and corridors in Bangkok and other Thai cities.

References

- [1] Iamtrakul P, Padon A, and Klaylee J. Measuring spatializing inequalities of transport accessibility and urban development patterns: focus on megacity urbanization, Thailand. *Journal of Regional and City Planning* 2022;33(3):345-66. doi: 10.5614/jpwk.2022.33.3.4.
- [2] Kii M, Vichiensan V, Llorca C, Moreno A, Moeckel R, Hayashi Y. Impact of decentralization and rail network extension on future traffic in the Bangkok Metropolitan Region. *Sustainability* 2021;13(23):13196. doi: 10.3390/su132313196.
- [3] Ayaragarnchanakul E, Creutzig F. Bangkok's locked-in traffic jam: price congestion or regulate parking. *Case Studies on Transport Policy* 2022;10(1):365-78. doi: 10.1016/j.cstp.2021.12.016.
- [4] Department of Rail Transport. Mass Rapid Transit master plan in Bangkok Metropolitan Region 2 [internet]. Bangkok: Department of Rail Transport; 2024 [cited 2024 Aug 7]. Available from: <https://www.otp.go.th/post/view/1657>.
- [5] Ahmadzai F. Analyses and modeling of urban land use and road network interactions using spatial-based disaggregate accessibility to land use. *Journal of Urban Management* 2020;9(3):298-315. doi: 10.1016/j.jum.2020.06.003.

- [6] Salas-Olmedo MH, Wang Y, Alonso A. Assessing accessibility with local coefficients for the LUTI model MARS. *Computers, Environment and Urban Systems* 2017;64:194-203. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.02.004.
- [7] Zhong S, Wang S, Jiang Y, Yu B, Zhang W. Distinguishing the land use effects of road pricing based on urban form attributes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 2015;74:44-58. doi: 10.1016/j.tra.2015.02.009.
- [8] Furlan R, Petruccioli A, Major MD, Zaina S, Zaina S, Al Saeed M, et al. The urban regeneration of west-bay business district of Doha (State of Qatar): a transit-oriented development enhancing livability. *Journal of Urban Management* 2019;8(1):126-44. doi: 10.1016/j.jum.2018.10.001.
- [9] Thomas R, Bertolini L. Defining critical success factors in TOD implementation using rough set analysis. *Journal of Transport and Land Use* 2017;10(1):139-54. doi: 10.5198/jtlu.2015.513.
- [10] Cervero R, Kockelman K. Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 1997;2(3):199-219. doi: 10.1016/S1361-9209(97)00009-6.
- [11] Kamruzzaman M, Shatu FM, Hine J, Turrell G. Commuting mode choice in transit oriented development: disentangling the effects of competitive neighbourhoods, travel attitudes, and self-selection. *Transport Policy* 2015;42:187-96. doi: 10.1016/j.tranpol.2015.06.003.
- [12] Lo Feudo F. How to build an alternative to sprawl and auto-centric development model through a TOD scenario for the North-Pas-de-Calais region: lessons from an integrated transportation-land use modelling. *Transportation Research Procedia* 2014;4:154-77. doi: 10.1016/j.trpro.2014.11.013.
- [13] Vichiensan V. Integrated approach to analyze land-use transport and environment in Bangkok: case studies of railway impact and TRANUS application [internet]. 2006. [cited 2023 Feb 4] Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integrated-Approach-to-Analyze-Land-Use-Transport-%3A-Vichiensan/6077305b6fb2bd7fab1fa1a1b60dc011537275f5>.
- [14] Vale DS, Viana CM, Pereira M. The extended node-place model at the local scale: evaluating the integration of land use and transport for Lisbon's subway network. *Journal of Transport Geography* 2018;69:282-93. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2018.05.004.

- [15] Abdullah J, Mazlan MH. Characteristics of and quality of life in a transit oriented development (TOD) of Bandar Sri Permaisuri, Kuala Lumpur. Procedia - Social and Behavioral Sciences 2016;234:498-505. doi: 10.1016/j.sbspro.2016.10.268.
- [16] Zhou J, Yang Y, Gu P, Yin L, Zhang F, Zhang F, et al. Can TODness improve expected performances of TODs? An exploration facilitated by non-traditional data. Transportation Research Part D: Transport and Environment 2019;74:28-47. doi: 10.1016/j.trd.2019.07.008.
- [17] Renne J, Voorhees A, Bloustein E, Jenks C. Transit-oriented development: developing a strategy to measure success. Washington (DC): National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; 2005.

Author's Profile



Sikkawat Sukhumaumnuychai, received B.Eng. degree in Civil Engineering from Mahidol University in 2018. He is currently studying in M.Eng. degree program in Railway Transportation Engineering at Faculty of Engineering, Mahidol University.

Article History:

Received: February 26, 2026

Revised: August 20, 2026

Accepted: August 24, 2026

**การศึกษาพฤติกรรมการเดินทางของผู้ใช้บริการทางพิเศษ
กรณีการกำหนดค่าผ่านทางตามช่วงเวลา
DISCRETE CHOICE MODELS OF TRAVEL BEHAVIOR OF
EXPRESSWAY IN TIME-OF-DAY PRICING**

แสงระวี ต้นงาม¹ และ เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช²

¹นักศึกษา, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาคาร 89 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800,
s6401081856128@email.kmutnb.ac.th

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

Saengravee Ton-ngam¹ 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, Thailand, s6401081856128@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, Thailand, terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาเดินทางของผู้ใช้ทางพิเศษ และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเลือกช่วงเวลาในการเดินทาง กรณีกำหนดค่าผ่านทางตามช่วงเวลา (Time-of-Day Pricing) พื้นที่การศึกษาบริเวณด่านประชาชื่น (ขาเข้า) บนทางพิเศษศรีรัช ซึ่งเป็นจุดที่มีปริมาณจราจรหนาแน่นและมีอัตราค่าผ่านทางสูง โดยศึกษาพฤติกรรมการเดินทางผ่านการสำรวจแบบสอบถามความพึงพอใจจากสถานการณ์สมมติ (Stated Preference Survey) จากกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้รถยนต์ 4 ล้อ จำนวน 469 ราย และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองการเลือกแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Choice Model) ประเภทโลจิตพหุนาม (Multinomial Logit Model: MNL) ผลการศึกษา พบว่า ตัวแปรด้านเวลาเดินทาง ค่าผ่านทาง และเวลาในการทำงาน มีผลต่อการเลือกช่วงเวลาเดินทางอย่างมีนัยสำคัญ และจากการวิเคราะห์พบว่า

ในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (06.01 – 09.00 น.) นั้น ผู้เดินทางที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนเวลาในการเดินทางได้เนื่องจากเงื่อนไขเวลาการทำงาน คิดเป็นร้อยละ 42.22 ในขณะที่กลุ่มที่สามารถปรับเปลี่ยนเวลาการเดินทางได้ คิดเป็นร้อยละ 10.07 ซึ่งจำแนกได้ 2 กลุ่มย่อย คือ การเปลี่ยนไปเลือกเดินทางในช่วง Pre-peak (04.00 – 06.00 น.) และช่วง Post-peak (09.01 – 12.00 น.) คิดเป็นร้อยละ 4.08 และ 5.99 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การกำหนดราคาตามช่วงเวลา, แบบจำลองโลจิตพหุนาม, ทางพิเศษ, ทฤษฎีอรรถประโยชน์

ABSTRACT

This research aims to investigate the travel time choice behavior of expressway users and to analyze the factors influencing changes in travel time choice behavior under a Time-of-Day Pricing scheme. The study area is the Prachachuen Toll Plaza (inbound) on the Si Rat Expressway, which is characterized by heavy traffic congestion and relatively high toll rates. Travel behavior was investigated using a Stated Preference (SP) survey based on hypothetical scenarios involving 469 four-wheel vehicle users. The collected data were analyzed using a Discrete Choice Model, specifically the Multinomial Logit Model (MNL). The results indicate that travel time, toll fare, and work time significantly influence users' choices of travel periods. The analysis further reveals that, during the morning peak period (06:01–09:00), 42.22% of travelers were unable to adjust their travel time due to work schedule constraints, whereas 10.07% were able to shift their travel time. The latter group can be further classified into two subgroups based on their preferred alternative travel periods: shifting to the Pre-peak period (04:00–06:00) and shifting to the Post-peak period (09:01–12:00), accounting for 4.08% and 5.99%, respectively.

KEYWORDS: Time-of-Day Pricing, Multinomial Logit (MNL), Expressway, Utility Theory

1. บทนำ

ปัญหาการจราจรติดขัดในพื้นที่กรุงเทพมหานครกระทบต่อเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของประชาชน แม้ภาครัฐจะเร่งขยายโครงข่ายทางพิเศษเพื่อเพิ่มความจุจราจร แต่หลังสถานการณ์โควิด-19 ปริมาณความต้องการเดินทางที่ฟื้นตัวอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการจราจรติดขัดหนาแน่นขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยเฉพาะบริเวณหน้าด่านและจุดตัดกระแสจราจร การเพิ่มโครงสร้างพื้นฐานเพื่อเพิ่มความจุจราจรเพียงอย่างเดียวจึงยังไม่เพียงพอต่อปัญหาที่

เกิดขึ้น แนวทางการแก้ปัญหาอีกด้านคือการบริหารจัดการการจราจรอย่างมีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการกำหนดค่าผ่านทางแปรผันตามช่วงเวลา (Time-of-Day Pricing) ซึ่งใช้กลไกราคาเป็นเครื่องมือหลักในการจูงใจให้ผู้ใช้งานปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการเดินทาง เพื่อลดความกระจุกตัวและกระจายปริมาณจราจรไปสู่ช่วงเวลาที่มีความจุรองรับได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมของผู้ใช้บริการทางพิเศษในการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาเดินทาง ทั้งในช่วงเวลาเร่งด่วนและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน ภายใต้สถานการณ์สมมติที่มีการปรับอัตราค่าผ่านทางแบบผันแปรตามเวลาจากแบบสอบถามการเลือกเส้นทางหรือรูปแบบการเดินทาง (Stated Preference) ภายใต้สมมติฐานการกำหนดราคาในช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak Hour) สูงกว่านอกช่วงเวลาเร่งด่วน (Off Peak) หรือการให้ส่วนลดค่าผ่านทางนอกช่วงเวลาเร่งด่วน และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมในการเลือกช่วงเวลาเดินทางของผู้ใช้งาน

2. ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมในส่วนนี้เป็นการรวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาทัศนคติและพฤติกรรมในการเดินทาง ในกรณีที่มีการปรับค่าผ่านทางตามช่วงเวลา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การจัดเก็บค่าผ่านทาง

การจัดเก็บค่าผ่านทางมีกรอบแนวคิดในการกำหนดอัตราค่าผ่านทาง 3 รูปแบบ ได้แก่

1) การจัดเก็บค่าผ่านทางแบบอัตราคงที่ (Flat Rate) เป็นการเรียกเก็บค่าผ่านทางในอัตราเดียวคงที่ตลอดสายทาง ณ ด้านเก็บค่าผ่านทางที่กำหนด โดยไม่คำนึงถึงระยะทางที่เดินทางจริง

2) การจัดเก็บค่าผ่านทางตามระยะทาง (Distance Based Pricing) เป็นการเรียกเก็บค่าผ่านทางตามระยะทางที่เดินทางจริง

3) การจัดเก็บค่าผ่านทางตามช่วงเวลา (Time-of-Day / Dynamic Pricing) เป็นการเรียกเก็บค่าผ่านทางตามช่วงเวลา เช่น คิดอัตราสูงในช่วงเวลาเร่งด่วน และปรับลดราคาลงในช่วงเวลาปกติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้มาดราการด้านราคาเป็นแรงจูงใจในการกระจายปริมาณจราจรในช่วงเวลาที่หนาแน่นไปยังช่วงเวลาอื่น

จากกรอบแนวคิดในการกำหนดอัตราค่าผ่านทางข้างต้น กรมทางหลวงได้จำแนกรูปแบบการจัดเก็บค่าผ่านทางตามลักษณะของระบบเป็น 2 ระบบหลัก [1] ดังนี้

1) ระบบเปิด (Opened System) เป็นการจัดเก็บค่าผ่านทางที่มีด้านเก็บค่าผ่านทาง ณ ทางเข้าสู่ระบบ รูปแบบนี้ใช้แนวคิดการจัดเก็บค่าผ่านทางแบบอัตราคงที่หรืออัตราเดียว (Flat Rate)

2) ระบบปิด (Closed System) เป็นการจับเก็บค่าผ่านทางที่มีการควบคุมการเข้า – ออกอย่างเต็มรูปแบบ มีด่านฯ ควบคุมทุก ๆ ทางเข้า - ออก โดยต้องรับบัตรที่ด่านทางเข้าเพื่อเข้าใช้บริการทางพิเศษและต้องคืนบัตรที่ด่านทางออก พร้อมจ่ายค่าผ่านทางตามระยะทางที่ใช้จริง ระบบนี้ใช้แนวคิดรูปแบบการจับเก็บค่าผ่านทางตามระยะทาง (Distance Based Pricing)

สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้รูปแบบการกำหนดอัตราค่าผ่านทาง 2 รูปแบบ ได้แก่ อัตราคงที่ และการจับเก็บตามระยะทาง ในขณะที่รูปแบบการจับเก็บค่าผ่านทางตามช่วงเวลา ยังไม่มีการนำมาใช้อย่างเป็นรูปธรรมในโครงข่ายทางพิเศษของประเทศ

2.2 การสำรวจข้อมูลแบบ Stated Preference (SP)

การสำรวจ SP คือการสำรวจข้อมูลจากสถานการณ์ที่ยังไม่เกิดขึ้นจริง เป็นการจำลองสถานการณ์ในอนาคตเพื่อให้ผู้เดินทางตอบแบบสอบถามที่ตรงกับความคิดเห็นมากที่สุด ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับการสำรวจเมื่อรูปแบบการเดินทางนั้น ๆ ยังไม่เกิดขึ้น หรือหากเกิดขึ้นแล้วจะเป็นการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ที่ต่างจากสถานการณ์จริง วิธีการนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปร เช่น เวลาเดินทาง และค่าผ่านทาง ต่อการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาเดินทางได้อย่างเป็นระบบ [2]

2.3 ทฤษฎีและสมการสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 ทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Function)

การวิเคราะห์การตัดสินใจของผู้เดินทางจากทฤษฎีอรรถประโยชน์ (Utility Theory) เป็นทฤษฎีที่นิยมใช้ในการศึกษาการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทาง โดยทฤษฎีนี้กำหนดสมมติฐานในการเดินทางไม่ว่าด้วยวิธีใดก็ตาม ผู้เดินทางจะได้รับอรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจจากการเดินทางมากน้อยแตกต่างกันไป ทั้งนี้การตัดสินใจว่าจะเดินทางด้วยรูปแบบใดนั้น ผู้เดินทางจะเลือกรูปแบบที่จะก่อให้เกิดอรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจสูงสุด [3] ดังแสดงในสมการที่ 1

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in} \quad (1)$$

โดยที่ U_{in} คือ อรรถประโยชน์หรือความพึงพอใจของผู้เดินทางคนที่ n จะได้รับจากการเดินทางด้วยรูปแบบการเดินทางที่ i

V_{in} คือ ส่วนที่สามารถวัดอรรถประโยชน์ได้แน่นอน

ε_{in} คือ ส่วนที่ไม่สามารถวัดอรรถประโยชน์ได้อย่างแน่นอน

ส่วนที่วัดได้ V_{in} มักถูกเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ของคุณสมบัติทางเลือกและลักษณะส่วนบุคคล ดังสมการที่ 2

$$U_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_{in1} + \beta_2 X_{in2} + \dots + \beta_n X_{ink} \quad (2)$$

โดยที่ β_0 คือ ค่าคงที่

β_i คือ สัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงผลกระทบของตัวแปรแต่ละตัว

X_{ink} คือ ตัวแปรอธิบาย (เช่น เวลาเดินทาง, ค่าผ่านทาง, รายได้, เพศ, อายุ, สถานะการทำงาน, ความยืดหยุ่นในการเดินทาง เป็นต้น)

2.3.2 แบบจำลองโลจิต (Logit Model)

การศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลองโลจิตเชิงพหุ (Multinomial Logit Model) ซึ่งเป็นเครื่องมือในกลุ่ม Discrete Choice Model เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมการตัดสินใจเลือกรูปแบบการเดินทางที่มีมากกว่า 2 ทางเลือก โดยแบบจำลองจะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าอรรถประโยชน์ (Utility) ให้เป็นค่าความน่าจะเป็น (Probability) ตามหลักการเลือกทางเลือกที่ให้ความพึงพอใจสูงสุด เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติที่แม่นยำ โดยความน่าจะเป็นที่บุคคล n จะเลือกทางเลือก i จากกลุ่มทางเลือกทั้งหมด j สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$P_n(i) = \frac{e^{U_{in}}}{\sum_{j=1}^n e^{U_{jn}}} \quad (3)$$

โดยที่ $P_n(i)$ คือ ความน่าจะเป็นที่บุคคล n จะเลือกทางเลือก i

U_{in} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่วัดได้ (Observable Utility) ของทางเลือก i

U_{jn} คือ ส่วนของอรรถประโยชน์ที่วัดได้ของทางเลือกอื่นๆ ทั้งหมดในกลุ่มทางเลือก j

e คือ ค่าคงที่ทาง (Exponential) มีค่าประมาณ 2.718

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2002 Burris and Pendyala [4] ได้ศึกษาแบบจำลองการเลือกแบบไม่ต่อเนื่องของการมีส่วนร่วมของผู้เดินทาง โครงการกำหนดค่าผ่านทางที่แตกต่างตามช่วงเวลาของวัน งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาจากสะพาน 2 แห่งที่มีอัตราค่าผ่านทางแตกต่างกันตามช่วงเวลา ในเขต Lee County รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจการเดินทาง และทำการประมาณแบบจำลองการเลือก (Discrete Choice Models) เพื่อวิเคราะห์การตอบสนองของ

ผู้เดินทางต่ออัตราค่าผ่านทางที่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่า ผู้เดินทางที่เกษียณแล้ว มีรายได้ น้อย มีความยืดหยุ่นในสถานที่ทำงาน หรือมีตารางเวลาการเดินทางที่ยืดหยุ่น มีแนวโน้มที่จะปรับเปลี่ยนช่วงเวลาเดินทางได้มากกว่าเนื่องจากค่าผ่านทางที่แปรผัน

ในปี ค.ศ. 2020 Li et al [5] ได้ทบทวนพัฒนาการของแบบจำลองคอขวดจราจร (Bottleneck Model) ผลการศึกษา พบว่า แบบจำลองคอขวดถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมทางเลือก เวลาเดินทาง การจัดการความแออัดของจราจร และการกำหนดมาตรการด้านราคา เช่น Congestion Pricing และ Dynamic Pricing อย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ ยังชี้ให้เห็นว่ามาตรการ ด้านราคาสามารถช่วยกระจายปริมาณการเดินทางออกจากช่วงเวลาเร่งด่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้มาตรการด้านราคาเป็นเครื่องมือสำคัญในการลดความแออัดและกระจายปริมาณการเดินทาง ออกจากช่วงเวลาเร่งด่วน ควรคำนึงถึงความแตกต่างของพฤติกรรมผู้เดินทางและข้อจำกัด ด้านเวลาในการเดินทางของแต่ละบุคคลควบคู่กันไป

ในปี ค.ศ. 2024 Maychaipume and Rungjang [6] ได้ศึกษาแบบจำลองโลจิสติกส์สำหรับ พฤติกรรมทางเลือกรูปแบบการเดินทางและการประยุกต์ใช้สำหรับการเดินทางท่องเที่ยวสู่ ภูเขาดงวันออก โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองโลจิสติกส์เพื่อวิเคราะห์การเลือกรูปแบบการเดินทางสำหรับการ เดินทางท่องเที่ยวไปยังภูเขาดงวันของประเทศไทย และวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ หลากหลาย เช่น ลักษณะการให้บริการของรูปแบบการขนส่งต่าง ๆ ข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคม เป็นต้น โดยดำเนินการสำรวจแบบสอบถาม (Stated Preference :SP) ของผู้เดินทางจำนวน 405 คน ผลการศึกษา พบว่า ราคาค่าโดยสารและความถี่ในการให้บริการเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการ เลือกใช้รถโดยสารประจำทาง ขณะที่เวลาเดินทางเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเลือกใช้รถไฟฟ้าความเร็วสูง นอกจากนี้ ยังพบว่าผู้สูงอายุมีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ส่วนบุคคลมากกว่าระบบขนส่งสาธารณะ ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดนโยบายและการปรับปรุงการ ให้บริการระบบขนส่งสาธารณะ โดยเฉพาะการพัฒนาระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงและการออกแบบ สิ่งอำนวยความสะดวกให้รองรับสังคมผู้สูงอายุได้อย่างเหมาะสม

3. วิธีการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาบริเวณด้านเก็บค่าผ่านทางประชาชื่น (ขาเข้า) บนทางพิเศษศรีรัช เนื่องจากเป็น ด้านที่มีปริมาณจราจรสะสมและประสบปัญหาคอขวดในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า ประกอบกับมีอัตราค่า ผ่านทางเริ่มต้นที่สูงเมื่อเทียบกับด้านอื่น ๆ ประชากรเป้าหมายคือผู้ขับขีรถยนต์ส่วนบุคคล 4 ล้อ ที่ใช้บริการผ่านด่านดังกล่าว โดยอ้างอิงปริมาณจราจรเฉลี่ย 47,058 คันต่อวัน ผู้วิจัยได้กำหนด ขนาดกลุ่มตัวอย่างขั้นต่ำด้วยสูตรทางสถิติของ Yamane ที่ระดับความคลาดเคลื่อนร้อยละ 5 ซึ่ง

คำนวณขนาดตัวอย่างขั้นต่ำได้ที่ 397 ตัวอย่าง เพื่อให้ผลการศึกษามีความน่าเชื่อถือทางสถิติและสามารถเป็นตัวแทนของประชากรได้

3.2 การออกแบบแบบสำรวจพฤติกรรมการเดินทาง (SP Survey)

ตัวแปรสำคัญที่ใช้ออกแบบแบบสอบถาม SP คือ ค่าผ่านทาง (Toll) และเวลาในการเดินทาง (Travel Time) ประยุกต์ใช้แนวคิดค่าผ่านทางผันแปร (Variable Pricing) ในช่วงเร่งด่วน (Peak: 06.01 – 09.00 น.) ที่ราคา 60 บาท และทดสอบการให้ส่วนลดร้อยละ 25 และ 50 ในช่วงก่อนและหลังเร่งด่วน (Pre/Post-Peak) ซึ่งอ้างอิงกับมาตรการการให้ส่วนลดค่าผ่านทางของการทางพิเศษแห่งประเทศไทยบริเวณด่านอจาณรงค์ (บางนา) และด่านพระราม 9-1 (ฉลองรัช)

สำหรับการประมาณเวลาเดินทางผู้วิจัยใช้ข้อมูล Real-time จาก Google Maps โดยกำหนดจุดเริ่มต้นที่ทางขึ้นแจ้งวัฒนะ ไปยังทางลง 2 เส้นทาง คือ ทางลงสาทร (ระยะทาง 22 กม.) และทางลงอโศก (ระยะทาง 20 กม.) โดยทั้งสองเส้นทางนี้ใช้เวลาเดินทางใกล้เคียงกัน โดยในช่วงเร่งด่วน (Peak) ใช้เวลาเดินทาง 40 – 60 นาที และช่วงนอกเร่งด่วน (Off-Peak) ใช้เวลาเดินทาง 30 – 40 นาที ทั้งนี้ หากผสมผสานตัวแปรแบบเต็มรูปแบบจากตารางที่ 1 จะเกิดสถานการณ์จำลองสูงถึง 32 สถานการณ์ ซึ่งอาจสร้างความสับสนแก่ผู้ตอบแบบสอบถาม ผู้วิจัยจึงใช้วิธี Fractional Factorial Design [7] ผ่านโปรแกรม R คัดเลือกจนเหลือเพียง 8 สถานการณ์ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ระดับคุณสมบัติ (Attribute levels) สำหรับการสำรวจด้วยวิธี SP

ระดับ	ค่าผ่านทาง (บาท)	เวลาเดินทาง (นาที)
ช่วงเร่งด่วน Pea 06.01 – 09.00 น.		
0	60	40
1	60	60
นอกช่วง Peak		
ก่อนช่วงเร่งด่วน Pre-Peak 04.00 – 06.00 น., หลังช่วงเร่งด่วน Pre-Peak 09.01 – 12.00 น.		
0	30 (-50%)	30
1	45 (-25%)	40

จากตารางที่ 1 กำหนดระดับคุณสมบัติ (Attribute Levels) จำนวน 2 ระดับ ได้แก่ ระดับ 0 และ 1 เพื่อใช้เป็นตัวแทนของสถานการณ์สมมุติสำหรับตัวแปรค่าผ่านทางและเวลาเดินทางที่แตกต่างกัน โดยระดับดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการออกแบบชุดทางเลือก (Choice Sets) สำหรับการจัดทำแบบสอบถาม Stated Preference (SP)

ตารางที่ 2 สถานการณ์จำลองสำหรับการสำรวจด้วยวิธี SP

หน่วย : เวลาเดินทาง (นาที) และค่าผ่านทาง (บาท)

สถานการณ์ ที่	ก่อนช่วงเร่งด่วน 04.00 – 06.00 น.		ช่วงเร่งด่วน 06.01 – 09.00 น.		หลังช่วงเร่งด่วน 09.01 – 12.00 น.	
	เวลา เดินทาง	ค่าผ่านทาง	เวลา เดินทาง	ค่าผ่านทาง	เวลา เดินทาง	ค่าผ่านทาง
1	40	45	40	60	40	30
2	40	45	60	60	30	30
3	30	45	60	60	40	45
4	30	30	60	60	40	30
5	30	45	40	60	30	45
6	40	30	60	60	30	45
7	30	30	40	60	30	30
8	40	30	40	60	40	45

จากตารางที่ 2 แสดงผลการออกแบบชุดทางเลือก (Choice Sets) ด้วยโปรแกรม R ซึ่งได้สร้างสถานการณ์จำลอง 8 สถานการณ์ จากการผสมผสานระดับของตัวแปรในตารางที่ 1 ของตัวแปรค่าผ่านทางและเวลาในการเดินทางในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำไปใช้สำหรับการสำรวจความคิดเห็นและพฤติกรรมการตัดสินใจเดินทางของกลุ่มตัวอย่างด้วยวิธี SP

4. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจกลุ่มตัวอย่างผู้ใช้รถยนต์ 4 ล้อ จำนวน 469 ราย โดยสามารถสรุปสาระสำคัญตามหัวข้อที่กำหนดได้ดังนี้

4.1 ผลสำรวจข้อมูลด้านเศรษฐกิจและสังคม (Socio-economic Characteristics)

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 31 – 40 ปี ร้อยละ 31.98 รองลงมาคือช่วงอายุ 41 – 50 ปี ร้อยละ 26.01 ซึ่งเป็นกลุ่มประชากรวัยทำงาน โดยพบว่าส่วนใหญ่เลือกเดินทางในช่วงเวลาเร่งด่วนเป็นหลัก ขณะที่ผู้ตอบแบบสอบถามที่มีอายุมากกว่า 60 ปี สัดส่วนร้อยละ 12.79 มีแนวโน้มเลือกเดินทางในช่วงหลังเวลาเร่งด่วนมากที่สุดโดยมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 81.67 ระดับการศึกษาและอาชีพส่วนใหญ่จบปริญญาตรี ร้อยละ 60.13 และประกอบอาชีพพนักงานบริษัท ร้อย

ละ 41.58 ซึ่งเป็นกลุ่มพนักงานประจำหรือพนักงานบริษัทที่มีข้อจำกัดเรื่องเวลาทำงานที่แน่นอน ทำให้มีความกระจุกตัวเดินทางในช่วงเวลาเร่งด่วนสูงถึงร้อยละ 59.49

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีรายได้ 30,001 – 50,000 บาท มีสัดส่วนสูงสุดร้อยละ 34.75 โดยผู้มีรายได้สูงตั้งแต่ 30,000 บาทขึ้นไป เลือกเดินทางช่วงหลังเวลาเร่งด่วนมากกว่าช่วงเวลาอื่น คิดเป็นร้อยละ 58.05 ส่วนกลุ่มที่มีรายได้ต่ำกว่า 30,000 บาท ส่วนใหญ่เลือกเดินทางในช่วงเวลาเร่งด่วน คิดเป็นร้อยละ 52.00 โดยความยืดหยุ่นของเวลาทำงานเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนพฤติกรรม ผู้ที่มีความยืดหยุ่นร้อยละ 60.34 ส่วนใหญ่เลือกเดินทางช่วงหลังเวลาเร่งด่วนกว่าร้อยละ 56.18

4.2 ผลสำรวจข้อมูลด้านพฤติกรรมการเดินทาง

ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เลือกเดินทางในช่วงหลังเวลาเร่งด่วน (09.01 – 12.00 น.) มากที่สุด จำนวน 256 คน คิดเป็นร้อยละ 51.39 รองลงมาคือช่วงเวลาเร่งด่วน (06.01 – 09.00 น.) จำนวน 226 คน คิดเป็นร้อยละ 42.22 และช่วงก่อนเวลาเร่งด่วน (04.00 – 06.00 น.) จำนวน 32 คน มีสัดส่วนน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 6.40 และผู้ตอบแบบสอบถามเกินกว่าครึ่ง ร้อยละ 51.81 ใช้ทางพิเศษเป็นประจำ และส่วนใหญ่เลือกเดินทางในช่วงเวลาเร่งด่วน ร้อยละ 50.62 รองลงมาคือเดินทางหลังช่วงเร่งด่วน ร้อยละ 41.15 โดยวัตถุประสงค์ของการเดินทางหลักคือ การเดินทางไปทำงาน (Commute Trip) ซึ่งมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 58.42 กลุ่มที่เดินทางไปทำงานนี้มีพฤติกรรมการเดินทางกระจุกตัวในช่วงเวลาเร่งด่วนสูงถึงร้อยละ 54.01 เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาทำงานที่แน่นอน ส่วนวัตถุประสงค์อื่นๆ เช่น การท่องเที่ยว ร้อยละ 13.86 และการไปเยี่ยมญาติ ร้อยละ 6.18 เลือกเดินทางในช่วงหลังเวลาเร่งด่วนเป็นหลัก

กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่ใช้ทางพิเศษความถี่ 2 – 5 วันต่อสัปดาห์ คิดเป็นร้อยละ 41.15 โดยเลือกเดินทางในช่วงเวลาเร่งด่วนร้อยละ 54.40 รองลงมาคือเดินทาง 1 วันต่อสัปดาห์ ร้อยละ 26.23 โดยเลือกเดินทางหลังช่วงเวลาเร่งด่วนสูงถึงร้อยละ 64.23 ส่วนกลุ่มที่ใช้ประจำมากกว่า 5 วันต่อสัปดาห์คิดเป็นร้อยละ 13.65 ซึ่งกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เลือกเดินทางในช่วงเร่งด่วนร้อยละ 51.56 และการชำระค่าผ่านทางนิยมใช้ระบบอัตโนมัติ (Easy Pass/ETC) มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 55.22

ตารางที่ 3 ผลการสำรวจข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม และพฤติกรรมการเดินทางจำแนกตามช่วงเวลาการเดินทาง

ข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม/ พฤติกรรมการเดินทาง	ก่อนช่วงเวลา เร่งด่วน 04.01 - 06.00 น.	ช่วงเร่งด่วน 06.01 - 09.00 น.	หลังช่วงเวลา เร่งด่วน 09.01 - 12.00 น.	%
จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	30 (6.40%)	198 (42.22%)	241 (51.39%)	469
ส่วนที่ 1 : ข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม				
1.1 อายุ				
(1) ต่ำกว่า 20 ปี		100.00%		0.21%
(2) 20 – 30 ปี	14.29%	44.29%	41.43%	14.93%
(3) 31 – 40 ปี	4.00%	46.00%	50.00%	31.98%
(4) 41 - 50 ปี	4.92%	53.28%	41.80%	26.01%
(5) 51 – 60 ปี	7.58%	36.36%	56.06%	14.07%
(6) มากกว่า 60 ปี	5.00%	13.33%	81.67%	12.79%
1.2 ระดับการศึกษา				
(1) มัธยมศึกษาตอนปลายหรือ ต่ำกว่า	12.90%	22.58%	64.52%	6.61%
(2) ปวส/ปวช.	7.41%	38.27%	54.32%	17.27%
(3) ปริญญาตรี	6.03%	44.68%	49.29%	60.13%
(4) ปริญญาโท	4.92%	40.98%	54.10%	13.01%
(5) ปริญญาเอก		64.29%	35.71%	2.99%
1.3 อาชีพ				
(1) นักเรียน/นักศึกษา	50.00%	50.00%		0.85%
(2) ข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจ	8.79%	31.87%	59.34%	19.40%
(3) พนักงานบริษัท	4.62%	59.49%	35.90%	41.58%
(4) อาชีพอิสระ	4.11%	38.36%	57.53%	15.57%
(5) เจ้าของกิจการ	8.33%	22.92%	68.75%	20.47%
(6) อื่นๆ โปรดระบุ_____		10.00%	90.00%	2.13%

ตารางที่ 3 ผลการสำรวจข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม และพฤติกรรมการเดินทางจำแนกตามช่วงเวลาการเดินทาง (ต่อ)

ข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม/ พฤติกรรมการเดินทาง	ก่อนช่วงเวลา เร่งด่วน 04.01 - 06.00 น.	ช่วงเร่งด่วน 06.01 - 09.00 น.	หลังช่วงเวลา เร่งด่วน 09.01 - 12.00 น.	%
จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	30 (6.40%)	198 (42.22%)	241 (51.39%)	469
1.4 รายได้ต่อเดือน				
(1) ต่ำกว่า 10,000 บาท	50.00%	25.00%	25.00%	0.85%
(2) 10,001 - 20,000 บาท	11.54%	42.31%	46.15%	5.54%
(3) 20,001 – 30,000 บาท	6.90%	54.48%	38.62%	30.92%
(4) 30,001 – 50,000 บาท	4.29%	43.56%	52.15%	34.75%
(5) 50,001 – 100,000 บาท	7.61%	30.43%	61.96%	19.62%
(6) 100,000 บาทขึ้นไป	2.56%	20.51%	76.92%	8.32%
1.5 เวลาในการทำงาน				
(1) พนักงานประจำ (Full Time)	5.91%	57.81%	36.29%	50.53%
(2) งานไม่เต็มเวลา (Part-Time)	5.88%	13.73%	80.39%	10.87%
(3) อาชีพอิสระ (Freelance)	7.81%	35.16%	57.03%	27.29%
(4) เกษียณอายุ (Retire)	2.13%	14.89%	82.98%	10.02%
(5) ว่างาน (Unemployed)	33.33%	33.33%	33.33%	1.28%
1.6 ความยืดหยุ่นเวลาทำงาน				
(1) มี	7.77%	36.04%	56.18%	60.34%
(2) ไม่มี	4.30%	51.61%	44.09%	39.66%
ส่วนที่ 2 : พฤติกรรมการเดินทาง				
2.1 เส้นทางประจำ				
(1) เสียค่าผ่านทาง	8.23%	50.62%	41.15%	51.81%
(2) ไม่เสียค่าผ่านทาง	4.42%	33.19%	62.39%	48.19%
2.2 การใช้บริการทางพิเศษ				
(1) เคย	6.03%	42.46%	51.51%	98.93%
(2) ไม่เคย	40.00%	20.00%	40.00%	1.07%

ตารางที่ 3 ผลการสำรวจข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม และพฤติกรรมการเดินทางจำแนกตามช่วงเวลาการเดินทาง (ต่อ)

ข้อมูลเศรษฐกิจและสังคม/ พฤติกรรมการเดินทาง	ก่อนช่วงเวลา เร่งด่วน 04.01 - 06.00 น.	ช่วงเร่งด่วน 06.01 - 09.00 น.	หลังช่วงเวลา เร่งด่วน 09.01 - 12.00 น.	%
จำนวนกลุ่มตัวอย่าง	30 (6.40%)	198 (42.22%)	241 (51.39%)	469
2.3 การใช้บริการช่องเก็บค่าผ่านทาง				
(1) เงินสด (cash/MTC)	7.43%	35.64%	56.93%	43.07%
(2) ระบบอัตโนมัติ (easy pass/ETC)	5.79%	47.10%	47.10%	55.22%
(3) บัตรเครดิตและบัตรเดบิต (VISA/Mastercard)		50.00%	50.00%	1.71%
2.4 ความถี่การใช้ทางพิเศษ				
(1) มากกว่า 5 วัน/สัปดาห์	12.50%	51.56%	35.94%	13.65%
(2) 2-5 วัน/สัปดาห์	5.18%	54.40%	40.41%	41.15%
(3) 1 วัน/สัปดาห์	1.63%	34.15%	64.23%	26.23%
(4) 1 วัน/เดือน	12.16%	18.92%	68.92%	15.78%
(5) อื่นๆ โปรดระบุ_____	6.67%	26.67%	66.67%	3.20%
2.5 วัตถุประสงค์ในการเดินทาง				
(1) เรียน	50.00%	25.00%	25.00%	0.85%
(2) ทำงาน	6.20%	54.01%	39.78%	58.42%
(3) ท่องเที่ยว	4.62%	30.77%	64.62%	13.86%
(4) เยี่ยมญาติ	6.90%	20.69%	72.41%	6.18%
(5) อื่นๆ โปรดระบุ_____	6.19%	23.71%	70.10%	20.68%

4.3 ผลการพัฒนาแบบจำลอง

4.3.1 แนวทางการพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลอง Multinomial Logit (MNL) ใช้เกณฑ์ทางสถิติหลายด้านเพื่อประเมินความเหมาะสม ความน่าเชื่อถือ และความสอดคล้องเชิงพฤติกรรมของแบบจำลองโดยสรุปเกณฑ์ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เกณฑ์การประเมินแบบจำลอง Multinomial Logit

ลำดับ	เกณฑ์การทดสอบ	วัตถุประสงค์	เกณฑ์ที่นิยมใช้	ความหมาย
1	ค่า t-statistic (Wald test) [8-9]	ทดสอบนัยสำคัญของพารามิเตอร์รายตัว	$ t \geq 1.96$ (ระดับ 0.05) หรือ ≥ 2.58 (ระดับ 0.01)	ระบุว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเลือกอย่างมีนัยสำคัญ
2	เครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ [10]	ตรวจสอบความสอดคล้องเชิงทฤษฎี	ต้องสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง	เช่น เวลาและค่าใช้จ่ายควรเป็นลบ
3	McFadden's Pseudo R^2 [11-12]	วัดความสามารถในการอธิบายพฤติกรรม	0.20–0.40 ถือว่าดีในงานคมนาคม	ใช้เปรียบเทียบแบบจำลอง

ประเภทของตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือพัฒนาแบบจำลอง MNL สามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

1) ตัวแปรตาม (Dependent Variable / Choice Variable) เป็นตัวแปรที่แสดงผลการตัดสินใจเลือกของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งต้องเป็นข้อมูลเชิงหมวดหมู่ (Categorical) มีทางเลือกทั้งหมด 3 ทางเลือก ได้แก่ ช่วงก่อนเร่งด่วน (04.00 – 06.00 น.), ช่วงเร่งด่วน (06.01 – 09.00 น.) และ ช่วงหลังเร่งด่วน (09.01 – 12.00 น.)

2) ตัวแปรอิสระที่เปลี่ยนแปลงตามทางเลือก (Alternative-specific Variables) เป็นตัวแปรที่มีค่าแตกต่างกันในแต่ละทางเลือก และมักสะท้อนคุณลักษณะของทางเลือกนั้น ๆ ซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่ออรรถประโยชน์ (Utility) ได้แก่ ระยะเวลาในการเดินทาง และค่าผ่านทาง ตัวแปรกลุ่มนี้เป็นองค์ประกอบหลักของแบบจำลองเชิงพฤติกรรมการเดินทาง

3) ตัวแปรลักษณะบุคคลหรือสังคมเศรษฐกิจ (Socio-economic Variables / Individual Characteristics) เป็นตัวแปรที่สะท้อนคุณลักษณะของผู้ตัดสินใจ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงตามทางเลือก แต่มีผลต่อความชอบหรือแนวโน้มในการเลือก ได้แก่ อายุ เพศ สถานะครอบครัว ระดับการศึกษา อาชีพ จำนวนรถยนต์ส่วนบุคคล รายได้ต่อเดือน สถานการณ์ทำงาน และความหิedy่นของเวลาการทำงาน ตัวแปรกลุ่มนี้นำมาใช้ในรูปของการปฏิสัมพันธ์กับค่าคงที่เฉพาะทางเลือก (Alternative Specific Constant: ASC) หรือกับตัวแปรคุณลักษณะของทางเลือก เพื่ออธิบายความแตกต่างของพฤติกรรมระหว่างบุคคล

จากที่กล่าวข้างต้นสามารถสรุปตัวแปรสำหรับการพัฒนาแบบจำลองดังนี้

ตารางที่ 5 ตัวแปรสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง

ลำดับ	ตัวแปร	ความหมาย
1) ตัวแปรตาม Dependent Variable		
1	$U_{prepeak}$	อัตราประโยชน์ของการเดินทางช่วงก่อนเร่งด่วน (04.00 – 06.00 น.)
2	U_{peak}	อัตราประโยชน์ของการเดินทางช่วงเร่งด่วน (06.01 – 09.00 น.)
3	$U_{postpeak}$	อัตราประโยชน์ของการเดินทางหลังช่วงเร่งด่วน (09.01 – 12.00 น.)
2) ตัวแปรอิสระ Specific Variables		
4	time	ระยะเวลาในการเดินทาง (นาที/เที่ยว)
5	cost	ค่าผ่านทาง (บาท/เที่ยว)
3) ตัวแปรเศรษฐกิจและสังคม		
6	age	1 = อายุ 20 ปีขึ้นไป
		0 = อายุอื่น ๆ
7	male	1 = ชาย
		0 = หญิง
8	married	1 = สมรส
		0 = โสด
9	EDU	1 = ตั้งแต่ระดับปริญญาตรี ขึ้นไป
		0 = ระดับการศึกษาอื่น ๆ
10	work	1 = ข้าราชการรัฐวิสาหกิจ และพนักงานบริษัท (กลุ่มพนักงานประจำ)
		0 = อาชีพอื่น ๆ
11	car	1 = ครอบครองรถ 1 คัน ขึ้นไป (มีรถยนต์)
		0 = ไม่มีรถยนต์
12	income	10,000 = รายได้ต่ำกว่า 10,000
		15,000 = กลุ่มเงินเดือน 10,000 - 20,000
		25,000 = กลุ่มเงินเดือน 20,000 - 30,000
		40,000 = กลุ่มเงินเดือน 30,000 - 50,000
		75,000 = กลุ่มเงินเดือน 50,000 - 100,000
		100,000 = กลุ่มเงินเดือนตั้งแต่ 100,000 บาทขึ้นไป
13	worktime	1 = พนักงานประจำ
		0 = พนักงานไม่ประจำ
14	flex	1 = มีความยืดหยุ่นในการเดินทาง
		0 = ไม่มีความยืดหยุ่นในการเดินทาง

การพัฒนาแบบจำลองครั้งนี้แบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน ได้แก่

(1) การทดสอบนัยสำคัญของตัวแปรหลัก (base case) คือ เวลาเดินทางและค่าผ่านทางผ่านแบบจำลองกรณีฐาน และ

(2) การวิเคราะห์อิทธิพลร่วมกับปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคมของผู้ใช้ทาง (socio case) ใช้วิธีคัดเลือกตัวแปรแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Procedure) โดยเพิ่ม-ลดตัวแปรตามนัยสำคัญทางสถิติ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดฟังก์ชันอรรถประโยชน์ที่รวมทั้งตัวแปรหลักและปัจจัยเศรษฐกิจสังคม เพื่ออธิบายพฤติกรรมได้อย่างครอบคลุม ได้ทำการทดสอบแบบจำลองทั้งสิ้น 13 แบบจำลอง ดังตารางที่ 6

4.3.2 ผลการพัฒนาแบบจำลอง

ดำเนินการพัฒนาแบบจำลองโดยเริ่มจากแบบจำลองกรณีฐาน (Base Case) และทยอยเพิ่มตัวแปรด้านเศรษฐกิจและสังคม เพื่อคัดเลือกแบบจำลองที่สามารถอธิบายพฤติกรรมทางเลือกช่วงเวลาเดินทางได้ดีที่สุดโดยมีผลการวิเคราะห์ตัวแปรดังนี้

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ตัวแปร MODEL 1 กรณีฐาน (base case)

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์	Rob.t-ratio	ผลการคัดเลือก
ASC (Pre-peak)	-1.34913	-8.39089	sig.
ASC (Peak)	(ฐาน)		
ASC (Post-peak)	0.35326	3.31342	sig.
เวลาเดินทาง (time)	-0.00884	-4.75826	sig.
ค่าผ่านทาง (cost)	-0.00186	-2.99646	sig.
ρ^2 (Rho-squared vs equal shares)	0.1634		พอใช้
Number of Observations	464		
LL(0)	-4,078.05		
LL(final)	-3,411.83		

จากตารางที่ 6 การวิเคราะห์แบบจำลองที่ 1 กรณีฐาน (Base Case) ซึ่งพิจารณาตัวแปรค่าผ่านทาง และเวลาในการเดินทาง พบว่า ตัวแปรด้านค่าผ่านทางและเวลาในการเดินทางมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และมีเครื่องหมายสัมประสิทธิ์เป็นลบ แสดงถึงการลดลงของอรรถประโยชน์เมื่อปัจจัยด้านค่าใช้จ่ายหรือเวลาเพิ่มขึ้น ตามหลักทฤษฎีอรรถประโยชน์แบบสุ่ม

(Random Utility Theory) สำหรับค่า ACS เมื่อเปรียบเทียบกับฐานอ้างอิงช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak) พบว่า ผู้เดินทางมีแนวโน้มหลีกเลี่ยงการเดินทางในช่วงก่อนเร่งด่วน (Pre-Peak) แต่มีความพึงพอใจที่จะปรับเปลี่ยนหรือเลือกการเดินทางไปหลังช่วงเวลาเร่งด่วน (Post-Peak) มากกว่า สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของข้อจำกัดด้านตารางเวลา (Schedule Constraints) ของผู้ใช้ทาง โดยแบบจำลองนี้มีความสอดคล้องและสามารถอธิบายพฤติกรรมได้ในระดับสมควร ด้วยค่า p^2 เท่ากับ 0.1634

ตารางที่ 7 สรุปผลการเปรียบเทียบตัวแปรสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเลือกช่วงเวลาในการเดินทาง

แบบจำลอง	ตัวแปร socio	p^2 (Rho-squared)	t-test (t ≥ 1.96)	ความเหมาะสม p^2 (Rho-squared)
Model 0 (Base Case)	ไม่มี	0.1634	ทุกตัว	พอใช้
Model 1	ทุกตัวแปร	0.2396	บางตัว	ดี
Model 2	ไม่มีตัวแปร age, income และ worktime	0.1931	บางตัว	พอใช้
Model 3	male, edu และ flex	0.1729	บางตัว	พอใช้
Model 4	male และ edu	0.1661	บางตัว	พอใช้
Model 5	ไม่มีตัวแปร male และ edu (พิจารณาทุกตัวแปรที่มีนัยสำคัญ)	0.2373	บางตัว	ดี
Model 6	age, income และ worktime	0.2349	บางตัว	ดี
Model 7	married และ work	0.1912	ทุกตัว	พอใช้
Model 8	flex	0.1710	บางตัว	พอใช้
Model 9	income	0.1879	ทุกตัว	พอใช้
Model 10	worktime	0.2141	ทุกตัว	ดี
Model 11	age	0.1988	บางตัว	พอใช้
Model 12	married	0.1716	ทุกตัว	พอใช้
Model 13	work	0.1851	บางตัว	พอใช้

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ตัวแปร MODEL 10 กรณีเศรษฐกิจและสังคม (socio case) ที่มีนัยสำคัญและมีค่า p^2 สูงที่สุด

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์	Rob.t-ratio	ผลการคัดเลือก
ASC (Pre-peak)	-0.49258	-2.28685	sig
ASC (Peak)	(ฐาน)		
ASC (Post-peak)	1.21017	6.69281	sig
เวลาเดินทาง (time)	-0.00932	-4.76339	sig
ค่าผ่านทาง (cost)	-0.00205	-3.01544	sig
worktime	-1.50621	-6.94297	sig
ρ^2 (Rho-squared vs equal shares)	0.2141		ดี
Number of Observations	464		
LL(0)	-4,078.05		
LL(final)	-3,205.13		

*หมายเหตุ: sig คือ significant มีความสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 7 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ พบว่า แบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองที่ 10 (Model 10) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยการเพิ่มตัวแปร เวลาในการทำงาน (Work Time) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองดังตารางที่ 8 พบว่า ตัวแปรค่าผ่านทาง เวลาในการเดินทาง และเวลาในการทำงาน มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมี ρ^2 เท่ากับ 0.2141 และค่าสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรเป็นลบ (-) สะท้อนว่าการเพิ่มขึ้นของค่าผ่านทางและเวลาในการเดินทางจะส่งผลให้อรรถประโยชน์ (Utility) หรือความพึงพอใจในการเลือกเดินทางลดลง และทำให้ความน่าจะเป็นในการเลือกช่วงเวลาในการเดินทางลดลงตามไปด้วย ในขณะที่ตัวแปรเวลาในการทำงานมีนัยสำคัญทางสถิติเป็นอีกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปรับเปลี่ยนหรือเลือกช่วงเวลาในการเดินทาง

จากตารางที่ 8 แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดคือ Model 10 มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานวางแผนนโยบายและการพยากรณ์ผลในอนาคต โดยมีสมการอรรถประโยชน์ (Utility) ดังนี้

$$\text{Uprepeak} = -0.49258 - 0.00932(\text{time}) - 0.00205(\text{cost}) - 1.50621(\text{worktime}) \quad (4)$$

$$U_{peak} = -0.00932(\text{time}) - 0.00205(\text{cost}) - 1.50621(\text{worktime}) \quad (5)$$

$$U_{postpeak} = 1.21017 - 0.00932(\text{time}) - 0.00205(\text{cost}) - 1.50621(\text{worktime}) \quad (6)$$

สมการอรรถประโยชน์ (Utility Function) ทั้ง 3 สมการ เป็นสมการของแบบจำลอง Multinomial Logit (MNL) ที่ใช้คำนวณความพึงพอใจหรืออรรถประโยชน์ของผู้ใช้ทางในการเลือกช่วงเวลาเดินทางแต่ละทางเลือก ได้แก่ Pre-peak, Peak และ Post-peak โดยที่ time คือ ระยะเวลาในการเดินทาง (นาที/เที่ยว) cost คือ ค่าผ่านทาง (บาท/เที่ยว) และ worktime คือ เวลาการทำงาน โดย 1 = พนักงานประจำ และ 0 = พนักงานไม่ประจำ

4.3.3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

จากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Multinomial Logit เพื่อคาดการณ์ความน่าจะเป็นในการเลือกช่วงเวลาเดินทาง โดยคำนวณผ่านโปรแกรม R ด้วยแพ็คเกจ Apollo การคาดการณ์ปริมาณจราจรภายใต้เงื่อนไขการกำหนดค่าผ่านทางแปรผันตามเวลา (ดังสมการที่ 3) เมื่อทำการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลองกับข้อมูล (Goodness-of-Fit) โดยเปรียบเทียบสัดส่วนความน่าจะเป็นที่แบบจำลองคาดการณ์ได้กับสัดส่วนพฤติกรรมในการเลือกช่วงเวลาเดินทางจริงจากแบบสอบถามชุดเดียวกับที่ใช้พัฒนาแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองมีค่า %Correct เฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 99.75 ซึ่งสะท้อนว่าแบบจำลองสามารถจำลองสัดส่วนพฤติกรรมของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้พัฒนาแบบจำลองได้อย่างแม่นยำ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการคาดการณ์ความน่าจะเป็นของผู้เลือกเดินทางในแต่ละช่วงเวลา

ช่วงเวลา	คาดการณ์ (%)	ข้อมูลจริง (%)	%Correct	Sampled std.dev.
Pre-peak	10.48	10.53	99.52	0.01598
Peak	32.14	32.18	99.88	0.01552
Post-peak	57.38	57.29	99.84	0.02224

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความละเอียดแม่นยำยิ่งขึ้น การศึกษานี้ได้พิจารณาปัจจัยด้าน กลุ่มผู้เดินทางที่ถูกจำกัดทางเลือก (Captive User) เพิ่มเติม โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับส่วนลดอัตราค่าโดยสารหรือมีเงื่อนไขบังคับให้ต้องเดินทางในช่วงเวลาเดิมเป็นประจำ โดยการแยกสัดส่วนกลุ่ม Captive ออกจากกลุ่มที่สามารถปรับเปลี่ยนเวลาเดินทางได้ จะช่วยให้แบบจำลองสามารถ

ประเมินการตอบสนองต่อมาตรการทางด้านราคาหรือนโยบายการจัดการจราจรได้อย่างสมจริงยิ่งขึ้น โดยจำแนกผู้เดินทางออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1) สัดส่วนผู้เดินทางประจำที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนเวลาเดินทางได้ (%Captive) เป็นข้อมูลพฤติกรรมการเดินทางจริงของกลุ่มตัวอย่างจากแบบสอบถาม

2) สัดส่วนผู้เดินทางที่มีศักยภาพในการปรับเปลี่ยนช่วงเวลาเดินทาง (%Shift-cap.) เป็นค่าที่คำนวณจากผลการคาดการณ์ความน่าจะเป็นในการเลือกช่วงเวลาในการเดินทางจากแบบจำลอง แล้วหักลบด้วยสัดส่วนผู้เดินทางประจำ (%Captive) ของช่วงเวลาเดียวกัน ผลที่ได้จึงสะท้อนสัดส่วนผู้ใช้ทางที่มีความยืดหยุ่นในการตัดสินใจ และมีแนวโน้มปรับเปลี่ยนช่วงเวลาเดินทางได้จริงเมื่อได้รับแรงจูงใจจากมาตรการด้านราคา ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สัดส่วนการเดินทางประจำในแต่ละช่วงเวลา (Captive)

ช่วงเวลา	%captive	%shift cap.
ก่อนช่วงเร่งด่วน (Pre-peak)	6.40	4.08
ช่วงเร่งด่วน (Peak)	42.22	
หลังช่วงเร่งด่วน (Post-peak)	51.39	5.99

จากตารางที่ 10 สัดส่วนการเดินทางในแต่ละช่วงเวลาเมื่อพิจารณากลุ่มผู้ใช้ทางที่ถูกจำกัดทางเลือก (Captive User) พบว่า สัดส่วนของผู้ใช้ทางในช่วงหลังเวลาเร่งด่วน (Post-peak) มีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 51.39 รองลงมาคือช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak) ร้อยละ 42.22 และช่วงก่อนเวลาเร่งด่วน (Pre-peak) ร้อยละ 6.40 สะท้อนให้เห็นว่าผู้ใช้ทางส่วนใหญ่ยังคงมีข้อจำกัดด้านเวลาในการเดินทาง และไม่สามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมเพื่อตอบสนองต่อมาตรการด้านราคาได้ โดยเฉพาะในช่วง Post-peak ที่มีสัดส่วนกลุ่ม Captive สูง แสดงถึงลักษณะการเดินทางที่ผูกพันกับภารกิจหรือเงื่อนไขส่วนบุคคล เช่น เวลาทำงานหรือกิจกรรมประจำวัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสัดส่วนของกลุ่มที่สามารถปรับเปลี่ยนเวลาเดินทาง (%shift-cap) พบว่า ผู้ใช้ทางบางส่วนมีความยืดหยุ่น ร้อยละ 10.07 มีการย้ายการเดินทางไปยังช่วงก่อนเวลาเร่งด่วน (Pre-peak) ร้อยละ 4.08 และช่วงหลังเวลาเร่งด่วน (Post-peak) ร้อยละ 5.99 ซึ่งชี้ให้เห็นว่ามาตรการกำหนดค่าผ่านทางแปรผันตามเวลายังสามารถจูงใจให้เกิดการกระจายตัวของปริมาณจราจรได้บางส่วน

5. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการเลือกช่วงเวลาเดินทางของผู้ใช้ทางพิเศษ และประเมินศักยภาพของมาตรการส่วนลดค่าผ่านทางนอกชั่วโมงเร่งด่วนในการกระจายปริมาณจราจร โดยใช้แบบจำลอง Multinomial Logit (MNL) จากข้อมูล Stated Preference (SP)

จากผลการศึกษา พบว่า ตัวแปรด้านเวลาเดินทางและค่าผ่านทางมีผลต่อการเลือกช่วงเวลาเดินทางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีทิศทางสอดคล้องกับทฤษฎีเศรษฐศาสตร์การขนส่ง กล่าวคือ เมื่อเวลาเดินทางหรือค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ความน่าจะเป็นในการเลือกช่วงเวลานั้นจะลดลง การให้ส่วนลดค่าผ่านทางในช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วนส่งผลให้ความน่าจะเป็นในการเลือกเดินทางก่อนช่วงเวลาเร่งด่วน (Pre-peak) และหลังช่วงเวลาเร่งด่วน (Post-peak) เพิ่มขึ้น ขณะที่ความน่าจะเป็นในการเลือกเดินทางช่วงเร่งด่วน (Peak) ลดลง แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของมาตรการเชิงราคาในการกระจายความต้องการเดินทาง

ตัวแปรด้านเศรษฐกิจและสังคม ปัจจัยด้านเวลาในการทำงาน (Work time) มีผลต่อการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาเดินทางอย่างมีนัยสำคัญ

ผลการคาดการณ์จากแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำในการพยากรณ์สูง สะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมของตัวแปรที่นำมาใช้ ได้แก่ เวลาเดินทางและค่าผ่านทาง ซึ่งมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกช่วงเวลาเดินทางอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ ผลการคาดการณ์แสดงให้เห็นว่านโยบายส่วนลดค่าผ่านทางสามารถจูงใจให้ผู้ใช้งานบางส่วนปรับเปลี่ยนเวลาเดินทางไปยังช่วงก่อนและหลังเวลาเร่งด่วนได้ ส่งผลให้ปริมาณจราจรถูกกระจายออกจากช่วงเวลาเร่งด่วนโดยมีการย้ายการเดินทางไปยังช่วงก่อนเวลาเร่งด่วน (Pre-peak) ร้อยละ 4.08 และช่วงหลังเวลาเร่งด่วน (Post-peak) ร้อยละ 5.99

อย่างไรก็ตาม การศึกษายังพบข้อจำกัดสำคัญจากกลุ่มผู้ใช้ทางที่ถูกจำกัดทางเลือก (Captive User) ซึ่งมีสัดส่วนค่อนข้างสูง โดยผู้ใช้ทางกลุ่มนี้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนช่วงเวลาเดินทางได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านตารางเวลาการทำงานหรือภารกิจประจำ ส่งผลให้ยังคงมีการกระจุกตัวของปริมาณจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วนกว่าร้อยละ 42.22 แม้จะมีมาตรการจูงใจด้านราคาก็ตาม

ผลการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่ามาตรการส่วนลดค่าผ่านทางนอกชั่วโมงเร่งด่วนสามารถจูงใจให้ผู้ใช้งานบางส่วนปรับเปลี่ยนช่วงเวลาเดินทางได้ โดยมีการย้ายการเดินทางจากช่วงเวลาเร่งด่วนไปยังช่วงก่อนและหลังเวลาเร่งด่วนรวมประมาณร้อยละ 10.07 ของผู้ใช้ทางทั้งหมด ผลลัพธ์ดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะลดความหนาแน่นของการจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วนได้อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยังมีกลุ่มผู้ใช้ทางที่มีข้อจำกัดด้านเวลา (Captive User) ในสัดส่วนสูง

ดังนั้น การนำมาตรการส่วนลดค่าผ่านทางไปใช้ในทางปฏิบัติควรกำหนดเป้าหมายการกระจายปริมาณจราจรให้สอดคล้องกับศักยภาพในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของผู้ใช้ทาง โดยจากผลการศึกษากลุ่มผู้ใช้ทางที่มีความยืดหยุ่นในการเดินทางสามารถตอบสนองต่อมาตรการด้านราคา

ได้ประมาณร้อยละ 10 ของปริมาณจราจรทั้งหมด จึงอาจใช้เป็นค่าประมาณเบื้องต้นสำหรับกำหนดเป้าหมายการลดปริมาณจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วน

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ความกรุณาจากบริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลสำคัญ ตลอดจน The Rest Area ประชาชน และสถานบริการน้ำมันบางจาก จังหวัดฉะเชิงเทรา 38 (บจ. เอเวอร์กรีน จังหวัดฉะเชิงเทรา) ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม จึงขอขอบพระคุณทุกหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนไว้ ณ โอกาสนี้

References

- [1] Inter - City Motorway Division, Department of Highways. History and Background [Internet]. Bangkok: Inter - City Motorway Division; 2017 [cited 2026 Jun 20]. Available from: <https://www.motorway.go.th/about/history/>.
- [2] Vetchawongwan T. Travel mode choice analysis of high speed train using stated preference method: a case study of air passengers from Bangkok to Northern Corridor [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2011. (In Thai).
- [3] Kangjai J. Changes in commute patterns following an opening of a major mass transit system: a before and after study of Bangkok's Mass Rapid Transit Authority's Blue Line Subway [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2006. Thai.
- [4] Burris MW, Pendyala RM. Discrete choice models of traveler participation in differential time of day pricing programs [Internet]. Transport Policy 2002 [cited 2026 Jun 20];9(3):241-51. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X02000021>.
- [5] Li ZC, Huang HJ, Yang H. Fifty years of the bottleneck model: a bibliometric review and future research directions [Internet]. Transportation Research Part B: Methodological 2020 [cited 2026 Jun 20];139:311-42. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7333998/>.
- [6] Maychaipume T, Rungjang K. Logit model on modal choice behavior of recreation trip to Eastern Thailand. The Journal of KMUTNB 2024 [cited 2026 Jun 20];34(2):1-12. Available from: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/kmutnb-journal/article/view/256903/172191>. (In Thai).

- [7] Duangthong S. Route-choice behaviors of drivers travelling between Bangkok and Chonburi [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2001. (In Thai).
- [8] Train KE. Discrete choice methods with simulation. 2nd ed. New York: Cambridge University Press; 2009. doi: 10.1017/CBO9780511805271.
- [9] Greene WH. Econometric analysis. 8th ed. Harlow: Pearson Education Limited; 2018.
- [10] Ben-Akiva M, Lerman SR. Discrete choice analysis: theory and application to travel demand. Cambridge (MA): MIT Press; 1985.
- [11] McFadden D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: Zarembka P, editor. Frontiers in econometrics. New York: Academic Press; 1974. p. 105-142.
- [12] Ortúzar JD, Willumsen LG. Modelling transport. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2011.

ประวัติผู้เขียนบทความ



แสงระวี ตันงาม นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800
E-mail: s6401081856128@email.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: วิศวกรรมจราจร และระบบขนส่งมวลชนระบบราง



รองศาสตราจารย์ ดร.เทอดศักดิ์ รongwongpanich อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อาคาร 89 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 E-mail: terdsak.r@eng.kmutnb.ac.th
งานวิจัยที่สนใจ: การขนส่งในเขตเมือง (Urban Transportation) และการขนส่งสินค้า (Freight Transportation)

Article History:

Received: April 5, 2026

Revised: August 13, 2026

Accepted: August 25, 2026

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต:

ศ.ดร.กัณวีร์ กนิษฐ์พงศ์	สาขาวิศวกรรมขนส่ง สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
ศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.แคลิยา ปัทมพรหม	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศ.ดร.โจเซฟ เคดารี	ภาควิชาวิศวกรรมอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ต่อกุล กาญจนาลัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศ.ดร.พานิช วุฒิพุกษ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศ.ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
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 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กรองแก้ว เลาหลิดานนท์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.กอบชัย เดชหาญ	ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปรารชญ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์
รศ.ดร.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.กิตติพงศ์ อัครกุล	ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.จิรณัฐ เสงี่ยมศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร์	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
รศ.ดร.ชัยณรงค์ อธิสกุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.ณกร อินทร์พุง	คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ชะเอียง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.ธนุพล ตันนโยภาส	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสัตย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.เทอดศักดิ์ ร่องวิริยะพานิช	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ธนู ญญา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
รศ.ดร.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นคร ภู่วโรคม	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.นิตย์ เพ็ชรรักษ์	มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
รศ.ดร.นิติมา อัจฉริยะโพธา	ศูนย์บริการทางการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี
รศ.ดร.เนตรนภิส ตันเต็มทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.บุญเลิศ สื่อเจีย	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.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.พนิต ภูจินดา	ภาควิชาการวางแผนภาคและเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พรฤดี เนติโสภาคกุล	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.พานิช วุฒิปุณษ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พาสีร์ หล่อธีรพงศ์	บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.พิภพ สุนทรสมัย	ที่ปรึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พิศิษฐ์ โภคารัตน์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ไพโรจน์ สิงหนัดกิจ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภัทรมน จงประดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
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.ยุทชัย บรรเทึงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.รัตติกว วรากุลศิริพันธุ์	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.ระพี กาญจนะ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.วรรณ ข้างสว่าง	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
รศ.ดร.วรพจน์ กรีสระเดช	คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และปัญญาประดิษฐ์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
รศ.ดร.วัชร 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 มิตะถา	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สโรช บุญศิริพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สินชัย ชินวรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สิริพร โรจนนันต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.เสรี เศวตเศรณี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุนิติ สุภาพ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ.ดร.สุรพล บุญลือ	ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.อดิรักษ์ กาญจนหฤทัย	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อรฉัตร จิตต์โสภักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิทธิพงศ์ ชัยสายันท์	บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเอเซียอาคเนย์
รศ.ดร.อำพล การณสุนทวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.เรวัฒน์ เหล่าไพบูลย์	ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.วัชรินทร์ วิทย์กุล	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.วิญญู แสงวสินกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
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 พรหมจิริประวัติ	สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.กิตติ สถาพรประสารณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ
ผศ.ดร.กฤษณพล ทองศรี	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เขมพัฒน์ ดันติวัฒนกุล	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักร จันทลักษณ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.จักรินทร์ กลั่นเงิน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.จารุวรรณ เกษมทรัพย์	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.จิราพรณ สุทรโชติ	ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.จิราวรรณ อุ้มเมตตาอารี	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโณม	ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ฉัตร สุจินดา	ธุรกิจส่วนตัว

ผศ.ดร.ชลัท ทิพาการเกียรติ	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผศ.ดร.ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ชูชัย สุจิรวงศ์	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณพล ศรีศักดิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ณัฏวิภา เจียรโนวชิระ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐ โอชนาททรัพย์	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์น้อย	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ดนัย เผ่าหฤทธิรงค์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดาวุด ทองทา	ภาควิชาคณิตศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ติกะ บุญนา	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
ผศ.ดร.ตรี วาทกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม
ผศ.ดร.ทวีศักดิ์ ตะกระโทก	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผศ.ดร.นที ศรีสวัสดิ์	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิพนธ์ วรรณโสภาคย์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ปรรัตน์ ศุภมิตรโยธิน	สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผศ.ดร.ประภาพรณ เกษราพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.ปริญญา บุญกนิษฐ	สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผศ.ดร.พงศกร บำรุงไทย	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พงษ์สฤษฎ์ ประกฤตศรี	ภาควิทยาศาสตร์พื้นฐานและพลศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.พิพัฒน์พงศ์ วัฒนวันยู	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.พิมพ์เพชร สระทองอุ่น	สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ผศ.ดร.ภาวัต ไชยชาวนาทิก	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ดร.มนทล นาวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูญ มาศนิยม	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัฐภูมิ ฐัฒนคุณ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.วรวิทย์ วงษ์เสรี	คณะเทคโนโลยีดิจิทัล สถาบันเทคโนโลยีจิตรลดา
ผศ.ดร.วัชรินทร์ ดงบัง	สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ผศ.ดร.วิชัย รุ่งเรืองอนันต์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วินัย ใจกล้า	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วิรัตน์ จอมขวา	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ผศ.ดร.ศิริดล ศิริธร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.สนิท วงษา	ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมบุญ เจริญวิไลศิริ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	สาขาวิชาวิศวกรรมเทคนิคธรณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมศักดิ์ มีนกร	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผศ.ดร.สิตางค์ ฟิลัยหล้า	ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์	คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

ผศ.ดร.สิริชัย จีรวงศ์สุนทรณ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สิรวงศ์ กลั่นคำสอน	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผศ.ดร.สุจิตา ทีปรักษพันธ์	ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.โสภา แซ่เฮ้ง	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.สุมล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สุรัตน์ อาริรัตน์	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.อรกมล วังอภิสิทธิ์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.เอกชัย อยู่ประเสริฐชัย	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.อุษณีย์ คำพูล	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.กัมปนาท ไชยเพชร	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผศ.กานติส สุดสาคร	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.จิรเมธา สังข์เกษม	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.ณัฐนันท์ รัตนไชย	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.นราธิป แสงชัย	ศูนย์แห่งความเป็นเลิศเฉพาะทางด้านการวิจัยและพัฒนา อุตสาหกรรมเครื่องเรือน วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.พรสิริ ขาติปรีชา	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ผศ.วรรณะ ประภาภรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

ผศ.วรากร เกิดทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผศ.สหรัตน์ วงษ์ศรีชะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผศ.สาริต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
ผศ.อุษณีย์ ระหา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.อนุชิต เจริญ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.กฤษณ์ อภิญาวิศิษฐ์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อ.ดร.กำธร เสพย์ธรรม	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.จักรภาพ วงศ์วิวัฒน์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.ฉัตรเพชร ยศพล	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.ชัยพันธ์ ขำญาติ	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม 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.ดุชนี สติระเศรษฐี	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร
อ.ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	หลักสูตรวิศวกรรมปัญญาประดิษฐ์และวิทยาการข้อมูล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
อ.ดร.บุญเลิศ วงศ์เจริญแสงสิริ	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

อ.ดร.ปริญญา บุญมาเลิศ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ประภาส ผ่องสนาม	สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล อีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อ.ดร.ปรารธนา อินตะวิน	สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ดร.พงศกร พรหมสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
อ.ดร.พิชญุตม์ จรัสบำรุงโรจน์	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
อ.ดร.ภาควัฒน์ แสนเจริญ	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
อ.ดร.ภาสินี ศิริประภา	คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อ.ดร.ลัญจกร อมรกิจบำรุง	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อ.ดร.วรศิริ เดอ กาเดอเนต์	สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อ.ดร.วาทัญญู รอดประพัฒน์	สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์อัตโนมัติ สำนักวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลตะวันออก
อ.ดร.วศิน มหัตถนรินทร์กุล	ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อ.ดร.วิทยา พวงสมบัติ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์
อ.ดร.วีรเดช กิรติชนวิทย์	สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อ.ดร.ศรินรัตน์ วงษ์ลี	กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
อ.ดร.ศักดิ์ชาย รักการ	สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.ดร.สำเร็จ เนตรภู	บริษัท เอส. เอช. เค. เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด
อ.ดร.สุชัยญา วงศ์รอด	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า ธนบุรี
อ.ดร.สุริยพงศ์ นิลสังข์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
อ.ดร.สุวรรณี สายสิน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิม พระเกียรติ

อ.ดร.อดิเทพ ศรีคงศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
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 ทะลีรัตน์วัฒนา	สำนักก่อสร้างสะพาน กรมทางหลวงชนบท
ดร.อัศคพัฒน์ สว่างสุรีย์	สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง
อ.จิรวรรณ ปล้องใหม่	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เกษมบัณฑิต
อ.นิตยา จันทรเรือง 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
โดยมุ่งเน้นผลิตบัณฑิตวิศวกรนักปฏิบัติที่มีนั้คงและยั่งยืน”**

ผู้เขียนจะต้องจัดเตรียมบทความต้นฉบับที่พิมพ์ตามข้อกำหนดของรูปแบบวารสาร จำนวน 1 ชุด และผู้เขียนบทความกรอกข้อมูลใบนำส่งบทความ พร้อมสแกนใบนำส่งบทความและแนบไฟล์ต้นฉบับบทความ มาที่

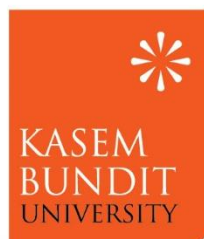
E-mail: engkasemjournal@kbu.ac.th

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