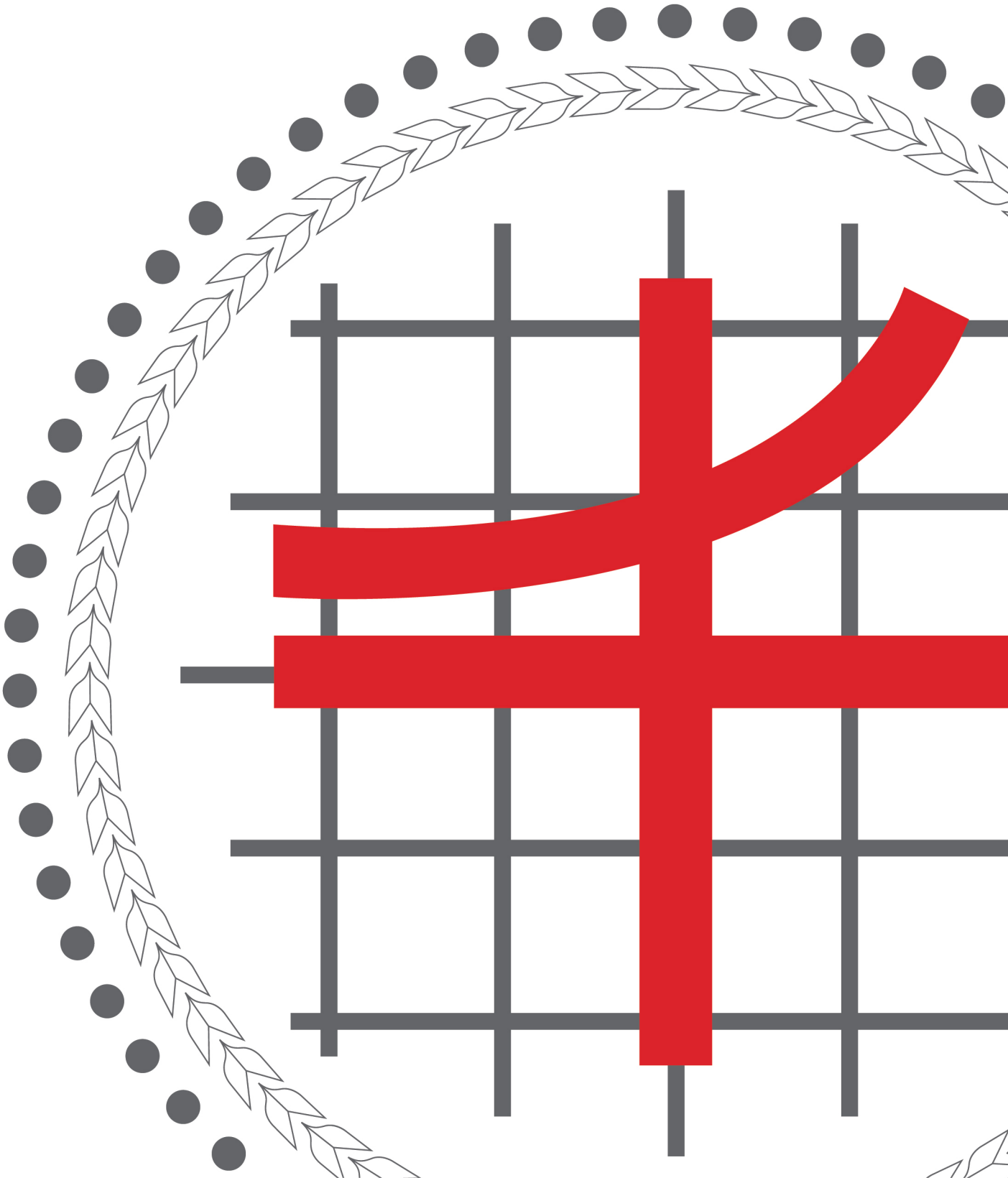
Srinakharinwirot University Engineering Journal
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
Vol. 21 No.2 (July - December 2025)
ISSN : 2774 - 0269 (Online)



Srinakharinwirot University Engineering Journal Vol. 21 No.2 (July - December 2025)

## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online) เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี วารสารตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มิถุนายน และ ธันวาคม ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – มิถุนายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

## วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

## เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภอองครักษ์
จังหวัดนครนายก 26120
โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560
http://eng.swu.ac.th และ https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej
อีเมล journalengswu@gmail.com

คำสั่งมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ 9116 / 2568

เรื่อง แต่งตั้งกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

---

เพื่อให้การจัดทำวารสารวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นไปด้วยความเรียบร้อยและมีประสิทธิภาพ อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 29 มาตรา 34 แห่งพระราชบัญญัติมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ. 2559 จึงแต่งตั้งกองบรรณาธิการวารสารวิชาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ดังรายชื่อต่อไปนี้

| | |
|---|---|
| 1. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ | ที่ปรึกษา |
| 2. รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา | ที่ปรึกษา |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช | บรรณาธิการอำนวยการ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุณยวานิชกุล | บรรณาธิการ |
| 5. ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริไพโรจน์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 6. ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 7. ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีวาน ฟลัด | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 8. ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 9. ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 10. ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 11. ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 12. ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 13. ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวราจารย์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 14. ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 15. ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 16. ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 17. ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาต โสภาแดง | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 18. ศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 19. พันเอกหญิง ศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |

/20.รองศาสตราจารย์ ...

| | |
|---|---|
| 20. รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 21. รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 22. รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูณ์วิวัฒน์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 23. รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 24. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 25. รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 26. รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 27. รองศาสตราจารย์ ดร.พัชราภรณ์ บุณยวานิชกุล | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย เหมหิรัญ | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชานันท์ อังศุเศรณี | กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ |
| 30. รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์ | กรรมการ |
| 31. รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์ | กรรมการ |
| 32. รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ | กรรมการ |
| 33. รองศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์ | กรรมการ |
| 34. รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญา ชัยปัญญา | กรรมการ |
| 35. รองศาสตราจารย์ธนยศ อริสริยวงศ์ | กรรมการ |
| 36. รองศาสตราจารย์ธีรภัทร หลิ่มบุญเรือง | กรรมการ |
| 37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา ตันติสถิระพงษ์ | กรรมการ |
| 38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ | กรรมการ |
| 39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธุ์ | กรรมการ |
| 40. อาจารย์ ดร.วัณโน ยีตำ | กรรมการ |
| 41. อาจารย์ ดร.กฤษฎา เล่งเวหาสถิตย์ | กรรมการ |
| 42. นางสาวลินดา นิลพัท | กรรมการฝ่ายการเงิน |
| 43. นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์ | กรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์ |
| 44. นางธิดา ศรีกงพาน | กรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์ |
| 45. นางสาวยุพาพร ประไพย์ | กรรมการและผู้ช่วยบรรณาธิการ |

โดยคณะกรรมการกองบรรณาธิการฯ มีหน้าที่และความรับผิดชอบหลัก ดังนี้

1) กำหนดนโยบายและแนวทางของวารสาร ขอบเขต และทิศทางของวารสาร รวมถึงกำหนดเป้าหมาย กลุ่มผู้อ่าน และมาตรฐานในการตีพิมพ์ ทั้งในด้านคุณภาพทางวิชาการ จริยธรรมการเผยแพร่ และรูปแบบการนำเสนอ เพื่อให้วารสารมีเอกลักษณ์และเป็นที่ยอมรับในระดับสถาบัน ชาติ และนานาชาติ

/2) บริหารจัด ...

2) บริหารจัดการกระบวนการพิจารณาบทความ เมื่อมีการส่งบทความเข้ามา กองบรรณาธิการจะเป็นผู้ตรวจสอบความเหมาะสมเบื้องต้น เช่น ความครบถ้วนของเนื้อหา การจัดรูปแบบตามที่กำหนด และความสอดคล้องกับขอบเขตของวารสาร จากนั้นจึงคัดเลือกผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewer) ที่มีความเชี่ยวชาญตรงสาขามาดำเนินการประเมิน (Peer Review) พร้อมทั้งติดตามและประสานงานให้กระบวนการดำเนินไปอย่างโปร่งใสและเป็นธรรม

3) ตัดสินใจและอนุมัติการตีพิมพ์ หลังจากได้รับผลการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิ กองบรรณาธิการจะทำหน้าที่พิจารณาและตัดสินใจว่าบทความใดควรได้รับการตีพิมพ์ ปรับแก้ หรือปฏิเสธ โดยอิงตามคุณภาพ ความถูกต้อง ความสำคัญทางวิชาการ และความสอดคล้องกับนโยบายวารสาร

4) ตรวจสอบคุณภาพทางวิชาการและภาษา ของบทความทั้งในด้านเนื้อหา ความถูกต้องของการอ้างอิง การใช้เหตุผลเชิงวิชาการ ตลอดจนการตรวจสอบภาษาให้ถูกต้อง ชัดเจน และเป็นมาตรฐาน เพื่อให้บทความที่เผยแพร่ออกมามีคุณภาพและสามารถสื่อสารต่อผู้อ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) กำกับดูแลจริยธรรมการตีพิมพ์ ให้การดำเนินงานของวารสารเป็นไปตามหลักจริยธรรมสากล เช่น การป้องกันการลอกเลียนผลงาน (Plagiarism) การหลีกเลี่ยงผลประโยชน์ทับซ้อน (Conflict of Interest) และการเคารพสิทธิของผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อสร้างความโปร่งใสและความเชื่อถือ

6) ส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพของวารสาร การเผยแพร่ และประชาสัมพันธ์วารสาร รวมทั้งพัฒนาระบบการจัดการให้มีความทันสมัย เช่น การจัดทำในรูปแบบออนไลน์ การจัดทำฐานข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงกับเครือข่ายวิชาการ และการผลักดันให้วารสารเข้าสู่ฐานข้อมูลที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล

7) สร้างเครือข่ายและความร่วมมือกับนักวิชาการ ผู้ทรงคุณวุฒิ สถาบันการศึกษาต่างๆ เพื่อยกระดับคุณภาพของวารสาร รวมถึงการเชิญนักวิชาการชั้นนำมาเป็นบรรณาธิการรับเชิญหรือผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อเสริมสร้างชื่อเสียงและความเชื่อมั่น

ทั้งนี้ ตั้งแต่วันที่ 1 สิงหาคม 2568 เป็นต้นไป และให้ยกเลิกคำสั่งมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ 14012/2567 ลงวันที่ 24 ธันวาคม 2567 และคำสั่งที่ขัดแย้งกับคำสั่งฉบับนี้ โดยให้ถือปฏิบัติหน้าที่ตามคำสั่งฉบับนี้แทน

สั่ง ณ วันที่ 2 กันยายน พ.ศ. 2568

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชลวิทย์ เจียรจิตต์)
อธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

# บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 20 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 8 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์จัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี โดยตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มิถุนายน และธันวาคม ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – มิถุนายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุณยวานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

# สารบัญ

**บทความวิจัย**


การประเมินน้ำหลากล้นตลิ่งจากแม่น้ำมูลและแนวทางการผันน้ำเพื่อบรรเทาอุทกภัย ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี 1
Assessment of Mun River Overbank and Diversion Strategies for Flood Mitigation in Ubon Ratchathani Province
สุภาพร ทองเต็ม ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์

พฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเตียงลมร้อนแบบพวยพุ่งเสริมด้วยไมโครเวฟ 16
Drying Behavior of Khao Dawk Mali 105 Jasmine Paddy in a Spouted Bed Dryer Assisted by Microwave
ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน กระวี ตรีอำนรรค เทวรัตน์ ตรีอำนรรค จิรวัฒน์ กรุณา

การออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเลียนแบบรูปร่างของ นกเหยี่ยวเพเรกริน เพื่อลดแรงต้านอากาศ 31
Solar Electric Vehicle Body Design Inspired by the Peregrine Falcon for Aerodynamic Drag Reduction
จิรวัตน์ กรุณา ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน

การศึกษาประสิทธิภาพของการบูรณะพื้นสะพานกลับรถ : กรณีศึกษาบนถนนทางหลวงหมายเลข 35 46
Performance Evaluation of U-Turn Bridge Deck Rehabilitation: A Case Study on Highway No. 35 Thailand
กฤตเมธ มีปัญโญ วันชัย ยอดสุดใจ สุกิจ ยินดีสุข

การออกแบบและสร้างชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดย MediaPipe Holistic 57
Design and Make a Work Study Simulation Model Using MediaPipe Holistic
กันยารัตน์ พูลเพียร

การพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ 73
กรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชน จังหวัดจันทบุรี
Development of a Community-Based Business Model Utilizing Solar Energy and Net Metering: A Case Study of Community Enterprises in Chanthaburi Province, Thailand
กรณ์ปภพ รัตนวิจิตร อาทิตย์ คำต่าย กฤษณะ จันทสิทธิ์

การพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนโดยวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส 87
Development of Domestic Cooking Burner using Stainless Wire - Mesh Porous Media
ไพลิน หาญขุนทด จัตุพล ป้องกัน สุรเดช สินจะโป๊ะ บัณฑิต กฤตาคม นิวัฒน์ เกตุชาติ

# สารบัญ

**บทความวิจัย**

ปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอเมืองจังหวัดเพชรบูรณ์: การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ 98
Success Factors in Construction Management of Local Administrative Organizations in Mueang District, Phetchabun Province: an Exploratory Factor Analysis
พัฒน สุวรรณสัมฤทธิ์ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 1-15 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การประเมินน้ำหลากล้นตลิ่งจากแม่น้ำมูลและแนวทางการผันน้ำเพื่อบรรเทาอุทกภัย ในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี

# Assessment of Mun River Overbank and Diversion Strategies for Flood Mitigation in Ubon Ratchathani Province

สุภาพร ทองเต็ม ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์*
ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140
Supaporn Thongtem Chaiyapong Thepprasit*
Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom Province, 73140
*Corresponding author Email: plase4401@hotmail.com
(Received: January 15, 2025; Revised: July 6, 2025 ; Accepted: July 31, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาพน้ำท่วมด้วยแบบจำลอง HEC-RAS 2 โดยอ้างอิงเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2562 ซึ่งมีระดับน้ำหลากเทียบเท่ากับรอบปีการเกิดซ้ำ 20 ปี เพื่อจำลองพื้นที่น้ำท่วมที่เกิดจากการไหลล้นตลิ่งของแม่น้ำมูลในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี และประเมินประสิทธิภาพของแผนงานคลองผันน้ำที่เสนอโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ในการจำลอง ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ (Manning n) ในลำน้ำเท่ากับ 0.040 และ 0.045 และนอกลำน้ำอยู่ในช่วง 0.07–0.12 โดยมีการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลองจากเหตุการณ์น้ำท่วมในปี พ.ศ. 2565 และ พ.ศ. 2562 ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองประเมินโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กำลังสอง (Coefficient of Determination: $R^2$) และ Root Mean Square Error (RMSE) ผลการปรับเทียบแบบจำลองให้ค่า $R^2$ เท่ากับ 0.978 และ RMSE เท่ากับ 0.057 ส่วนผลการตรวจสอบแบบจำลองให้ค่า $R^2$ เท่ากับ 0.964 และ RMSE เท่ากับ 0.14 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือในระดับสูง ผลการวิจัยมีพื้นที่น้ำท่วม 362.21 ตร.กม. ระดับน้ำท่วมสูงสุด 115.86 ม.รทก. ระยะเวลาน้ำล้นตลิ่ง 29 วัน เมื่อกำหนดให้มีคลองผันน้ำ 3 กรณี ประกอบด้วย กรณีที่ 1 คลองผันน้ำจากแม่น้ำชีไปยังท้ายเขื่อนปากมูล กรณีที่ 2 คลองผันน้ำจากแม่น้ำมูลและห้วยขะยุงไปยังท้ายแก่งสะพือ (คลองผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานี) และ กรณีที่ 3 วิเคราะห์คลองผันน้ำกรณีที่ 1 และ 2 ร่วมกัน สามารถลดพื้นที่น้ำท่วมเหลือ 321.30, 328.12 และ 270.60 ตร.กม. ระดับน้ำท่วมสูงสุดลดลงเหลือ 114.78, 114.65 และ 113.44 ม.รทก. และระยะเวลาน้ำล้นตลิ่งลดลงเหลือ 26, 22 และ 16 วัน ตามลำดับ จากผลกรณีที่ 3 พบว่าสามารถตัดยอดน้ำได้มากที่สุดจึงบรรเทาความรุนแรงน้ำท่วมได้มาก คงเหลือระดับน้ำล้นตลิ่งแม่น้ำมูลอยู่ 1.42 เมตร ทำให้ลดความรุนแรงของน้ำท่วมในพื้นที่ลุ่มต่ำได้ และสามารถป้องกันน้ำท่วมบริเวณพื้นที่เศรษฐกิจของเมืองอุบลราชธานีได้ รวมถึงป้องกันน้ำท่วมเส้นทางสัญจรสายหลักได้

**คำสำคัญ:** การจำลองน้ำท่วม, แบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ, พื้นที่ลุ่มต่ำ

**ABSTRACT**

This study aimed to investigate flood conditions using the HEC-RAS 2D model, based on the 2019 flood event, which represented a 20-year return period. The simulation focused on overbank flooding from the Mun River in Ubon Ratchathani Province and evaluated the effectiveness of proposed flood diversion canal schemes. The Manning's roughness coefficients used were 0.040–0.045 within the river channel and 0.07–0.12 for the floodplain. The model was calibrated and validated using data from the 2022 and 2019 flood events. Model performance was assessed using the coefficient of determination ($R^2$) and root mean square error (RMSE), yielding $R^2$ = 0.978 and RMSE = 0.057 for calibration, and $R^2$ = 0.964 and RMSE = 0.14 for validation, indicating high model reliability. The simulation revealed a flood extent of 362.21 km², with a peak water surface elevation of 115.86 m MSL and a flood duration of 29 days. Three flood diversion scenarios were analyzed: (1) a canal diverting flow from the Chi River to downstream of Pak Mun Dam, (2) a canal diverting flow from the Mun River and Huai Khayung to downstream of Kaeng Saphue (bypassing Ubon Ratchathani urban area), and (3) a combined implementation of both canals. The results showed reductions in flood extent to 321.30, 328.12, and 270.60 km²; peak flood levels to 114.78, 114.65, and 113.44 m MSL; and flood durations to 26, 22, and 16 days, respectively. Scenario 3 was the most effective, reducing the overbank depth of the Mun River to 1.42 meters. This significantly mitigated flooding severity in low-lying areas, protected urban economic zones, and preserved main transportation routes.

**Keyword:** Flood simulation, HEC-RAS 2D model, low-lying areas.

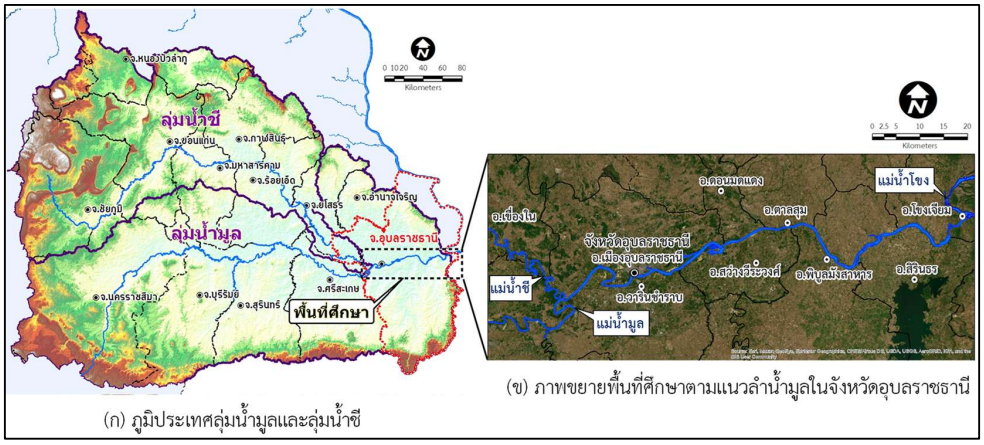
## 1. บทนำ

พื้นที่ศึกษาอยู่ในแม่น้ำมูลและพื้นที่ทั้งสองฝั่งของแม่น้ำมูลในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี โดยเริ่มต้นจากแม่น้ำมูลบริเวณจุดบรรจบแม่น้ำชีที่ตำแหน่งพิกัด UTM ZONE 48N 469269 E 1678548 N จนไปบรรจบกับแม่น้ำโขงที่ตำแหน่งพิกัด UTM ZONE 47N 1199499 E 1703776 N มีความยาว 116 กิโลเมตร ประกอบด้วยอำเภอที่มีเขตติดต่อและได้รับผลกระทบจากแม่น้ำมูล 9 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเขื่องใน เมืองอุบลราชธานี วารินชำราบ สว่างวีระวงศ์ ดอนมดแดง ตาลสุม พิบูลมังสาหาร สิรินธร และโขงเจียม ดังรูปที่ 1

ลุ่มน้ำมูลมีพื้นที่ 70,943.01 ตร.กม. บริเวณตอนใต้ของลุ่มน้ำมีเทือกเขายาวตลอดแนวมีความลาดเทลงมาทางทิศเหนือ ส่วนทางตะวันออกบริเวณจังหวัดสุรินทร์และจังหวัดศรีสะเกษเป็นที่ราบ สภาพทั่วไปเป็นที่ราบลุ่มสลับเนินเขา แต่ในจังหวัดอุบลราชธานีเป็นที่ราบลุ่มสลับลูกคลื่นลอนลาดถึงลอนชัน มีแม่น้ำมูลเป็นลำน้ำสายหลักความยาว 880 กม. [1] ลุ่มน้ำชีมีพื้นที่ 49,273.86 ตร.กม. ลักษณะภูมิประเทศมีเทือกเขาสูงทางทิศตะวันออกและทิศเหนือคือเทือกเขาภูพาน ทิศตะวันตกคือเทือกเขาดงพญาเย็น พื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบถึงลอนคลื่น และมีเนินเล็กน้อยทางตอนใต้ มีแม่น้ำชีเป็นลำน้ำสายหลักความยาว 1,030 กม. [2] แสดงดังรูปที่ 1

จังหวัดอุบลราชธานีตั้งอยู่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง มีพื้นที่พืนที่ 15,774 ตร.กม. อยู่ในลุ่มน้ำมูล 81% ลุ่มน้ำโขงตะวันออกเฉียงเหนือ 15% ลุ่มน้ำชี 4 % จังหวัดอุบลราชธานีประสบปัญหาปริมาณน้ำจากแม่น้ำมูลหลากล้นตลิ่งเข้าท่วมพื้นที่ลุ่มต่ำตลอดแนวลำน้ำแทบทุกปี เนื่องจากจากลักษณะภูมิประเทศและที่ตั้งของจังหวัดอุบลราชธานีอยู่ท้ายจุดบรรจบของแม่น้ำมูลกับแม่น้ำชีซึ่ง

เป็นลุ่มน้ำขนาดใหญ่ จึงเป็นแหล่งรับมวลน้ำทั้งหมดของลุ่มน้ำชีและลุ่มน้ำมูล ประกอบกับข้อจำกัดในการระบายน้ำของแม่น้ำมูล ซึ่งเป็นลำน้ำเพียงสายเดียวในการระบายน้ำออกสู่แม่น้ำโขง อีกทั้งแม่น้ำมูลช่วงบริเวณท้ายน้ำในเขตอำเภอพิบูลมังสาหารมีลักษณะเป็นเกาะแก่งแทบตลอดแนวลำน้ำ มีแก่งสะพือเป็นแก่งขนาดใหญ่เป็นอุปสรรคกีดขวางการไหล จึงส่งผลให้การระบายน้ำของแม่น้ำมูลออกสู่แม่น้ำโขงเป็นไปได้ช้า และส่งผลกระทบกับพื้นที่ลุ่มต่ำที่ถูกน้ำท่วม โดยเฉพาะในเขตเทศบาลนครอุบลราชธานี และเทศบาลเมืองวารินชำราบซึ่งมีระดับพื้นที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น หากเกิดฝนตกหนักต่อเนื่องหลายวันเป็นบริเวณกว้างทั้งในลุ่มน้ำมูลและลุ่มน้ำชี จะยิ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำไหลหลากผ่านจังหวัดอุบลราชธานีมีปริมาณมากระดับน้ำท่วมสูงกว่าปกติ และมีระยะเวลาน้ำท่วมยาวนานขึ้น ที่ผ่านมามีเหตุการณ์น้ำท่วมหนักจนส่งผลกระทบต่อพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญของจังหวัด รวมถึงเส้นทางสัญจรสายหลักที่เชื่อมระหว่างเมืองถูกน้ำท่วม เช่น พ.ศ. 2493 2505 2509 2521 2545 2554 2562 และ 2565 มีระดับน้ำล้นตลิ่งแม่น้ำมูลบริเวณสถานี M.7 สะพานเสรีประชาธิปไตย อ.เมืองอุบลราชธานี เกิน 3 เมตร



(ก) ภูมิประเทศลุ่มน้ำมูลและลุ่มน้ำชี

(ข) ภาพขยายพื้นที่ศึกษาตามแนวลำน้ำมูลในจังหวัดอุบลราชธานี

รูปที่ 1 สภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำมูลและลุ่มน้ำชี และพื้นที่ศึกษา

สาเหตุการเกิดอุทกภัยปี พ.ศ. 2562 เกิดจากฝนตกมากผิดปกติจากอิทธิพลของพายุ 2 ลูก คือพายุโซลร้อนโพดุลและคาจิกิ ส่งผลให้เกิดฝนตกหนักต่อเนื่องในช่วง 7 วัน (29 สิงหาคม – 4 กันยายน 2562) ครอบคลุมพื้นที่ตั้งแต่แม่น้ำมูลไปถึงทิศเหนือของจังหวัด มีฝนกระจายตัวอยู่บริเวณจังหวัดมหาสารคาม ร้อยเอ็ด ยโสธร อำนาจเจริญ และอุบลราชธานี มีปริมาณฝนตกสะสมอยู่ในช่วง 400-600 มม. ส่งผลให้เกิดน้ำท่วมฉับพลันในหลายจังหวัดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในลุ่มน้ำชี จึงมีการเร่งระบายน้ำออกสู่ท้ายน้ำซึ่งต้องผ่านจังหวัดอุบลราชธานี ทำให้เกิดมวลน้ำสะสมในปริมาณมากล้นตลิ่งบริเวณสถานี M.7 อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี มีระดับน้ำสูงสุด 115.97 ม.รทก. (รอบปีการเกิดซ้ำของระดับน้ำ 20 ปี) ปริมาณน้ำสูงสุด 5,238 ลบ.ม./วินาที เป็นมวลน้ำหลากล้นตลิ่ง 40,000 ล้าน ลบ.ม. [3] ส่งผลให้พื้นที่ลุ่มต่ำซึ่งมีน้ำท่วมเป็นประจำมีระดับน้ำท่วมสูงโดยเฉพาะพื้นที่วารินชำราบน้ำท่วมสูงกว่า 4 เมตร จนขยายบริเวณไปถึงพื้นที่ชุมชนเมืองอุบลราชธานี พื้นที่เศรษฐกิจสำคัญ ระบบสาธารณูปโภค เส้นทางสัญจรเกือบทุกสายถูกน้ำท่วมหนัก แม้กระทั่งถนนสายเลี่ยงเมืองเชื่อมระหว่างเมืองอุบลราชธานีกับวารินชำราบน้ำท่วมบริเวณเชิงสะพานสูงกว่า 1 เมตร ทำให้ประชาชนไม่สามารถใช้เส้นทางสัญจรได้ [4]

ปี พ.ศ. 2556 ได้มีการจำลองสภาพน้ำหลากในแม่น้ำมูลและแม่น้ำชีในเขตจังหวัดอุบลราชธานี และเสนอแนวทางการป้องกันและบรรเทาอุทกภัย โดยใช้แบบจำลอง

MIKE 11 จำลองเหตุการณ์อุทกภัยในปี พ.ศ. 2553 การแก้ไขปัญหาน้ำท่วมด้วยการผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานี โดยมีคลองผันน้ำ 2 ขนาดคือ แบบที่ 1 ท้องคลองกว้าง 30 เมตร ลึก 7 เมตร และแบบที่ 2 ท้องคลองกว้าง 40 เมตร ลึก 9 เมตร พบว่าสามารถผันน้ำเลี่ยงเมืองได้สูงสุด 174 ลบ.ม./วินาที และ 319 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ [5] นอกจากแบบจำลอง MIKE แล้วยังมีแบบจำลอง HEC-RAS เป็นแบบจำลองฟรีแวร์สามารถจำลองชลศาสตร์การไหลแบบ 1 มิติ และ 2 มิติ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 ถึงปัจจุบัน ทำให้ทฤษฎีและการวิเคราะห์มีความทันสมัย [6] จึงมีการใช้แบบจำลอง HEC-RAS ในหลายพื้นที่ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศอย่างแพร่หลาย เช่น การประเมินสภาพน้ำท่วมพื้นที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี [7] พื้นที่ลุ่มน้ำลำตะคอง [8] การจำลองการเกิดน้ำท่วมลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนกลาง [9] การวิเคราะห์การไหลหลากของแม่น้ำกับการวางแผนคลองผันน้ำเพื่อลดอุทกภัยแม่น้ำป่าสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ [10] เปรียบเทียบแบบจำลอง HEC-RAS ระหว่างแบบผสม 1 มิติ/2 มิติ และ 2 มิติ พื้นที่ตอนล่างของลุ่มน้ำ Kelani ประเทศศรีลังกา [11] การบรรเทาอุทกภัยพื้นที่ Sungai Pinji รัฐเประ ประเทศมาเลเซีย [12] เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวมีผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ดี

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อจำลองสภาพน้ำท่วมที่ล้นตลิ่งออกจากแม่น้ำมูลในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี ด้วยแบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ โดยจำลองเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2562 และประเมินการลดผลกระทบจากน้ำท่วมเมื่อมีแผนงานคลองผันน้ำของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

*2.1 แบบจำลอง HEC-RAS* [13], [14]

แบบจำลอง HEC-RAS เวอร์ชั่น 6.4.1 พัฒนาโดยกองทัพสหรัฐอเมริกา (Hydrologic Engineering Center for the U.S. Army Corps of Engineering) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ชลศาสตร์ได้ทั้ง 1 มิติ (one-dimensional) และ 2 มิติ (two-dimensional) เป็นการจำลองสภาพการไหลโดยคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับผิวน้ำและความเร็วจากหน้าตัดหนึ่งไปยังหน้าตัดถัดไปจนถึงหน้าตัดบนสุดโดยใช้สมการพลังงาน (Energy Equation) ด้วยกระบวนการวนซ้ำเรียกว่า Standard Step Method แสดงดังสมการที่ (1) และการสูญเสียพลังงานดังสมการที่ (2) และแสดงแผนผังอธิบายสมการดังรูปที่ 2

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

$$h_e = L\bar{S}_f + C\left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right) \quad (2)$$

เมื่อ $Z_1, Z_2$ = ระดับท้องน้ำแต่ละหน้าตัดลำน้ำ

$Y_1, Y_2$ = ความลึกน้ำแต่ละหน้าตัดลำน้ำ

$V_1, V_2$ = ความเร็วเฉลี่ย

$\alpha_1, \alpha_2$ = ค่าสัมประสิทธิ์ความเร็ว

$g$ = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

$h_e$ = การสูญเสียหัวพลังงาน

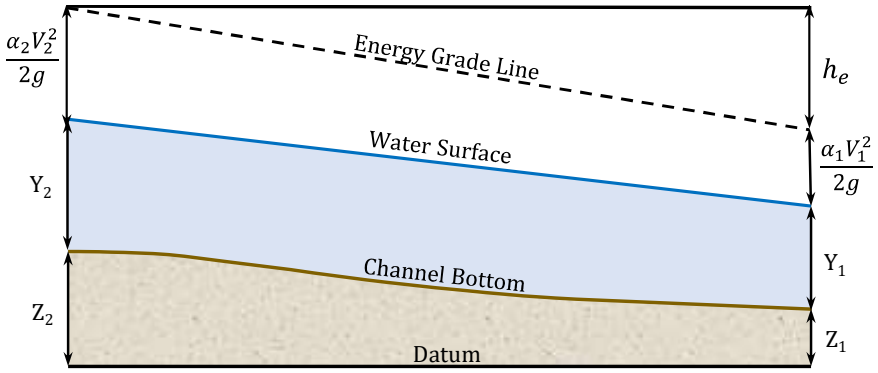
$L$ = ความยาวลำน้ำ

$\bar{S}_f$ = ความลาดชันของเส้นพลังงานเฉลี่ย

$C$ = สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากการบีบและขยายลำน้ำ

แบบจำลองการไหล 1 มิติ และ 2 มิติ มีผลต่อระดับน้ำและพื้นที่น้ำท่วมที่แตกต่างกัน ในกรณีที่ความลาดชันลำน้ำไม่สม่ำเสมอ ความลาดชันลำน้ำสูง หน้าตัดลำน้ำมีขนาดหลากหลาย ลำน้ำมีความคดเคี้ยว พื้นที่น้ำท่วมมีบริเวณกว้าง ทิศทางการไหลของน้ำไม่สามารถคาดเดาได้ ลำน้ำที่แตกแขนงมากมีความซับซ้อนในการไหล ลักษณะนี้การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 2 มิติอาจให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า 1 มิติ โดยเฉพาะการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady flow) การคำนวณมีความละเอียดและมีเสถียรภาพของสูงกว่า สำหรับพื้นที่ศึกษามีความลาดชันไม่สม่ำเสมอ รูปตัดลำน้ำมีความหลากหลาย และมีพื้นที่น้ำท่วมเป็นบริเวณกว้าง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ แบบการไหลไม่คงที่ ซึ่งแปรผันกับเวลาและพื้นที่การไหลทั้ง 2 ทิศทาง

สมการพื้นที่ฐานการไหลของแบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ อธิบายด้วยการเคลื่อนที่ของการไหลในสามมิติ (Navier-Stokes Equations) โดยที่ลดความซับซ้อนให้น้อยลงโดยใช้สมมติฐานต่างๆ ได้แก่ การไหลเป็นแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) มีความหนาแน่นคงที่ ความดันเป็นแบบ Hydrostatic และสมการถูกปรับให้อยู่ในรูปค่าเฉลี่ยเรย์โนลด์ (Reynolds averaged) และยังมีสมมติฐานเพิ่มเติมว่าในมิติความลึกของน้ำมีขนาดเล็กกว่ามิติในแนวนอนมากซึ่ง เป็นลักษณะการไหลในลำน้ำ ช่องทางน้ำ หรือพื้นที่น้ำท่วม ทั้งนี้เพื่อให้แก้สมการการไหลของน้ำได้ง่ายขึ้น เรียกว่า สมการน้ำตื้น (Shallow Water Equation หรือ SWE) ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equation) ดังสมการที่ (3) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศทาง x และ y (x and y momentum conservation) ดังสมการที่ (4)




รูปที่ 2 ผังประกอบการอธิบายสมการพลังงาน

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \qquad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+(V.\nabla)V+f_c kV= -g\nabla z_s+\frac{1}{h}\nabla .\left(v_t h\nabla V\right)-\frac{\tau_b}{\rho R}+\frac{\tau_s}{\rho h} \qquad (4)$$

เมื่อ $t$ = เวลา

$h$ = ความลึกของน้ำ

$u, v$ = ความเร็วที่ความลึกเฉลี่ย ทิศทาง x และ y

$V$ = เวกเตอร์ความเร็ว

$\nabla$ = $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)^{\top}$

$f_c$ = พารามิเตอร์ Coriolis

$k$ = หนึ่งหน่วยเวกเตอร์ในแนวแกนตั้ง

$z_s$ = ระดับผิวน้ำวัดจากระดับอ้างอิง

$h$ = ความลึกของน้ำ

$R$ = รัศมีชลศาสตร์

$\tau_b$ = เวกเตอร์แรงเฉือนบริเวณพื้นผิวท้องน้ำ

$\tau_s$ = เวกเตอร์แรงเฉือนของลมต่อผิวน้ำ

$\rho$ = ความหนาแน่นของของน้ำ

$v_t$ = ความหนืดของกระแสน้ำวน

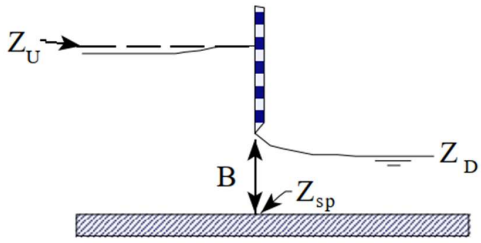
การไหลในน้ำตื้นบางแห่ง ที่มีเงื่อนไขความแตกต่างของความดันจากแรงโน้มถ่วง และแรงเสียดทานของพื้นผิวการไหล เป็นเงื่อนไขหลักในสมการโมเมนตัม จะสามารถละเว้นเงื่อนไขความไม่คงตัว และความหนืดได้ สมการโมเมนตัมในรูปแบบนี้เรียกว่า Diffusion Wave Approximation เมื่อรวมกับสมการอนุรักษ์มวลแล้วจะได้แบบจำลองสมการเดี่ยว เรียกว่า Diffusive Wave Approximation of the Shallow Water หรือ DWE ดังสมการที่ (5) เป็นวิธีการจำลองการไหลในน้ำตื้นที่มีการไหลแพร่กระจายน้ำแบบช้าๆ มีความเร็วการไหลไม่สูง การไหลของน้ำไม่เกิดการปั่นป่วน จึงเป็นสมการที่ไม่ซับซ้อนและง่ายกว่า สมการน้ำตื้น

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla\left(\beta \nabla z_s\right) + q \qquad (5)$$

เมื่อ $\nabla z_s$ = ระดับความลาดชันของผิวน้ำ

$$\beta = \frac{R^{2/3} h}{n\left|\nabla z_s\right|^{1/2}}$$

ประตูระบายน้ำแบบบานตรง (Sluice Gate) มีสมการการไหลผ่านประตูแบบอิสระดังสมการที่ (5) แต่เมื่อระดับน้ำด้านท้ายน้ำเพิ่มสูงขึ้นจนไม่สามารถไหลผ่านประตูได้อย่างอิสระ ในลักษณะระดับน้ำด้านท้ายน้ำเกิดการเท้อขึ้นไปทำให้ระดับน้ำเหนือบานประตูจะสูงขึ้น บานประตูมีส่วนที่จมน้ำแบบจำลองจะเปลี่ยนไปใช้สมการที่ (6) การจมน้ำของบานประตูจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความลึกท้ายน้ำเหนือช่องระบายน้ำหารด้วยพลังงานด้านเหนือน้ำเหนือช่องระบายน้ำมากกว่า 0.67 แสดงส่วนต่างๆ ของประตูระบายน้ำดังรูปที่ 3




รูปที่ 3 ส่วนประกอบสมการประตูระบายน้ำบานตรง

$$Q = CWB\sqrt{2gH} \qquad (5)$$

เมื่อ $Q$ = อัตราการไหล

C = ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (0.5-0.7)

W = ความกว้างของบานประตูในทางระบายน้ำ

H = Head พลังงานด้านเหนือน้ำเหนือธรณีประตูระบายน้ำ ($Z_U$-$Z_{SP}$)

$Z_U$ = ระดับเส้นพลังงานด้านเหนือน้ำ

$Z_{SP}$ = ระดับธรณีประตูระบายน้ำระบายน้ำ

$$Q = CWB\sqrt{3gH} \qquad (6)$$

เมื่อ H = ($Z_U$-$Z_D$)

$Z_D$ = ระดับน้ำด้านท้ายน้ำ

*2.2 แบบจำลอง NAM*

แบบจำลอง NAM เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-Runoff Model) พัฒนาโดย Nielsen และ Hansen จาก Institute of Hydrodynamics and Hydraulics Engineering Technical University of Denmark สำหรับประเมินปริมาณน้ำท่าเพื่อนำมาใช้เป็นปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral Inflow) และประเมินน้ำท่าด้านเหนือน้ำ (Upstream) บริเวณที่ไม่มีสถานีตรวจวัดปริมาณน้ำท่า

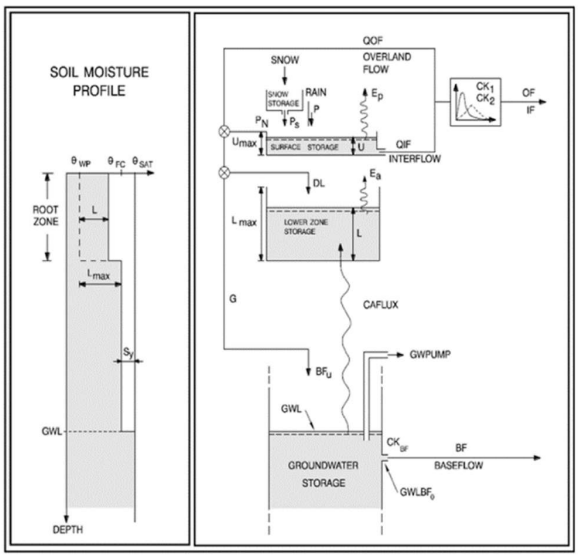
โครงสร้างของแบบจำลอง NAM แสดงดังรูปที่ 4 เป็นการจำลองลักษณะของพื้นที่ลุ่มน้ำตามวัฏจักรของน้ำ สำหรับประเทศไทยสามารถกำหนดให้ปริมาณน้ำจะถูกแบ่งไปเก็บกักไว้ใน 3 ส่วน (ไม่พิจารณาส่วนของหิมะ) ได้แก่ การเก็บกักผิวดิน การเก็บกักของชั้นดินส่วนล่าง และการเก็บกักของน้ำใต้ดิน มีรายละเอียดแต่ละชั้นเก็บกักน้ำดังนี้ [15]

1. การเก็บกักบนผิวดิน (Surface Storage) คือ ปริมาณน้ำที่ค้างอยู่บนพืช และกักเก็บอยู่ในแอ่งบนผิวดิน โดย $U_{max}$ คือ ปริมาณน้ำสูงสุดที่จะเก็บไว้ได้ในส่วนของการเก็บกักบนผิวดิน

2. การเก็บกักของชั้นดินส่วนล่าง (Lower Zone Storage) เป็นปริมาณความชื้นของชั้นดินที่อยู่ลึกลงไปจากส่วนของผิวดิน โดยที่ $L_{max}$ คือ ปริมาณน้ำสูงสุดที่จะเก็บไว้ได้ในส่วนของการเก็บของชั้นดินส่วนล่าง

3. การเก็บกักของชั้นน้ำใต้ดิน คือ ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านการเก็บกักบริเวณชั้นดินส่วนล่างมาเก็บกักที่ชั้นนี้

สรุปปริมาณน้ำของการเก็บกักบนผิวดินจะเกิดการระเหยบางส่วน และบางส่วนซึมสู่ดินชั้นล่าง หลังจากนั้นปริมาณน้ำที่เกินจากการเก็บกักบนผิวดินสูงสุด จะกลายเป็นปริมาณน้ำที่ไหลบ่าบนผิวดิน (Overland Flow)




รูปที่ 4 โครงสร้างแบบจำลอง NAM

*2.3 การปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง (Calibration and Validation)*

การปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การไหล คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning (n) เป็นค่าที่แสดงความเสียดทานต่อการไหลในทางน้ำเปิด การเลือกค่า Manning (n) พิจารณาจากลักษณะพื้นที่ศึกษาเทียบกับช่วงข้อมูลที่คู่มือแนะนำ มาทดลองกับแบบจำลองจนได้ค่าที่เหมาะสม การปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง โดยวิธีทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ Coefficient of Determination ($R^2$) [8] และค่า Root Mean Square Error (RMSE) [9] ดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับข้อมูลจริง

$$R^2=\left\{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{Oi}-\bar{Q}_O)*(Q_{Si}-\bar{Q}_S)}{\left[\sum_{i=1}^{N}(Q_{Oi}-\bar{Q}_O)^2*\sum_{i=1}^{N}(Q_{Si}-\bar{Q}_S)^2\right]^{0.5}}\right\} \quad (7)$$

$$RMSE=\left\{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Q_{Oi}-Q_{Si})^2}{N}\right\}^{0.5} \quad (8)$$

เมื่อ $N$ = จำนวนข้อมูล

$Q_O$ = ระดับน้ำจากการตรวจวัดที่เวลาใดๆ

$\bar{Q}_O$ = ระดับน้ำจากการตรวจวัดเฉลี่ย

$Q_S$ = ระดับน้ำจากแบบจำลองที่เวลาใดๆ

$\bar{Q}_S$ = ระดับน้ำจากแบบจำลองเฉลี่ย

## 3. ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 5 และมีรายละเอียดดังนี้

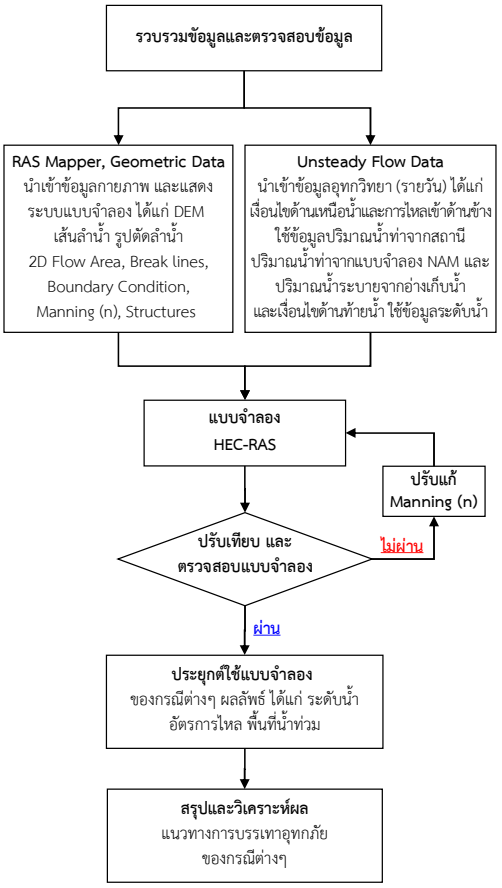
*3.1 รวบรวมข้อมูลและตรวจสอบข้อมูล*

1. รูปตัดลำน้ำ รวบรวมข้อมูลผลสำรวจรูปตัดลำน้ำ (จาก สทนช. และกรมชลประทาน)

2. ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation, DEM) มาตราส่วน 1:4,000 ความละเอียดของขนาดกริด 5x5 เมตร (จากกรมพัฒนาที่ดิน) เป็นข้อมูลบอกระดับพื้นผิวภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา

3. ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยา (ข้อมูลรายวัน) ประกอบด้วย ข้อมูลการระเหยของสถานีตรวจวัดอากาศ ได้แก่ ยโสธร ศรีสะเกษ และอุบลราชธานี ข้อมูลปริมาณฝน จำนวน 44 สถานี (จากกรมอุตุนิยมวิทยา) ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน ได้แก่ สถานี E.2A M.5 M.190 M.170 M.176 M.157 M.32 และ M.69 ข้อมูลระดับน้ำ

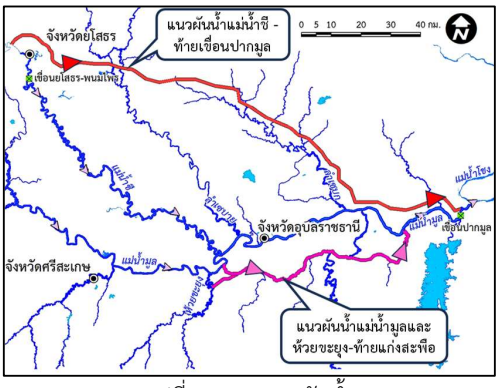
และข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและปริมาณน้ำ (Rating Curve) ของสถานีวัดน้ำท่า M.7 (จากกรมชลประทาน) และสถานี 020139 (จากกรมทรัพยากรน้ำ) ข้อมูลการระบายน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนสิรินธร (จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย) เป็นข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่จะต้องนำเข้าแบบจำลอง




รูปที่ 5 ขั้นตอนการวิจัย

4. ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินจากกรมพัฒนาที่ดิน เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning (n)

5. ข้อมูลแนวคลองผันน้ำ ได้แก่ 1) โครงการผันน้ำชีล่าง-เซบาย-เซบก-ตุงลุง-ท้ายเขื่อนปากมูล เป็นแนวทางการผันน้ำในโครงการศึกษาแผนหลักแบบบูรณาการ เพื่อบรรเทาอุทกภัยและภัยแล้ง ของสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ ซึ่งบรรเทาอุทกภัยโดยการผันน้ำจากแม่น้ำชี ลำเซบาย และลำเซบก รวม 1,090 ลบ.ม./วินาที โดยเก็บน้ำไว้ในคลองผันน้ำเพื่อใช้ในช่วงฤดูแล้งสามารถพัฒนาพื้นที่ชลประทานเปิดใหม่ได้ 1,340,531 ไร่ และ 2) โครงการศึกษาความเหมาะสมเพื่อบรรเทาอุทกภัย จังหวัดอุบลราชธานี (ผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานี) ของกรมชลประทาน เป็นการผันน้ำจากแม่น้ำมูลและห้วยขะยุงไปยังท้ายแก่งสะพือ โดยผันน้ำจากแม่น้ำมูล 800 ลบ.ม./วินาที และผันน้ำจากห้วยขะยุง 400 ลบ.ม./วินาที ทิ้งลงสู่แม่น้ำมูลบริเวณท้ายแก่งสะพือ รวมทั้งหมด 1,200 ลบ.ม./วินาที โดยเก็บน้ำไว้ในคลองผันน้ำเพื่อใช้ในช่วงฤดูแล้งสามารถพัฒนาพื้นที่ชลประทานเปิดใหม่ได้ 55,346 ไร่ แสดงแนวคลองผันน้ำทั้งสองแนวดังรูปที่ 6



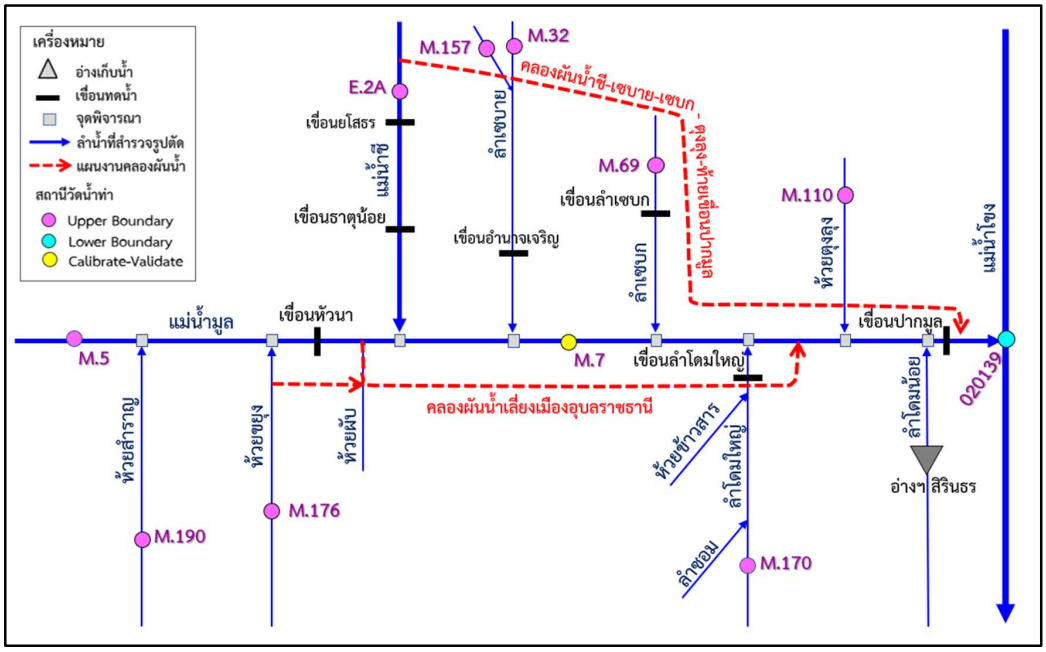

รูปที่ 6 แนวคลองผันน้ำ

*3.2 การปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง*

ในงานวิจัยนี้ได้ปรับเทียบแบบจำลองในช่วงเดือนสิงหาคม-เดือนพฤศจิกายน ปี พ.ศ. 2565 และตรวจสอบแบบจำลองในช่วงเดือนสิงหาคม-เดือนตุลาคม ปี พ.ศ. 2562 ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาที่เกิดน้ำหลากและเป็นช่วงที่กรมชลประทานดำเนินการแขวนบานประตูระบายน้ำแล้ว จึงไม่มีผลกระทบต่อระดับและปริมาณน้ำจากการบริหารจัดการน้ำผ่านประตูระบายน้ำ โดยการสร้างขอบเขตเงื่อนไข (Boundary Conditions) ให้แบบจำลองประกอบด้วย เงื่อนไขด้านเหนือน้ำ (Upper Boundary Condition) กำหนดตำแหน่งสำหรับนำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำท่าบริเวณที่ตั้งสถานีวัดน้ำท่า จำนวน 8 แห่ง ได้แก่

สถานี E.2A M.5 M.190 M.32 M.157 M.170 M.69 และ M.110 รวมทั้งตำแหน่งการระบายน้ำจากเขื่อนสิรินธร ส่วนเงื่อนไขด้านท้ายน้ำ (Lower Boundary Condition) เลือกตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า 020139 แม่น้ำโขงที่โขงเจียม และกำหนดตำแหน่งสำหรับนำเข้าข้อมูลปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Side flow) มี 2 ประเภท คือ Lateral Inflow เป็นตำแหน่งที่มีลำน้ำจากภายนอกเข้ามาในโครงข่ายแบบจำลอง และ Uniform Inflow เป็นแนวของลำน้ำที่อยู่ภายในโครงข่ายแบบจำลอง ซึ่งปริมาณน้ำได้จากการประเมินน้ำฝนเป็นน้ำท่าด้วยแบบจำลอง NAM โดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ NAM จากรายงานการศึกษาแผนหลักการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ กลุ่มลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของ สทนช. มาประยุกต์ใช้กับพื้นที่ศึกษา แสดงโครงข่ายแบบจำลองดังรูปที่ 7

นำผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง มาตรวจสอบความถูกต้อง โดยใช้ค่าทางสถิติมาพิจารณา ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ ($R^2$) และค่า Root Mean Square Error (RMSE) โดย ค่า $R^2$ มากกว่า 0.6 และ ค่า RMSE เข้าใกล้ 0 ซึ่งแสดงว่า ระดับน้ำที่ได้จากการตรวจวัดและจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคตรงกัน [8] เป็นเกณฑ์การตัดสินความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง



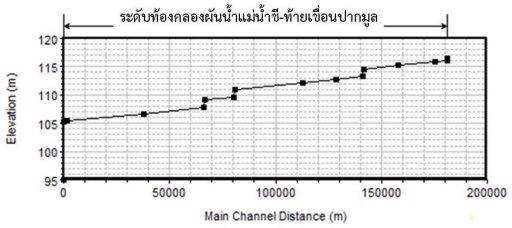

รูปที่ 7 ผังโครงข่ายแบบจำลอง HEC-RAS

*3.3 แนวทางการผันน้ำ*

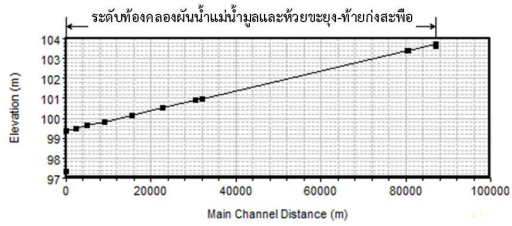
วิเคราะห์การลดผลกระทบจากน้ำท่วม โดยเลือกใช้โครงการผันน้ำของกรมชลประทาน และ สทนช. มาจำลองกับเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2562 ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มี 3 กรณีศึกษา ได้แก่

1. กรณีที่ 1 ผันน้ำจากแม่น้ำชีไปยังท้ายเขื่อนปากมูล โดยผ่านคลองผันน้ำมีความยาว 180.48 กิโลเมตร ตัดผ่านลำเซบาย ลำเซบก และห้วยตุงลุง โดยรับน้ำจากแม่น้ำชีเข้าคลองผันน้ำ 560 ลบ.ม./วินาที ระหว่างทางรับน้ำจาก Side flow ตามแนวคลองผันน้ำ 540 ลบ.ม./วินาที มีท้องคลองกว้าง 50-90 เมตร ลึก 9 เมตร ความลาดเทท้องคลอง 1:25,000 แสดงแนวคลองผันน้ำดังรูปที่ 7 และและระดับท้องคลองผันน้ำดังรูปที่ 8

2. กรณีที่ 2 ผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานีผ่านคลองผันน้ำไปยังท้ายแก่งสะพือ มีความยาวคลองผันน้ำรวม 97 กิโลเมตร มีจุดรับน้ำเข้า 2 ทาง ได้แก่ จุดรับน้ำจากห้วยขะยุง ความสามารถระบายน้ำ 400 ลบ.ม/วินาที ท้องคลองกว้าง 33 เมตร ลึก 9 เมตร ความลาดเท 1:25,000 และจุดรับน้ำจากแม่น้ำมูลความสามารถระบายน้ำ 800 ลบ.ม./วินาที ท้องคลองกว้าง 104 เมตร ลึก 9 เมตร ความลาดท้องคลอง 1:20,000 แสดงแนวคลองผันน้ำดังรูปที่ 7 และระดับท้องคลองผันน้ำดังรูปที่ 9




รูปที่ 8 ระดับท้องคลองผันน้ำแม่น้ำชี




รูปที่ 9 ระดับท้องคลองผันน้ำแม่น้ำมูล

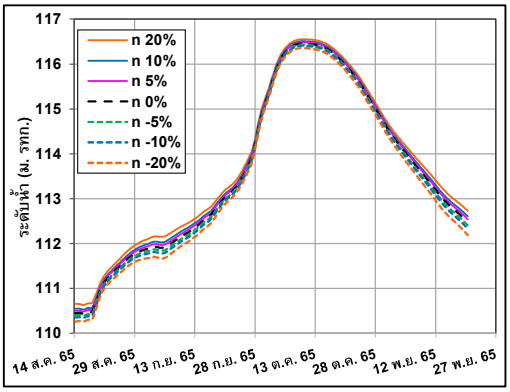
3. กรณีที่ 3 วิเคราะห์การผันน้ำกรณีที่ 1 และ 2 ร่วมกัน

ปริมาณน้ำที่เข้าคลองผันน้ำจะถูกควบคุมด้วยประตูระบายน้ำ โดยปริมาณน้ำสูงสุดจะไม่เกินที่กำหนดไว้ในแต่ละกรณี และกำหนดช่วงเวลาในการผันน้ำเมื่อเกิดปริมาณน้ำหลากจากทางแม่น้ำชีและแม่น้ำมูล เนื่องจากปีพ.ศ. 2562 เกิดน้ำหลากในลุ่มน้ำชีเป็นส่วนใหญ่การผันน้ำจากแม่น้ำชีจะเริ่มต้นก่อนแม่น้ำมูล โดยกำหนดให้เริ่มผันน้ำจากแม่น้ำชีวันที่ 14 สิงหาคม 2562 ซึ่งมีปริมาณน้ำในแม่น้ำชีที่สถานี E.20A เท่ากับ 454 ลบ.ม./วินาที เป็นการตัดยอดน้ำก่อนที่จะเกิดการล้นตลิ่งเข้าท่วมพื้นที่ลุ่มต่ำบริเวณ อ.เขื่องใน ส่วนแม่น้ำมูลจะเริ่มผันน้ำเมื่อมีการเปิดประตูระบายน้ำเขื่อนหัวนาที่ระดับน้ำสูงกว่า 110 ม.รทก. จึงเริ่มผันน้ำจากแม่น้ำมูลวันที่ 4 กันยายน 2562 มีปริมาณน้ำในแม่น้ำมูลที่สถานี M.7 เท่ากับ 1,705 ลบ.ม./วินาที และห้วยขะยุงมีปริมาณน้ำที่สถานี M.176 เท่ากับ 167 ลบ.ม./วินาที จนกว่าระดับน้ำที่สถานี M.7 จะเข้าสู่สภาวะปกติ เมื่อระดับน้ำอยู่ต่ำกว่าตลิ่งในวันที่ 23 กันยายน พ.ศ. 2562

## 4. ผลการทดลอง

*4.1 ผลการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง HEC-RAS*

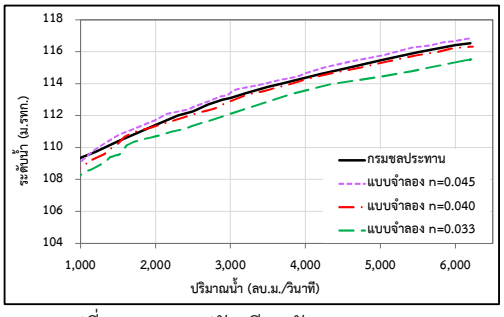
ก่อนการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระ Manning (n) ได้มีการวิเคราะห์ความไวของแบบจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ n ในช่วง ±5% ถึง ±20% ผลการวิเคราะห์พบว่าระดับน้ำสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.15 เมตร (รูปที่ 10) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของค่าค่าพารามิเตอร์ Manning (n) ในช่วงดังกล่าว



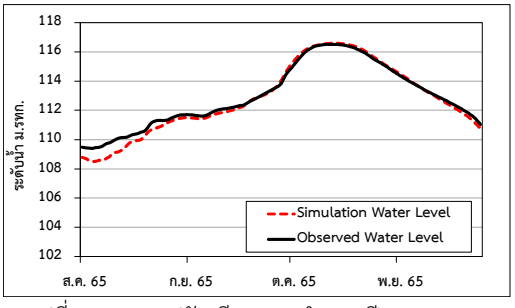

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์ความไวของค่าพารามิเตอร์ Manning (n) ที่สถานี M.7

ผลการปรับเทียบแบบจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์ Manning (n) ของแม่น้ำมูล โดยใช้ข้อมูล Rating Curve ปี พ.ศ. 2565 ที่สถานี M.7 พบว่าค่า Manning (n) เท่ากับ 0.040 ให้ผล Rating Curve ของแบบจำลองใกล้เคียงกับ

ของกรมชลประทาน ดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 มีผลค่าทางสถิติ $R^2$ = 0.978 และค่า RMSE = 0.057 เมตร

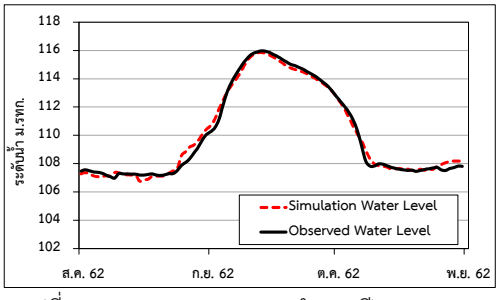



รูปที่ 11 ผลการปรับเทียบกับ Rating Curve




รูปที่ 12 ผลการปรับเทียบแบบจำลอง ปี พ.ศ. 2565

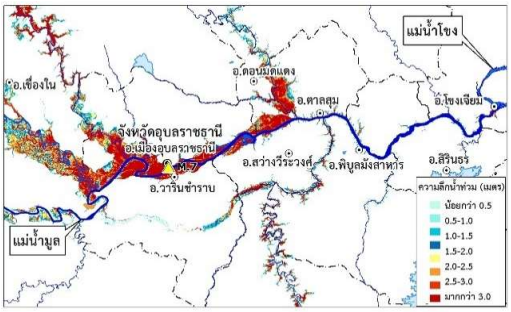
ผลการตรวจสอบแบบจำลองโดยใช้ค่าระดับน้ำ ปี พ.ศ. 2562 พบว่าค่าทางสถิติ $R^2$ = 0.964 และค่า RMSE = 0.140 เมตร ดังรูปที่ 13 ซึ่งค่า $R^2$ มากกว่า 0.6 และค่า RMSE เข้าใกล้ 0 แสดงว่าข้อมูลจากสถานีตรวจวัดและจากแบบจำลอง HEC-RAS มีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคตรงกัน ดังนั้น แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ




รูปที่ 13 ผลการตรวจสอบแบบจำลอง ปี พ.ศ. 2562

*4.2 ผลการศึกษาจำลองสภาพน้ำท่วมปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2562)*

ผลการจำลองพื้นที่น้ำท่วมที่ได้รับผลกระทบจากน้ำล้นตลิ่งแม่น้ำมูลบริเวณจังหวัดอุบลราชธานี ดังรูปที่ 14 พบว่ามีระดับน้ำสูงสุดในวันที่ 13 กันยายน 2562 บริเวณสถานี M.7 เท่ากับ 115.86 ม.รทก. (ตรวจวัดจริง 115.97 ม.รทก.) มีปริมาณการไหลสูงสุด 5,238 ลบ.ม./วินาที (ตรวจวัดจริง 5,265 ลบ.ม./วินาที) มีพื้นที่น้ำท่วมเท่ากับ 362.21 ตร.กม. (226,381 ไร่) ดังตารางที่ 1




รูปที่ 14 ผลการจำลองพื้นที่น้ำท่วมสภาพปัจจุบัน

ตารางที่ 1 สรุปพื้นที่และความลึกน้ำท่วมรายอำเภอ

| อำเภอ | พื้นที่น้ำท่วม | | ความลึกน้ำท่วม |
|---|---|---|---|
| | (ตร.กม.) | (ไร่) | เฉลี่ย (เมตร) |
| เขื่องใน | 134.44 | 84,023 | 1.96 |
| เมือง | 110.59 | 69,118 | 2.62 |
| วารินชำราบ | 30.44 | 19,023 | 2.99 |
| ดอนมดแดง | 30.82 | 19,262 | 2.74 |
| ตาลสุม | 27.80 | 17,377 | 2.48 |
| สว่างวีรวงศ์ | 16.95 | 10,596 | 2.64 |
| พิบูลมังสาหาร | 7.46 | 4,661 | 1.53 |
| โขงเจียม | 2.63 | 1,641 | 2.16 |
| สิรินธร | 1.09 | 680 | 1.61 |
| รวม | 362.21 | 226,381 | 1.97 |

*4.3 ผลการศึกษากรณีมีโครงการบรรเทาอุทกภัย*

ผลการจำลองเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ. 2562 เมื่อมีโครงการผันน้ำกรณีต่าง ๆ พบว่าทั้งพื้นที่น้ำท่วม ระดับน้ำ

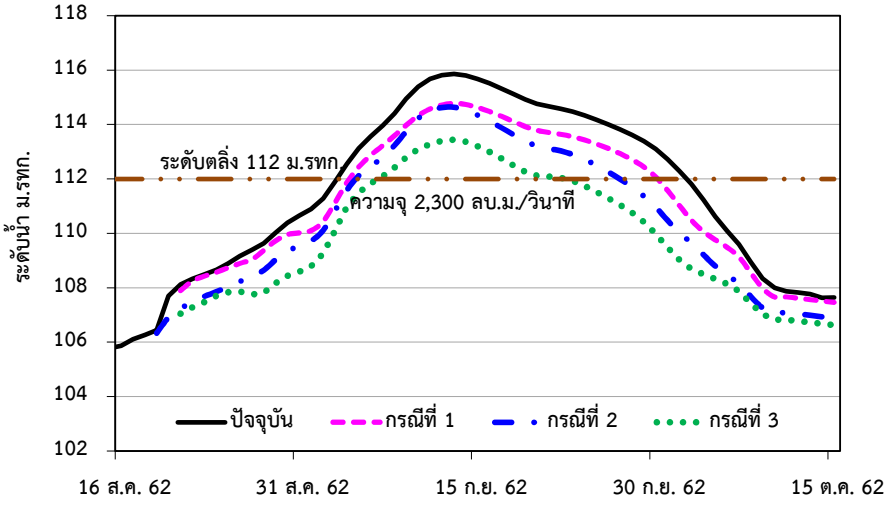
ท่วม และระยะเวลาน้ำท่วมขังลดลงแสดงดังตารางที่ 2 และ รูปที่ 15 ถึง รูปที่ 16 สรุปได้ดังนี้

กรณีที่ 1 ผันน้ำจากแม่น้ำชีผ่านคลองผันน้ำไปยังท้ายเขื่อนปากมูล รวมความสามารถระบายน้ำ 1,100 ลบ.ม./วินาที สามารถลดพื้นน้ำท่วมเหลือ ตร.กม. (ลดลง 40.91 ตร.กม. คิดเป็น 11.30 %) ระดับน้ำและปริมาณน้ำสูงสุดที่สถานี M.7 ลดลง 1.08 เมตร และ 1,140 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ และระยะเวลาน้ำท่วมลดลง 3 วัน

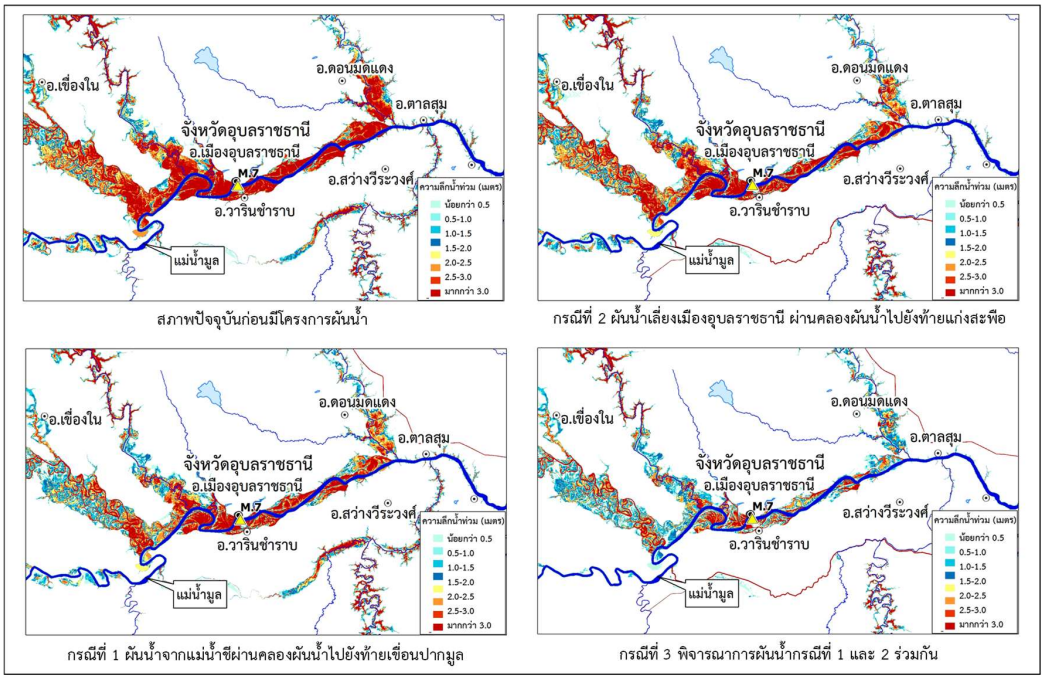
ตารางที่ 2 ผลการจำลองเหตุการณ์น้ำท่วมปี พ.ศ.2562 เมื่อมีโครงการการผันน้ำกรณีต่างๆ

| กรณีศึกษา | พื้นที่น้ำท่วม (ตร.กม.) | ระดับน้ำท่วมที่สถานี M.7 (ม.รทก.) | ความลึกน้ำท่วมเฉลี่ย (เมตร) | ระยะเวลาน้ำล้นตลิ่ง (วัน) |
|---|---|---|---|---|
| สภาพปัจจุบัน | 362.21 | 115.86 | 1.97 | 29 |
| กรณีที่ 1 ผันน้ำจากแม่น้ำชี-ท้ายเขื่อนปากมูล | 321.30<br>(-40.91) | 114.78<br>(-1.08) | 1.48<br>(-0.49) | 26<br>(-3) |
| กรณีที่ 2 ผันน้ำจากแม่น้ำมูลและห้วยขะยุง-ท้ายแก่งสะพือ | 328.12<br>(-34.09) | 114.65<br>-1.21 | 1.41<br>-0.56 | 22<br>(-7) |
| กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผันน้ำกรณีที่ 1 และ 2 ร่วมกัน | 270.60<br>(-91.61) | 113.44<br>(-2.42) | 1.04<br>(-0.93) | 16<br>(-13) |

หมายเหตุ : ผลที่มีเครื่องหมายลบ คือ ค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับสภาพปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2562)
ส่วนเครื่องหมายบวก คือ ค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสภาพปัจจุบัน (ปี พ.ศ. 2562)




รูปที่ 15 ผลการจำลองระดับน้ำ ที่สถานี M.7 สภาพปัจจุบันและกรณีมีการผันน้ำ




รูปที่ 16 ขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมและความลึกน้ำท่วม เมื่อมีโครงการการผันน้ำกรณีต่างๆ

กรณีที่ 2 ผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานี ผ่านคลองผันน้ำไปยังท้ายแก่งสะพือ รวมความสามารถระบายน้ำ 1,200 ลบ.ม./วินาที สามารถลดพื้นน้ำท่วมเหลือ 328.12 ตร.กม. (ลดลง 34.09 ตร.กม. คิดเป็น 9.41 %) ระดับน้ำและปริมาณน้ำสูงสุดที่สถานี M.7 ลดลง 1.21 เมตร และ 998 ลบ.ม./วินาที และระยะเวลาน้ำท่วมลดลง 7 วัน

กรณีที่ 3 วิเคราะห์การผันน้ำกรณีที่ 1 และ 2 ร่วมกัน ผันน้ำจากแม่น้ำชีผ่านคลองผันน้ำไปยังท้ายเขื่อนปากมูล และผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานี ผ่านคลองผันน้ำไปยังท้ายแก่งสะพือ รวมความสามารถระบายน้ำ 2,300 ลบ.ม./วินาที) สามารถลดพื้นน้ำท่วมเหลือ 270.60 ตร.กม. (ลดลง 91.61 ตร.กม. คิดเป็น 25.29 %) ระดับน้ำและปริมาณน้ำสูงสุดที่สถานี M.7 ลดลง 2.42 เมตร และ 2,050 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ และระยะเวลาน้ำท่วมลดลง 13 วัน

## 5. สรุปผล

1. จากการปรับเทียบและตรวจสอบแบบจำลองในช่วงเดือนสิงหาคม-ตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงเกิดน้ำหลาก โดยปรับค่าพารามิเตอร์ manning (n) จนแบบจำลองสามารถวิเคราะห์ปริมาณน้ำและระดับน้ำได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดของกรมชลประทาน และมีความน่าเชื่อถือในทางสถิติ ดังนั้นแบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์น้ำหลากในลำน้ำมูล

2. จากการวิเคราะห์แนวทางการบรรเทาอุทกภัยด้วยแบบจำลอง HEC-RAS 2 มิติ หลังจากมีคลองผันน้ำสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมได้ 9.4 – 25.3 % ซึ่งในเชิงพื้นที่ลดผลกระทบจากน้ำท่วมได้ไม่มากเนื่องจากพื้นที่น้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ลุ่มต่ำมีระดับน้ำท่วมสูงมากกว่า 3 เมตร หากพิจารณาในเชิงความลึกน้ำท่วมและระยะเวลาน้ำท่วม พบว่าความลึกน้ำท่วมลดลงค่อนข้างมาก โดยกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ทั้งสองกรณีมีอัตราการผันน้ำใกล้เคียงกัน จึงลดระดับน้ำท่วมสูงสุดทั้งสองกรณีใกล้เคียงเช่นกัน แต่ยังคงมีระดับน้ำท่วมที่ค่อนข้างสูงอยู่ นอกจากนี้พบว่าปริมาณน้ำหลากส่วนใหญ่มาจากแม่น้ำชีและลำเซบาย ซึ่งอยู่ทิศเหนือของจังหวัดอุบลราชธานี ส่วนปริมาณน้ำจากแม่น้ำมูลและห้วยขะยุง บริเวณจังหวัดศรีสะเกษมีปริมาณอยู่ในเกณฑ์ปกติ ส่วนกรณีที่ 3 พิจารณาการผันน้ำทั้งสองกรณีร่วมกัน โดยผันน้ำจากแม่น้ำชีไปท้าย

เขื่อนปากมูล และผันน้ำเลี่ยงเมืองอุบลราชธานีจากแม่น้ำมูลและห้วยขะยุงไปท้ายแก่งสะพือ สามารถลดผลกระทบจากน้ำท่วมได้มาก และลดระยะเวลาน้ำท่วมขังได้มากเช่นกัน ถึงแม้ว่ายังมีพื้นที่น้ำท่วมเหลืออยู่ ซึ่งส่วนใหญ่ท่วมบริเวณพื้นที่ลุ่มต่ำริมแม่น้ำมูล โดยมีปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่ยังเกินจากความจุลำน้ำ 884 ลบ.ม./วินาที และระดับน้ำสูงสุดล้นจากตลิ่ง 1.42 เมตร จึงสามารถลดความรุนแรงของน้ำท่วมในพื้นที่ลุ่มต่ำได้ และสามารถป้องกันน้ำท่วมบริเวณพื้นที่เศรษฐกิจเมืองอุบลราชธานี และเส้นทางสัญจรสายหลักได้ รวมทั้งถนนเชื่อมระหว่างเมืองอุบลราชธานีและวารินชำราบ ดังนั้น การวัดประสิทธิภาพของคลองผันน้ำไม่ควรพิจารณาเฉพาะในมิติของขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมเท่านั้น แต่ควรให้ความสำคัญกับการลดระดับน้ำที่ล้นตลิ่งและระยะเวลาที่พื้นที่ประสบภัยน้ำท่วมต้องเผชิญกับภาวะน้ำท่วม ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเสียหายทางเศรษฐกิจ สังคม ความเป็นอยู่ และความสามารถในการฟื้นตัวของพื้นที่ประสบอุทกภัย

## 6. เสนอแนะ

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากเหตุการณ์น้ำท่วมในปี พ.ศ. 2562 เพียงปีเดียว แม้จะมีระดับน้ำท่วมใกล้เคียงกับค่ารอบปีการเกิดซ้ำ 20 ปี ซึ่งมีความรุนแรงระดับปานกลาง แต่อาจไม่สามารถเป็นตัวแทนของสถานการณ์น้ำท่วมที่มีความรุนแรงต่ำหรือสูงได้อย่างครบถ้วน เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของการวิเคราะห์แนวทางการผันน้ำจึงควรพิจารณานำข้อมูลจากเหตุการณ์น้ำท่วมในปีอื่น ๆ ที่มีระดับความรุนแรงแตกต่างกัน มาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบร่วมด้วย

หากมีการวิเคราะห์แผนงานบรรเทาอุทกภัยอื่น ๆ เพิ่มเติม จะสามารถลดพื้นที่น้ำท่วมจนถึงป้องกันน้ำท่วมได้ เช่น แก้มลิงบริเวณแม่น้ำชี-มูล ขุดลอกลำน้ำมูลบางช่วง เป็นต้น ทั้งนี้ เพื่อให้การผันน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและมีเอกภาพ ควรกำหนดเกณฑ์การบริหารจัดการอาคารควบคุมปริมาณน้ำอย่างชัดเจน โดยพิจารณาปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ได้แก่ แนวโน้มระดับน้ำต้นทางที่ใกล้ระดับเตือนภัย ระดับน้ำในคลองผันน้ำ ระดับน้ำปลายคลองผันน้ำ ข้อมูลคาดการณ์สถานการณ์น้ำล่วงหน้า ความเร่งด่วนในการระบายน้ำกรณีฝนตกหนักหรือพายุที่จะพัดผ่านเข้ามา รวมถึงนโยบายและความยินยอมของประชาชนในพื้นที่ปลายน้ำ ซึ่งควรได้รับข้อมูลอย่างครบถ้วนและมีข้อตกลงร่วมกัน

นอกจากนี้ ควรมีการจัดการจังหวะการระบายน้ำเพื่อไม่ให้ยอดน้ำสูงสุดจากแม่น้ำมูลและแม่น้ำชีมาบรรจบกันในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งจะช่วยลดความรุนแรงของสถานการณ์น้ำท่วมในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี และเอื้อให้สามารถ ผันน้ำอย่างมีเอกภาพและสอดคล้องกันระหว่างหน่วยงานและพื้นที่ต่าง ๆ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมชลประทาน สทนช. และกรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล และขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ กำแพงแสน ที่ให้คำชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of the National Water Resources. (2021, Jul.). Information on the Mun River Basin, River Basin Management Division. [Online]. Available: http://rbmd.onwr.go.th /wp-content/uploads/ 2021/07/05-ลุ่มน้ำมูล.pdf

[2] Office of the National Water Resources. (2021, Jul.). Information on the Chi River Basin, River Basin Management Division. [Online]. Available: http://rbmd.onwr.go.th/wp-content/uploads/2021/07/04-ลุ่มน้ำชี.pdf

[3] Office of the National Water Resources. (2024, Mar.). Summary of Flood Management

Lessons Learned in Ubon Ratchathani Province in 2019, The National Water Command Center. [Online]. Available: https://nwcc.onwr.go.th/wp-content/uploads/2024/03/สรุปบทเรียน-การบริหารจัดการอุทกภัย-จ.อุบล-.pdf

[4] [Thairath. (2023, Oct. 1). Flooding in Ubon: More Severe than in 2019. Only One Drivable Road Left in Mueang and Warin Chamrap Districts. [Online]. Available: https://www.thairath.co.th/news/local/northeast/2518955

[5] M. Jaipinta, "The study flood of prevention of Ubon Ratchathani Province in Lower Mun river basin," M.S. thesis, Dept. Water Resources Eng., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2013.

[6] P. Kanjanakaroon, S. Amnuaypornlert, N. Kaewmai, N. Khueankaeo and T. Tathongjai, "The solutions of overbank flow to mitigate the effects of flooding for small streams," *J. King Mongkut's Univ. Technol. North Bangkok*, vol. 34, no. 3, pp. 1–14, 2024.

[7] T. Punmalee, C. Thepprasit, N. Kaewmai, N. Khueankaeo and T. Tathongjai, "Flood assessment using HEC-RAS model: a case study of Surat Thani Province," *J. Sci. Technol. Kasetsart Univ.*, vol. 11, no. 3, pp. 1–14, 2022.

[8] P. Chanla and P. Kosa, "Flow estimation using HEC-RAS model: a case study of Lam Takong River basin," *J. King Mongkut's Univ. Technol. North Bangkok*, vol. 11, no. 1, pp. 1–11, 2020.

[9] P. Munrangsee, "Flood modelling in the middle Chao Phraya River basin using HEC-RAS model," M.S. thesis, Dept. Geography, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand.

[10] S. Chuenchooklin, "River analysis simulation model of main river and diversion channel planning for flood delineation: case study for Pasak River, Phetchabun Province," *J. Naresuan Univ. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 9–18, 2017.

[11] J. Samarasinghe, V. Basnayaka, M. Gunathilake, H. Azamathulla and U. Rathnayake, "Comparing combined 1D/2D and 2D hydraulic simulations using high-resolution topographic data: examples from Sri Lanka–Lower Kelani River Basin," *J. Academia.edu*, pp. 1–19, 2022.

[12] V. Kumar and E. Kasiman, "Flood mitigation for Sungai Pinji, Ulu Kinta, Perak using HEC-HMS and HEC-RAS model," *J. Front. Water Environ.*, vol. 2, no. 1, pp. 10–27, 2024.

[13] US Army Corps of Engineers, HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, ver. 6.0, 2021.

[14] US Army Corps of Engineers, HEC-RAS River Analysis System: Hydraulics Reference Manual, ver. 6.0, 2021.

[15] S. Bumroongpnong, "Regional relationships between NAM model parameters and physical characteristics of sub-catchment in the Upper Ping River Basin," M.S. thesis, Dept. Water Resour. Eng., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2007.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 16-30 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# พฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเตียงลมร้อนแบบพวยพุ่งเสริมด้วยไมโครเวฟ

# Drying Behavior of Khao Dawk Mali 105 Jasmine Paddy in a Spouted Bed Dryer Assisted by Microwave

ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน[1] กระวี ตรีอำนรรค[2] เทวรัตน์ ตรีอำนรรค[2] จิรวัฒน์ กรุณา[3*]
[1]วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600
[2]มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา 30000
[3]วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600
Thamarat Yabsungnoen[1] Krawee Treeamnuk[2] Tawarat Treeamnuk[2] Jirawat Garluna[3*]
Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600
[2]Suranaree University of Technology 111 Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000
[3] Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600
*Corresponding author Email: jirawatg@siamtechno.ac.th
(Received: June 6, 2025; Revised: July 1, 2025 ; Accepted: August 1, 2025)

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกด้วยวิธีการอบแห้ง ได้แก่ อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว หรือไมโครเวฟร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม การทดลองแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้ 1.การอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80°C 2.การอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80°C ร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง 160 W 3.การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศปกติ 4.การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับสอง 320W ร่วมกับอากาศปกติ จากการทดลองพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง ให้ค่าความชื้นสมดุลต่ำที่สุด คือ 4.5%wb และมีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด คือ 1.25 กรัมน้ำต่อนาที ขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมให้ค่าความชื้นสมดุลสูงที่สุดเท่ากับ 12.5%wb และมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดคือ 0.525 กรัมน้ำต่อนาที นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า SEC ของวิธีที่ใช้ไมโครเวฟร่วมกับอากาศร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงความชื้นต่ำ และให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำที่สุดที่ 2% ในขณะที่การใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งเพียงอย่างเดียวให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงสุดที่ 38% และใช้พลังงานจำเพาะต่ำที่สุด ความแตกต่างที่ปรากฏนี้สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มพลังงานที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดแรงตึงในเมล็ดและทำให้เมล็ดข้าวเสียหายมากขึ้น จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่า วิธีการอบแห้งที่ใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดเวลาในการอบแห้งได้ดี แต่ต้องควบคุมระดับพลังงานอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้คุณภาพของเมล็ดข้าวลดลง โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าความขาวของข้าวสารที่อาจลดลงจากความรุนแรงของกระบวนการอบแห้ง

**คำสำคัญ:** การอบแห้งข้าวเปลือก, ไมโครเวฟ, อากาศร้อน, ความชื้นสมดุล, เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น, พลังงานจำเพาะ

**ABSTRACT**

This study aimed to compare the drying behavior of paddy rice using two main drying approaches: hot air drying alone and microwave-assisted drying combined with ambient air. The experiments were conducted under four drying conditions: (1) hot air drying at 80°C, (2) hot air drying at 80°C combined with microwave energy at 160 W, (3) microwave drying at 160 W combined with ambient air, and (4) microwave drying at 320 W combined with ambient air. The results showed that drying with hot air combined with microwave energy at 160 W yielded the lowest equilibrium moisture content, at 4.5% wet basis, and the highest drying rate, at approximately 1.25 $g_{H20}$/min. In contrast, drying with microwave energy at 160 W combined with ambient air resulted in the highest equilibrium moisture content, at 12.5% wet basis, and the lowest drying rate, approximately 0.525 $g_{H20}$/min. Furthermore, it was found that the specific energy consumption (SEC) of the hot air–microwave method tended to increase significantly in the low-moisture content region. This method also resulted in the lowest head rice yield, at 2%. On the other hand, microwave drying at 160 W alone yielded the highest head rice percentage, at 38%, and the lowest SEC. These differences indicate that excessive energy input may generate internal stresses within the kernels, leading to greater damage. Overall, the combination of hot air and microwave drying effectively reduces drying time; however, energy input must be carefully controlled to preserve the quality of the rice, particularly the head rice yield and whiteness, which may deteriorate under overly intense drying conditions.

**Keywords:** Paddy drying, Microwave, Hot air, Equilibrium moisture content, Head rice yield, Specific energy consumption.

## 1. บทนำ

อุตสาหกรรมการเกษตรถือเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทยที่มีสัดส่วน 8-10% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ซึ่งประเทศไทยยังติดอันดับต้น ๆ ของโลกในด้านการส่งออกสินค้าเกษตรอันได้แก่ ยางพาราและมันสำปะหลังที่มีส่วนแบ่งการตลาดโลกสูงกว่า 20% นอกจากนี้ยังมีสินค้าเกษตรอย่างอื่นที่ส่งออกที่สำคัญเช่นกันโดยเฉพาะข้าว ซึ่งไทยเป็นผู้ทรงออกรายใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศไทยและอันดับสองของโลกคิดเป็น 19.2% ของมูลค่าการส่งออกสินค้าเกษตรของไทย

กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวมีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพและมูลค่าของผลผลิตทางเกษตรอย่างมาก เนื่องจากเป็นกระบวนที่ต้องรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้คงคุณภาพจนกว่าจะถึงมือผู้บริโภค กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวยังมีหลายกระบวนการเช่น การคัดแยก กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการแปรรูปและการลดความชื้นหรือการอบแห้ง(Drying) โดยเฉพาะกระบวนการลดความชื้นมีความสำคัญอย่างยิ่งในแง่ของการถนอมอาหารให้สามารถเก็บรักษาได้อย่างยาวนานกว่าปกติ

ตามปกติแล้วหลังการเก็บเกี่ยวข้าวเปลือกจะต้องมีการลดความชื้นในข้าวเปลือกซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 22-24% wet

basis (wb) ให้เหลือความชื้น 14%wb จึงจะสามารถนำมาเก็บรักษาได้อย่างปลอดภัยและจำหน่ายให้ได้ราคาที่เหมาะสมแก่โรงสีหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยวิธีลดความชื้นที่นิยมในประเทศไทยคือการตากลานซึ่งเป็นวิธีนำข้าวเปลือกมาเทลงผ้ามุ้งและเกลี่ยให้กระจายเท่ากันโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการลดความชื้น ซึ่งใช้เวลาในการตาก 2-3วัน หากมีแดดต่อเนื่อง การตากลานจึงเป็นวิธีที่เรียบง่าย ต้นทุนต่ำสุดใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวและไม่พึ่งพาเครื่องจักร อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการตากลานจะเป็นวิธีที่นิยมและต้นทุนต่ำสุดแต่เนื่องจากการขยายกำลังผลิตเพื่อการส่งออกนั้นกลับก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ในการตากข้าวและส่งผลต่อการกีดขวางจราจรสัญจรของยานพาหนะ อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องของการควบคุมคุณภาพของข้าวเปลือกที่ไม่สามารถควบคุมได้อย่างสม่ำเสมอรวมถึงการควบคุมเวลาการลดความชื้นไม่สามารถกำหนดได้ซึ่งขึ้นกับสภาพภูมิอากาศในช่วงเวลานั้นด้วย เพราะฉะนั้นการนำวิธีการอื่นในการลดความชื้นข้าวเปลือกจึงถูกนำมาคิดค้นและวิธีวิจัยในปัจจุบันอย่างแพร่หลายและวิธีลดความชื้นที่นิยมมากที่สุดคือการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งคือการลดความชื้นในข้าวเปลือกโดยใช้พลังงานความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่สัมผัสกับเมล็ดข้าว อากาศร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะสามารถรับไอน้ำได้มากขึ้น เมื่ออากาศร้อนสัมผัสกับข้าวเปลือกพลังงานความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดข้าว ทำให้อุณหภูมิของเมล็ดเพิ่มขึ้น และเร่งการระเหยของน้ำออกจากผิวและภายในเมล็ด ส่งผลให้ความชื้นในข้าวเปลือกลดลงอย่างต่อเนื่อง กระบวนการนี้จึงขึ้นอยู่กับทั้ง อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์, ความเร็วลม, และระยะเวลาในการอบ [1]–[3]

ชนิดของพลังงานที่ใช้ (เช่น ไฟฟ้า, ไอน้ำ, แก๊สชีวมวล) รวมถึงวิธีการอบแห้ง (เช่น การอบแบบต่อเนื่องหรือแบบเป็นชุด) ล้วนมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการอบแห้ง, ปริมาณพลังงานที่ใช้ และคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบ เช่น สี เปอร์เซ็นต์การแตกหัก ดังรายงานของ Chaiworapuek และคณะ พบว่า การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนที่มีการควบคุมทิศทางการไหลของอากาศสามารถลดความชื้นได้รวดเร็วและใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การจำลอง CFD เพื่อวิเคราะห์การไหลในหออบแนวดิ่งแบบเป็นช่วง [4] ขณะที่งานวิจัยของ Talib และคณะ ได้ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งเชิงอุตสาหกรรม ได้แก่ การอบแบบเตียงเอียง (Inclined Bed Dryer) และฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized Bed Dryer) โดยพบว่าการอบแห้งแบบสองขั้นตอน (FBD ตามด้วย IBD) ให้ผลดีที่สุดทั้งในแง่ความแข็งแรงของเมล็ดและการลดการแตกร้าวของข้าวเปลือก [5]

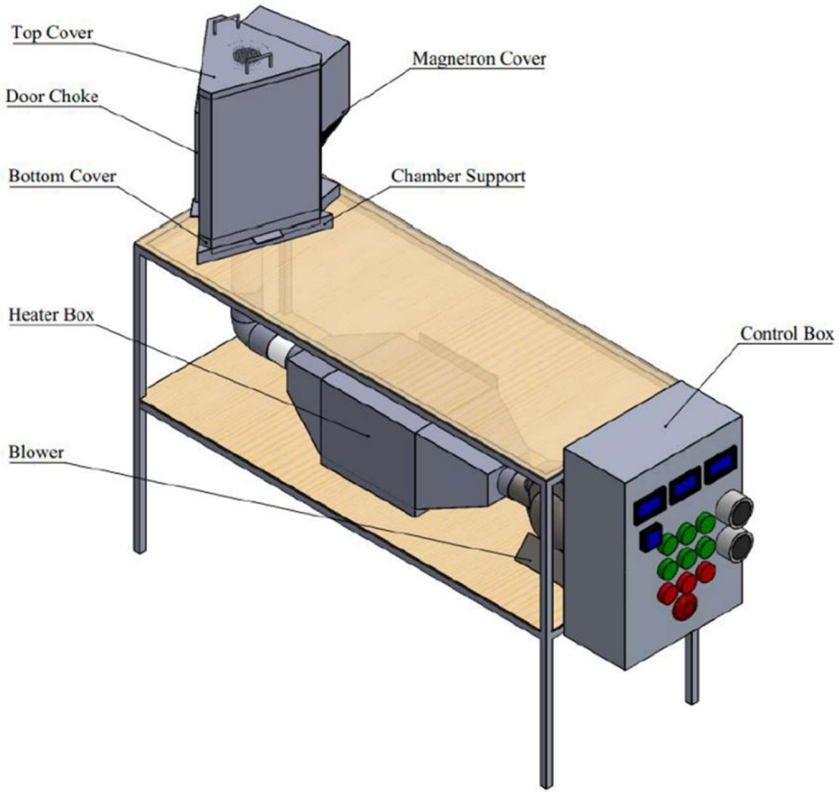
งานวิจัยของ Duygu Evin ได้พัฒนาเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบ Spouted Bed โดยออกแบบฐานเครื่องให้เป็นทรงพาราโบลอยด์ พร้อมติดตั้งท่อลมร้อนแบบมีรูพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของอากาศภายในเตียงอบ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศเข้าเตียงที่ 110°C สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกจาก 35% เหลือต่ำกว่า 15% ภายในเวลาเพียง 30 นาที ซึ่งเร็วกว่าการใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าถึง 50–60% และยังช่วยลดการใช้พลังงานโดยรวมได้อีกด้วย [6]

งานวิจัยและแนวทางปฏิบัติทั่วไปในระดับประเทศระบุว่า อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งข้าวเปลือก ไม่ควรเกิน 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นขีดจำกัดที่ยังสามารถรักษาคุณภาพของเมล็ดข้าวไว้ได้อย่างเหมาะสม โดยหากใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการแตกร้าวภายในเมล็ดและการสูญเสียกลิ่นหอม เช่น สาร 2-acetyl-1-pyrroline ซึ่งเป็นสารสำคัญในข้าวหอมมะลิและข้าวหอมปทุม งานวิจัยโดย สัจจาและคณะยังพบว่า แม้อุณหภูมิ 80 °C จะช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การควบคุมเวลาและการพักเมล็ดระหว่างการอบ (tempering) ก็จำเป็นอย่างยิ่งในการลดผลกระทบต่อคุณภาพโดยรวมของข้าว แม้ว่าในระดับมาตรฐานสากลจะยัง

ไม่มีเอกสารที่ระบุขีดจำกัดอุณหภูมิอย่างเป็นทางการ แต่ในเชิงปฏิบัติ อุณหภูมิ 60–80 °C จึงถือเป็นช่วงที่ปลอดภัยและนิยมใช้มากที่สุด [7], [8]

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการอบแห้งแบบพิเศษ ในบรรดาเทคโนโลยีการอบแห้งแบบพิเศษ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟ (Microwave Drying) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถลดเวลาในการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze Drying) ซึ่งให้คุณภาพสูงแต่ใช้เวลานานและมีต้นทุนสูง หรือการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Drying) ที่แม้จะประหยัดพลังงานและรวดเร็ว แต่ความร้อนยังถ่ายเทจากภายนอกสู่ภายใน ในทางตรงกันข้าม ไมโครเวฟสามารถให้ความร้อนจากภายในออกสู่ภายนอกของผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยเร่งการระเหยของน้ำออกจากวัสดุอย่างสม่ำเสมอและรวดเร็ว โดยเฉพาะในวัสดุที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกหรือผลไม้ การอบแห้งด้วยไมโครเวฟยังช่วยลดการสูญเสียสีกลิ่น และสารอาหารบางชนิดที่ไวต่ออุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม ความท้าทายของเทคโนโลยีนี้คือการควบคุมความร้อนที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจทำให้บางส่วนไหม้หรือเสียคุณภาพได้ง่าย หากไม่มีการควบคุมที่แม่นยำ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวโน้มที่จะใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบลมร้อนหรืออินฟราเรดในลักษณะ hybrid drying เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอและลดความเสี่ยงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การพัฒนาเทคโนโลยีไมโครเวฟในภาคการเกษตรจึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการผลิตอาหารแปรรูปคุณภาพสูงที่มีต้นทุนและเวลาในการผลิตลดลงอย่างชัดเจน [9],[10] รักษาคุณภาพของเมล็ดข้าว [11] งานวิจัยโดย Dalbhagat และคณะ ศึกษาการอบแห้งข้าวเสริมธาตุเหล็ก (Fortified Rice Kernels) ด้วยไมโครเวฟที่พลังงาน 180, 360 และ 540 W พบว่า การใช้พลังงาน 180 W ร่วมกับการพักเมล็ดข้าว (tempering) สามารถลดความชื้นของข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีหรือการแตกร้าวของเมล็ดข้าว ในขณะที่การใช้พลังงานสูงกว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและการแตกร้าวของเมล็ดข้าวมากขึ้น [12]

งานวิจัยนี้ได้จึงได้สร้างชุดทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกอากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟขนาดครัวเรือน 800 W โดยขนาดชุดทดสอบนี้เป็นขนาดทดลอง (laboratory scale) ซึ่งทำงานแบบ Spouted Dry bed สามารถจุดข้าวได้มากสุด 100 g โดยที่พฤติกรรมการลอยของข้าวเปลือกยังเป็นแบบ Spouted Dry Bed โดยชุดทดสอบตามรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยชุดควบคุม (Control Box) ที่มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของอากาศ ควบคุมเครื่องเป่าอากาศ (Blower) ระดับพลังงานไมโครเวฟและตั้งเวลาการทำงานของไมโครเวฟ (Timer) เครื่องทำความร้อน (Heater) 2000 W 220V AC ซึ่ง เครื่องทำความร้อนควบคุมด้วย PID controller Rex c700 ซึ่งวัดอุณหภูมิด้วย Thermocouple Type K วัดที่ท่ออากาศก่อนเข้าห้องอบแห้ง (Chamber) ห้องอบแห้งทำมาจากเหล็กพับ SS-400 โดยท่อด้านในเป็นท่ออะคลิลิคเพื่อให้ไมโครเวฟสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ โดยฝาด้านบน(top cover) ทำช่องระบายอากาศ 2 mm ซึ่งมีที่มาจากความปลอดภัยในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับไมโครเวฟ ในส่วนของหน้าต่างสังเกตุการณ์ถูกติดตั้งอุปกรณ์ประตูกันคลื่น (Door Choke) ที่ถูกถอดออกมาจากตู้ไมโครเวฟขนาดครัวเรือน 800 W โดยอุปกรณ์ปล่อยคลื่นคือหัวแม็กนิตรอนขนาด 800 W ความถี่ 2.45 GHz โดยมีอุปกรณ์ป้องกันไมโครเวฟ (magnetron cover) ครอบวงจรไฟฟ้าของไมโครเวฟเพราะฉะนั้นการทดสอบในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการการศึกษาผลของการใช้อากาศอุณหภูมิ 80°C อากาศอุณหภูมิ 80°C ร่วมกับไมโครเวฟ 160W อากาศอุณหภูมิห้องร่วมกับไมโครเวฟ 160W อากาศอุณหภูมิห้องร่วมกับไมโครเวฟ 320W




รูปที่ 1 ชุดทดสอบการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟ

โดยการวิเคราะห์ผลจากอบแห้งมีได้แก่ ความชื้นสมดุลข้าวเปลือก อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือก อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นและค่าความขาวข้าวสารโดยทั้งหมดมีชุดควบคุมการทดสอบเป็นตัวเปรียบเทียบ

## 2. ระเบียบวิจัยและการทดลอง

โดยเริ่มแรกของกระบวนการทดสอบจะต้องมีการเตรียมตัวอย่างการทดสอบโดยการหาความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกโดยข้าวเปลือกที่นำมาทดสอบเป็นข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 จากจังหวัดบุรีรัมย์ โดยรายละเอียดของการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 1 โดย MW1 หมายถึงไมโครเวฟพลังงาน 160W และ MW2 หมายถึงไมโครเวฟพลังงาน 320W

*2.1 การหามวลแห้งข้าวเปลือก*

โดยกระบวนการหามวลแห้งของข้าวเปลือกต้องเริ่มต้นด้วยชั่งน้ำหนักของข้าวเปลือกซึ่งเป็นน้ำหนักของข้าวเปลือกที่มีความชื้นอยู่ให้บันทึกเป็นน้ำหนักเริ่มต้น ($W$) จากนั้นอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนด้วยกระบวนการ AOAC 925.10 ด้วยอุณหภูมิ 105 ºC เป็นระยะเวลา 24 hr ซึ่งจะทำให้ได้ข้าวเปลือกที่ถูกกำจัดความชื้นจนหมดและนำมาชั่งน้ำหนักจะได้เป็นมวลแห้งออกมา ($d$) และสามารถนำมาหา

ความชื้นเริ่มต้นตามมารตรฐานเปียก ( $M_w$ ) ตามสมการที่ 1 [14]

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบการอบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ

| เงื่อนไขการทดสอบ | อุณหภูมิของอากาศ | ระดับพลังงานของไมโครเวฟ | ปริมาณข้าวที่ใช้ทดสอบ |
|---|---|---|---|
| อากาศอุณหภูมิ 80 ℃ | 80 ℃ | 0 W | 100 g |
| อากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 | 80 ℃ | 160 W | |
| อากาศอุหภูมิห้อง MW1 | 32.5℃ | 160 W | |
| อากาศอุหภูมิห้อง MW2 | 32.5℃ | 320 W | |

$$M_w = \frac{(W-d)}{W} \quad (1)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$M_w$ = ความชื้นข้าวเปลือกตามมาตรฐานเปียก (Wet Basis) (%wb)

$W$ = มวลเริ่มต้นของข้าวเปลือก (g)

$d$ = มวลแห้งข้าวเปลือก (g)

2.2 การกำหนดความชื้น

หลังจากที่ทราบปริมาณความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกจะสามารถกำหนดความชื้นของข้าวเปลือกได้โดย ปกติแล้วความชื้นในข้าวเปลือกหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีความชื้นอยู่ที่ 22 %wb เพราะฉะนั้นความชื้นเป้าหมาย( $M_1$ ) คือ 22 %wb จากนั้นทำการคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในข้าวเปลือก ( $W_2$ ) เพื่อทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นเป้าหมายตามที่กำหนดซึ่งปริมาณน้ำที่ต้องเติมเพื่อให้ถึงความชื้นเป้าหมาย( $M_1$ )นั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 [13]

$$W_2 = W_1 \times \left[\frac{M_1 - M_2}{100 - M_1}\right] W_2 \quad (2)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$W_2$ = ปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไป (g)

$W_1$ = มวลเดิมของข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้น (g)

$M_1$ = ความชื้นเป้าหมายเปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (wb%)

$M_2$ = ความชื้นเริ่มต้นเปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก (wb%)

เมื่อทราบปริมาณน้ำที่ต้องเติมเข้าไปในข้าวเปลือกเพื่อกำหนดความชื้นเป้าหมาย ขั้นตอนถัดไปที่สำคัญคือการเติมน้ำเข้าไปในข้าวเปลือก ซึ่งหลังจากเติมเข้าไปแล้วจะต้องบรรจุใส่ถุงที่สามารถปิดอากาศเข้าออกได้ และเก็บในที่มีอุณหภูมิ 1- 5 ℃ เป็นระยะเวลา 7 วัน [14]

*2.3 การหาความชื้นสมดุลข้าวเปลือก*

ในกระบวนการอบแห้งสิ่งต้องหาก่อนเป็นอันดับแรกคือความชื้นสมดุลข้าวเปลือกซึ่งแต่ละวิธีการอบแห้งนั้นมีค่าสมดุลความชื้นที่ไม่เท่ากัน โดยวิธีการหาความชื้นสมดุลข้าวเปลือกนั้นคือการอบแห้งจนมวลของข้าวเปลือกนั้นเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลง [15]

โดยความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกในงานวิจัยนี้มีทั้งหมดสองค่าซึ่งค่าแรกเป็นของการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อน 80 ℃ และค่าที่สองเป็นของการอบแห้งด้วยอากาศปกติร่วมกับการใช้ไมโครเวฟระดับที่หนึ่ง โดยวิธีการสร้างกราฟความชื้นสมดุลนั้นสามารถทำได้โดยนำข้าวเปลือกที่อบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ ออกมาชั่งน้ำหนักทุก

5 นาทีจนกว่าค่ามวลข้าวเปลือกเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยการทดสอบหาความสมดุลของข้าวเปลือกแต่ละวิธีการอบแห้งนั้นทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง

*2.4 อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือก*

การเปรียบเทียบมวลข้าวเปลือกก่อนอบแห้งและหลังอบแห้งนั้นคือการประเมินว่าความชื้นของข้าวเปลือก ณ ขณะนั้นเริ่มเข้าใกล้ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือกมากแค่ไหนซึ่งสามารถประเมินได้ด้วยการหาอัตราส่วนความชื้น [16] ตามสมการที่ 3

$$MR = \frac{M_n - M_{n+1}}{M_i - M_{eq}} \quad (3)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$MR$ = อัตราส่วนความชื้น

$M_n$ = ความชื้นของข้าวเปลือก (%wb)

$M_i$ = ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (%wb)

$M_{eq}$ = ความชื้นสมดุลข้าวเปลือกของวิธีการอบแห้งนั้น ๆ (%wb)

$n$ = ครั้งที่

อัตราส่วนความชื้นของข้าวเปลือกเป็นตัวบ่งชี้ที่ทำให้ผู้ทดสอบรู้ว่าความชื้นขณะนั้นของข้าวเปลือกใกล้ความชื้นเป้าหมายมากเท่าไร

*2.5 อัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก*

วิธีการอบแห้งต่าง ๆ สามารถหาค่าอัตราการอบแห้ง ($DR$) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่ประเมินประสิทธิภาพการอบแห้งซึ่งสามารถหาได้จากปริมาณน้ำที่ระเหยเทียบกับเวลาที่ใช้ในการระเหยน้ำปริมาณนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 4 [16]

$$DR = \frac{m_n - m_{n+1}}{t_{n+1} - t_n} \quad (4)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยข้องมีดังนี้

$DR$ = อัตราการอบแห้ง ($kg_{H2O}$/min)

$m$ = มวลของข้าวเปลือก (kg)

$t$ = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (s)

$n$ = ครั้งที่

โดยวิธีการคือการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกก่อนและหลังอบแห้งทุก 5 นาที โดยมวลที่หายไปนั้นคือปริมาณน้ำที่หายไป

*2.6 อุณหภูมิของข้าวเปลือก*

อุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเป็นตัวชี้พฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกอย่างชัดเจนซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการรับพลังงานจากวิธีการอบแห้งนั้น ๆ โดยการเก็บผลอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกจะใช้ Thermocouple Type K ในการเก็บค่าซึ่งทำพร้อมกันในกับการทดลองชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าอัตราการอบแห้งของข้าวเปลือก

*2.7 ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ*

ปริมาณพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุนั้นสามารถหาได้ด้วยการหาค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (specific energy consumption, SEC) ที่ได้จากการคำนวณพลังงานรวมอันได้แก่ พลังงานที่ใช้ในไมโครเวฟ เครื่องกำเนิดความร้อนและเครื่องเป่าอากาศ ต่อด้วยปริมาณน้ำที่ระเหยไปจากตัววัสดุ ดังแสดงในสมการที่ 5 [17]

$$SEC = \frac{E_{n+1} - E_n}{m_n - m_{n+1}} \quad (5)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

$SEC$ =ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ($MJ/kg_{H_20}$)

$E$ = พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำ (MJ)

$m$ = มวลของข้าวเปลือก (g)

$n$ = ครั้งที่

*2.8 เปอร์เซ็นต์ข้าวต้น*

เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นคือข้าวที่มีสภาพสมบูรณ์ 70% ขึ้นไปหลังจากทำการขัดขาวและผ่านกระบวนการแยกเมล็ดข้าวหักแล้วซึ่งสามารถคำนวณปริมาณข้าวต้นได้จากสมการที่ 6 [18]

$$\%HRY = \frac{\text{Full Grain}}{\text{Paddy Mass}} \times 100\% \quad (6)$$

โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ มีดังนี้

$\%HRY$ = Head Rice Yield

Full Grain = ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด (g)

Paddy Mass = ปริมาณข้าวเปลือก (g)

โดยเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งตัวชี้วัดว่าวิธีการอบแห้งนั่นมีคุณภาพเพียงพอหรือไม่

2.9 ค่าความขาวของข้าวสาร

ค่าความขาวของข้าวสารเป็นตัวชี้คุณภาพในกระบวนการอบแห้งวิธีนั้นๆ ว่าสามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้หรือไม่ ซึ่งหากกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยวิธีนั้น ๆ ทำให้ข้าวสารมีสีน้ำตาลหรือรอยไหม้นั้นอาจจะเป็นกระบวนการอบแห้งที่ไม่เหมาะสม โดยเครื่องวัดความขาวของข้าวสารใช้เครื่องKETT C-600 Rice Whiteness Meter [19]

## 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

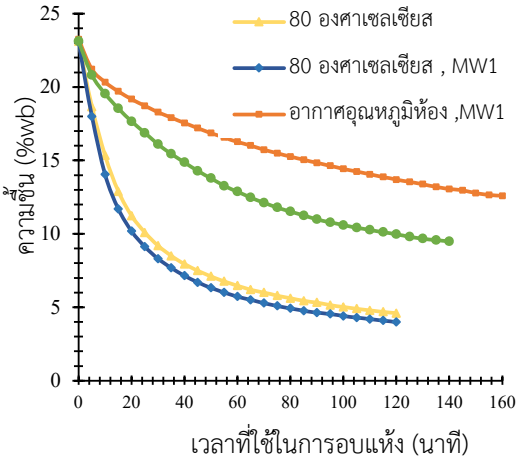
จากรูปที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของข้าวเปลือกกับระยะเวลาในการอบแห้ง พบว่า ค่าความชื้นสมดุลต่ำที่สุด อยู่ที่ 4.5%wb ได้จากกระบวนอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่สูงในการลดความชื้น ในทางกลับกัน กระบวนการที่ให้ค่าความชื้นสมดุลสูงที่สุดคือ การใช้อากาศอุหภูมิห้อง MW1 ซึ่งให้ค่าความชื้นสมดุลเท่ากับ 12.5%wb ขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียว และอากาศอุหภูมิห้อง MW2 ให้ค่าความชื้นสมดุลที่ 4.8%wb และ 9.8%wb ตามลำดับ

จากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้ง โดยพิจารณาที่ความชื้นสุดท้าย 14%wb พบว่า วิธีการอบแห้งที่ใช้ อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 ใช้เวลาเพียง 10 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.40 ในการลดความชื้นลงจนถึงค่าดังกล่าว ขณะที่การใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียวต้องใช้เวลานานขึ้นคือ 15 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.48 สำหรับอากาศอุหภูมิห้อง MW2 ใช้เวลา 45 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.32 ส่วนกระบวนการที่ใช้เวลานานที่สุดคือ อากาศอุหภูมิห้อง MW1 ซึ่งต้องใช้เวลาถึง 110 นาที ที่อัตราส่วนความชื้น 0.125 อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการอบแห้งข้าวเปลือก โดยสามารถลดความชื้นได้รวดเร็วและให้ค่าความชื้นสมดุลต่ำซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jafari และคณะ [11] ที่พบว่าการใช้ไมโครเวฟระดับต่ำร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ทำลายโครงสร้างของเมล็ดข้าว และยังให้พลังงานการดูดซับสูง อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานของ Abas และคณะ [10] ที่แสดงให้เห็นว่า hot air ร่วม microwave ช่วยย่นระยะเวลาในการอบแห้งได้มากกว่าการใช้ไมโครเวฟหรืออากาศร้อนเพียงอย่างเดียวถึง 40–60%

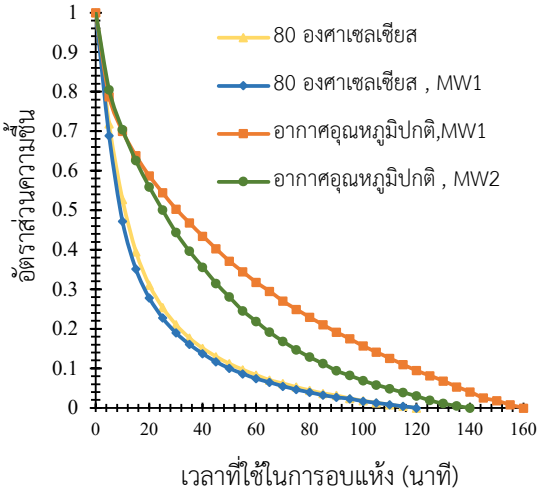
นอกจากนี้ภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะมีอัตราการลดลงความชื้นที่รวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้งแต่เวลาเริ่มผ่านไปอัตราการลดลงความชื้น เริ่มชะลอตัวลงจนกระทั่งเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งขยายความได้ดังรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์อัตราอบแห้งกับความชื้นของข้าวเปลือก พบว่า การอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1 มีอัตราการอบแห้งสูงสุดที่ 1.25 กรัมน้ำต่อนาที การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 1.11 กรัมน้ำต่อนาที การอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW2 มีค่าเท่ากับ 0.575 กรัมน้ำต่อนาที และการอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW1 มีค่าเท่ากับ 0.525กรัมน้ำต่อนาที เมื่อผ่านจุดสูงสุดอัตราการอบแห้งเริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของความความชื้นในรูปที่ 2 และ 3.2

การลดลงความชื้นของข้าวเปลือกยังสามารถถูกเสริมการอธิบายด้วยรูปที่ 5 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกกับความชื้นในข้าวเปลือกพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 78℃ รองลงมาคือการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 ℃ มีอุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกเท่ากับ 74℃ การอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW2 มีอุณหภูมิผิวเท่ากับ 51℃ และการอบแห้งด้วย และอากาศอุหภูมิห้อง MW1 มีอุณหภูมิผิวเท่ากับ 41℃ ซึ่งอุณหภูมิผิวของแต่ละวิธีการทดสอบสอดคล้องกับอัตราการอบแห้งกล่าวคือเงื่อนไขของการอบแห้งใดมีอุณหภูมิผิวที่สูงจะส่งผลทำให้เกิดการระเหยที่ผิวอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการระเหยที่ผิวอย่างรวดเร็วนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะกรณีอุณหภูมิสูงเท่านั้นแต่ยังสามารถเกิดขึ้นในอุณหภูมิต่ำโดยมีสภาพแวดล้อมในสภาวะสุญญากาศซึ่งจะทำให้จุดเดือดของน้ำในวัสดุมีค่าต่ำกว่าจุดเดือด ความดันบรรยากาศ

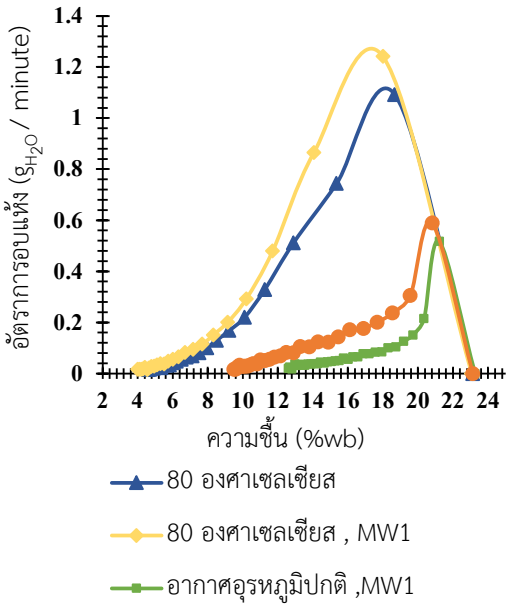
จากรูปที่ 6 และ 7 ค่า SEC ในช่วงต้นของการอบแห้งยังมีค่าต่ำเมื่อการอบแห้งดำเนินต่อไปจนผ่านจุดความชื้นวิกฤตค่า SEC เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทวีคูณทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากปริมาณการระเหยน้ำรวมกับสมการที่ 5 พบว่าในต้นของการอบแห้งการระเหยน้ำยังมีปริมาณสูงในขณะที่อัตราการป้อนพลังงานคงที่จึงทำให้ค่า SEC ยังมีปริมาณต่ำจนเมื่อผ่านจุดความชื้นวิกฤตปริมาณน้ำที่ระเหยเริ่มลดลงในขณะที่การป้อนพลังงานเท่าเดิมจึงทำให้ค่า SEC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเส้นการระเหยน้ำของวิธีการอบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 เทียบกับวิธีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอย่างเดียวเส้นเมื่อผ่านจุดความชื้นวิกฤตปริมาณระเหยน้ำมีความใกล้เคียงกันในขณะที่เส้นปริมาณการระเหยน้ำของการอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW2 และอากาศอุหภูมิห้อง MW1 มีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด



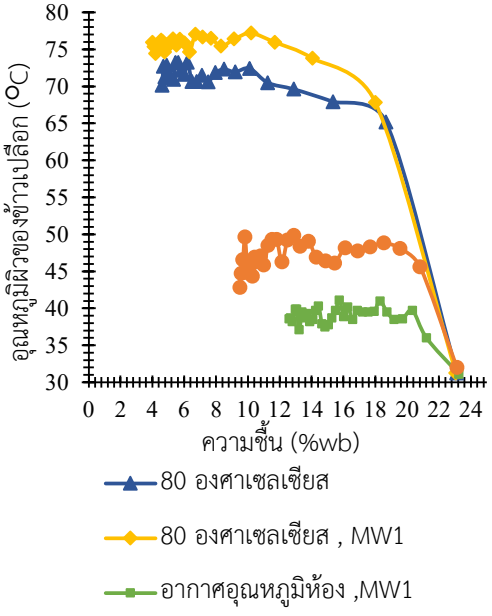

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ความชื้นของข้าวเปลือกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง



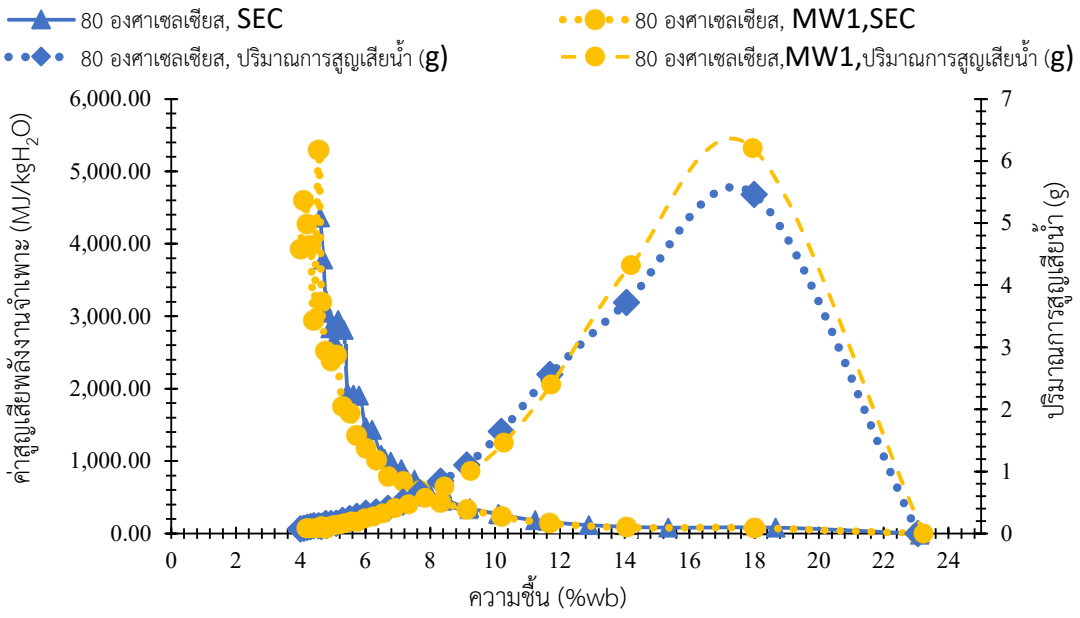

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์อัตราส่วนความชื้นของ ข้าวเปลือกเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง



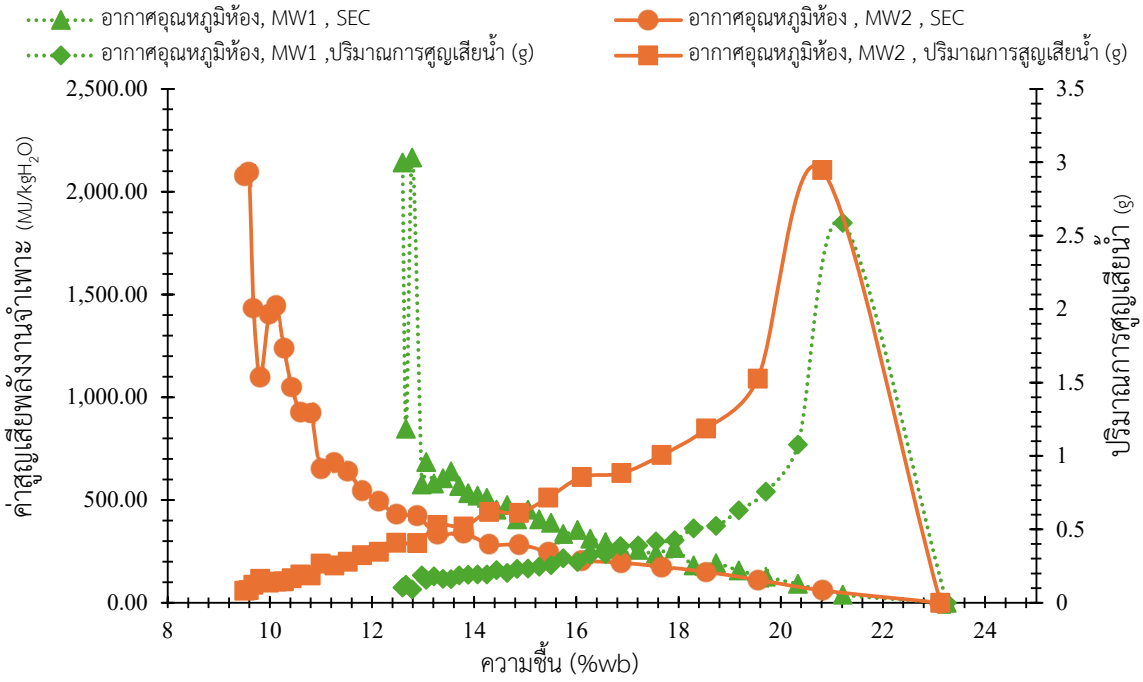

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์อัตราการอบแห้งขอ ข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือก




รูปที่ 5 ความสัมพันธ์อุณหภูมิผิวของข้าวเปลือกกับการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าว




รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณสูญเสียน้ำเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

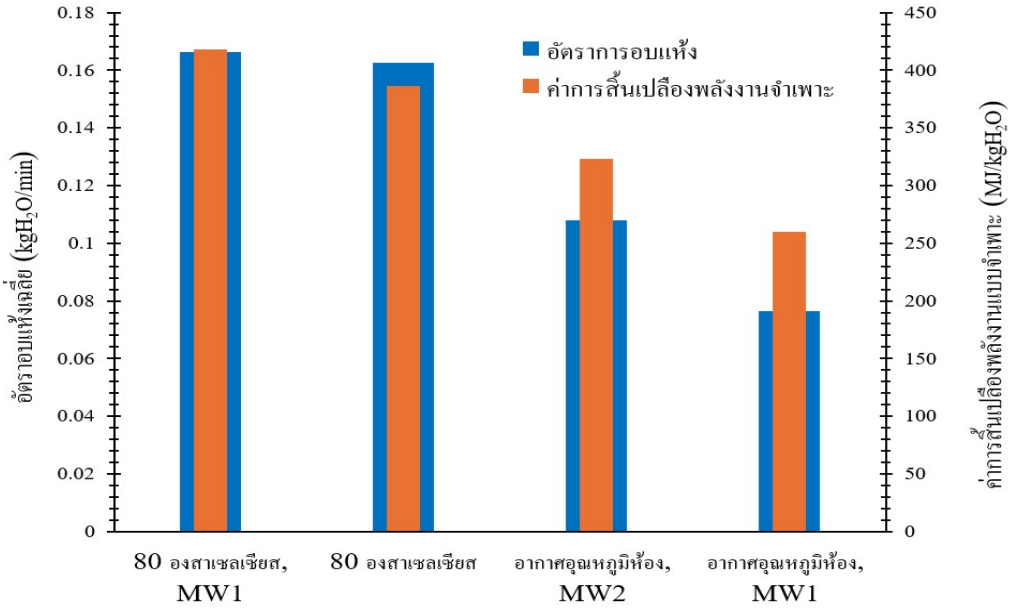



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและปริมาณสูญเสียน้ำเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวเปลือก

ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งตามทฤษฎี ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระยะหลัก ได้แก่ ระยะอัตราคงที่ (และระยะอัตราลดลง ดังที่กล่าวในงานของ Mujumdar และคณะ [16] ว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง ปริมาณน้ำส่วนใหญ่ระเหยจากผิววัสดุที่เปียก ทำให้อัตราการอบแห้งสูงและคงที่ แต่เมื่อเข้าสู่ระยะหลัง น้ำต้องแพร่จากภายในออกมาสู่ผิวก่อนจะระเหย ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง ขณะเดียวกัน ข้อมูลเรื่องอุณหภูมิผิวที่สัมพันธ์กับอัตราการระเหยก็ได้รับการสนับสนุนโดยผลการทดลองของ Jafari และคณะ [11] ซึ่งระบุว่าความร้อนจากไมโครเวฟสามารถทำให้เกิดอุณหภูมิผิวสูง ส่งผลให้มีการระเหยน้ำรวดเร็ว แต่หากไม่มีการควบคุมอาจทำให้เกิดการไหม้ที่ผิวได้ในวัสดุไวความร้อน จากรูปที่ 8 แสดงค่า SEC และอัตราการอบแห้งแบบเฉลี่ย พบว่า การอบแห้งโดยใช้อากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 มีค่า SEC และอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้อากาศอุณหภูมิ 80 ℃ เพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้อากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้น้อย ซึ่งการระเหยน้ำส่วนใหญ่เกิดเพราะได้รับพลังงานจากอากาศร้อนมากกว่าไมโครเวฟระดับหนึ่ง เมื่อเปรียบกับการใช้อากาศอุหภูมิห้อง MW2 และอากาศอุหภูมิห้อง MW1 ค่า SEC และอัตราการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าสองวิธีข้างต้นแนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yongsawatdigul และ Gunasekaran ที่ระบุว่า ไมโครเวฟระดับต่ำร่วมกับอากาศร้อนในระดับหนึ่งจะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเพียงเล็กน้อย หากพลังงานจากไมโครเวฟไม่เพียงพอ ความร้อนส่วนใหญ่ยังมาจากแหล่งลมร้อน ซึ่งทำให้การกระจายพลังงานไม่สมดุล [20]

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่า วิธีการอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW1 อย่างเดียว ให้ผลผลิตเป็นเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุด คือ 38% ในทางตรงกันข้าม วิธีที่ให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำที่สุดคือ การอบแห้งอากาศอุณหภูมิ 80 ℃ MW1 ซึ่งให้ค่าเพียง 2% เท่านั้น โดยสามารถจัดเรียงลำดับของ

เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นจากน้อยไปหามากได้อย่างชัดเจนจากกราฟในรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 8 ซึ่งแสดงค่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) จะพบว่าแนวโน้มของทั้งสองกราฟแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะสวนทางกัน กล่าวคือ วิธีการอบแห้งที่ให้ค่าพลังงานจำเพาะสูงที่สุด (อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1) กลับให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นต่ำที่สุด ในขณะที่การอบแห้งด้วยอากาศอุหภูมิห้อง MW1 ซึ่งใช้พลังงานจำเพาะน้อยที่สุด กลับให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสูงที่สุดใกล้เคียงกับชุดควบคุม

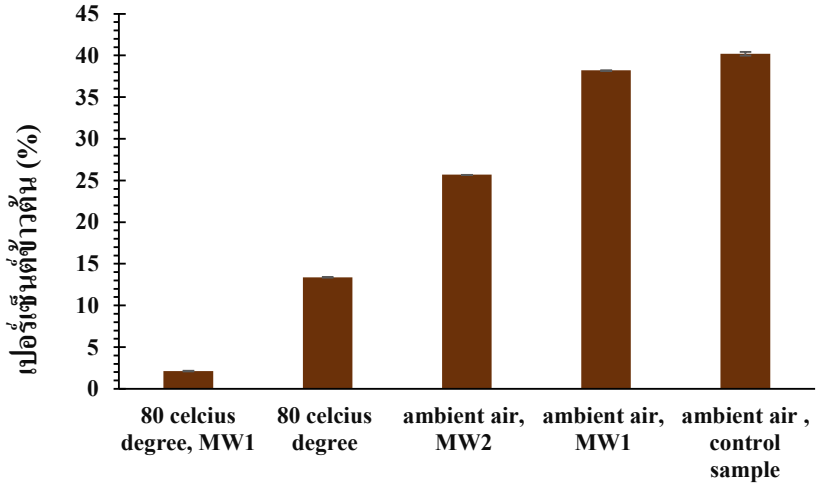



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเฉลี่ยและค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย

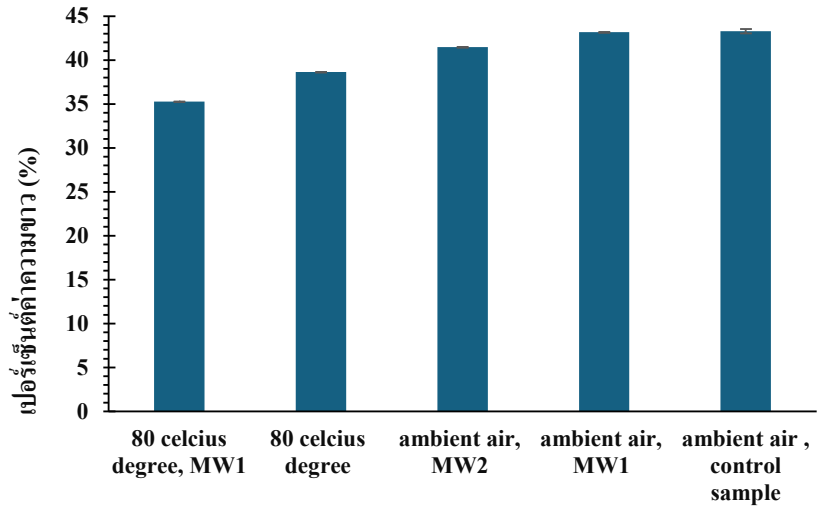
จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อค่าการใช้พลังงานจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น มีแนวโน้มที่จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความรุนแรงของกระบวนการอบแห้งที่ส่งผลต่อโครงสร้างของเมล็ดข้าว การศึกษานี้มีความสอดคล้องกับงานของ Khampan และคณะ ที่แสดงให้เห็นว่า การใช้พลังงานไมโครเวฟที่สูงในกระบวนการอบแห้งสามารถทำให้เกิดแรงตึงภายในเมล็ดข้าวจากอัตราการระเหยที่เร็วเกินไป ส่งผลให้เมล็ดแตกหรือเกิดรอยร้าว ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ [21]

นอกจากนี้ หากพิจารณาร่วมกับรูปที่ 10 ซึ่งแสดงค่าความขาวของข้าวสาร พบแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ อากาศอุณหภูมิ 80 °C MW1ให้ค่าความขาวของข้าวสารต่ำที่สุด ในขณะที่การใช้อากาศอุหภูมิห้อง MW1 ให้ค่าความขาวสูงที่สุดซึ่งใกล้เคียงกับชุดควบคุมเช่นเดียวกัน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นสามารถสะท้อนถึงระดับความเสียหายของเมล็ดข้าวสาร ที่อาจเกิดจากแรงตึงในกระบวนการอบแห้ง โดยเฉพาะเมื่อใช้พลังงานสูงหรือความร้อนสูงเกินไป ซึ่งจะต้องมีการควบคุมอย่างแม่นยำเพื่อรักษาคุณภาพของผลผลิต




รูปที่ 9 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของแต่ละวิธีการอบแห้ง




รูปที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวสารแต่ละวิธีการอบแห้ง

**4. สรุปผลการทดลอง**

การศึกษาพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศเสริมการทำงานด้วยไมโครเวฟซึ่งการอบแห้งมี 4 เงื่อนไข ได้แก่ การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่ง การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับสอง การใช้ไมโครเวฟระดับหนึ่งร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อม และการใช้ไมโครเวฟระดับสองร่วมกับอากาศสภาพแวดล้อมพบว่า การใช้อากาศร้อนร่วมกับไมโครเวฟระดับหนึ่งมีอัตราการอบแห้งมากที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากเช่นกัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยไมโครเวฟระดับหนึ่งมีค่าอัตราการอบแห้งน้อยที่สุดแต่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด

## 5. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Namsaeng, T. Pumsaad and K. Tangtragul, “Effect of drying temperature on the quality of paddy rice using a hot-air dryer,” *J. Agric. Res.*, vol. 55, no. 3, pp. 87–95, 2022.

[2] P. Jirajindalert, “Comparison between sun drying and mechanical drying for paddy rice,” *Thai J. Agric. Sci.*, vol. 48, no. 2, pp. 102–110, 2020.

[3] S. Vetchama and J. Sirisomboon, “Development of a low-cost batch-type paddy dryer,” *Int. J. Food Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 241–247, 2021.

[4] W. Chaiworapuek et al., “Numerical investigation of air flow in a vertically paddy bed dryer using computational fluid dynamics,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1137, Art. no. 012066, 2021.

[5] M. Talib, N. Yusof and A. S. Zainudin, “Performance of fluidized bed and inclined bed drying of paddy in two-stage operation,” *J. Food Eng.*, vol. 190, pp. 90–96, 2016.

[6] D. Evin, “Paraboloid-based spouted bed drying of paddy: Aerodynamics, temperature distribution, and moisture degradation,” *AgriEngineering*, vol. 1, no. 2, pp. 257–264, 2019.

[7] W. Wongpornchai, S. Dumri, N. Jongkaewwattana and S. Siriamornpun, “Effect of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of Thai aromatic rice,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 46, pp. 443–447, 2009.

[8] H. C. Siebenmorgen, “Quality of rice dried with high-temperature methods,” *Cereal Chem.*, vol. 44, no. 6, pp. 592–600, 1967.

[9] B. Liu, L. Zhang, M. Zhang and S. Mujumdar, “Microwave-assisted drying of food and agricultural materials: Basics, advances, and applications,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 142, pp. 260–272, 2024.

[10] S. Z. Abas, M. N. Islam and S. S. Hossain, “Microwave drying of agricultural products: An overview,” *Agriculture*, vol. 11, no. 1, p. 8, 2021.

[11] M. Jafari, M. Kianmehr and M. Khazaei, “Experimental evaluation and modeling of paddy drying using a microwave-assisted conveyor dryer,” *Energy*, vol. 142, pp. 647–654, 2018.

[12] R. M. Dalbhagat et al., “Effect of microwave drying and tempering conditions on physical quality attributes of fortified rice kernels,” *J. Food Process. Preserv.*, vol. 48, no. 2, 2024.

[13] AOAC International, Official Methods of Analysis, 18th ed., Method 925.10: Solids (Total) and Moisture in Flour. Gaithersburg, MD: AOAC Int., 2025.

[14] B. B. Nkoi and R. J. Fuller, “Moisture equilibration of paddy rice: Influence of temperature and storage time on moisture distribution,” *Drying Technol.*, vol. 25, no. 12, pp. 2053–2059, 2007.

[15] M. K. S. Nair and B. C. Mehta, “Equilibrium moisture content of paddy at different temperatures and relative humidities,” *J. Food Sci. Technol.*, vol. 26, no. 2, pp. 107–110, 1989.

[16] A. S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed., Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.

[17] M. Goyal, A. Kingsly and D. Manikantan, “Comparative study on drying kinetics and eznergy consumption in forced convection drying of paddy,” *J. Food Process Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 183–200, 2008.

[18] J. Cnossen and T. J. Siebenmorgen, “The effects of tempering and cooling conditions on rice fissuring and head rice yield,” *Trans. ASAE*, vol. 43, no. 3, pp. 879–886, 2000.

[19] Kett Electric Laboratory Co., Ltd., Operating Manual: C-600 Rice Whiteness Tester, Tokyo, Japan.

[20] J. Yongsawatdigul and S. Gunasekaran, “Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation,” *J. Food Process. Preserv.*, vol. 20, no. 2, pp. 145–156, 1996.

[21] C. Khampan, T. Sriburi and S. Lekawatana, “Effect of drying methods on physicochemical properties of rice,” *Agric. Sci. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 15–22, 2021.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(1), 31-45 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเลียนแบบรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกริน เพื่อลดแรงต้านอากาศ

# Solar Electric Vehicle Body Design Inspired by the Peregrine Falcon for Aerodynamic Drag Reduction

จิรวัตน์ กรุณา* ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน
วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600
Jirawat Garluna[1]* Thamarat Yabsungnoen[2]
Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600
*Corresponding author Email: jirawatg@siamtechno.ac.th
(Received: May 15, 2025; Revised: April July 1, 2025 ; Accepted: July 30, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แนวคิดการเลียนแบบชีวภาพจากรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกริน ซึ่งมีลักษณะลู่ลมและสามารถบินด้วยความเร็วสูง โดยมีการสร้างแบบจำลอง 3 รูปแบบ และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยเทคนิคการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ภายใต้ความเร็วลม 80 และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่ 3 ซึ่งได้รับการปรับให้มีรูปทรงลู่ลมและสอดคล้องกับการใช้งานจริงมากที่สุด สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศจาก 0.164 เหลือ 0.139 อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงยกอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.0276 เป็น 0.095 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถลดการแยกตัวของอากาศ และลดการเกิดอากาศวนที่บริเวณท้ายรถส่งผลให้รถต้นแบบมีประสิทธิภาพการไหลของอากาศที่ดีขึ้น นอกจากนี้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ยังช่วยลดเวลา และต้นทุนในการพัฒนารถต้นแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแนวทางในการออกแบบที่เลียนแบบธรรมชาตินี้มีศักยภาพในการพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีแรงต้านอากาศต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบยานยนต์พลังงานสะอาดในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิผล

**คำสำคัญ:** การออกแบบตัวถังรถยนต์ รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานงานแสงอาทิตย์ การลดแรงต้านอากาศ

**ABSTRACT**

This research presents the design of a solar-powered electric vehicle body using a biomimetic approach inspired by the shape of the Peregrine Falcon, a bird known for its streamlined form and high-speed flight. Three vehicle models were developed and analyzed using Computational Fluid Dynamics (CFD) at wind speeds of 80 and 120 kilometers per hour. The study found that Model 3, which was refined to be more streamlined and practically applicable, achieved a reduction in the aerodynamic drag coefficient from 0.164 to 0.139. However, the lift coefficient increased from 0.0276 to 0.095. The improved model effectively reduced airflow separation and vortex formation at the rear of the vehicle,

resulting in better aerodynamic flow performance. Furthermore, the use of CFD simulations significantly reduced both the time and cost required for prototype development. The findings demonstrate that this nature-inspired design approach has strong potential for the development of low-drag solar electric vehicles and can be effectively applied to future clean energy vehicle design.

**Keyword:** Car body design, Solar-powered Electric Vehicle, aerodynamic drag reduction.

## 1. บทนำ

ภาวะโลกร้อน และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้องได้รับการแก้ไข โดยเฉพาะการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในภาคขนส่งมีส่วนในการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกประมาณ 20-25% [1] ด้วยเหตุดังกล่าวจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเปลี่ยนผ่านไปสู่เทคโนโลยีที่ยั่งยืนมากขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจาก เป็นพลังงานสะอาด ทดแทนได้ และมีอยู่อย่างไม่จำกัด [2] เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในด้านประสิทธิภาพและต้นทุน โดยเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงถึง 20-23% เนื่องจากสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ทั้งขณะขับขี่ หรือจอดอยู่กลางแจ้ง [3] นอกจากนี้การนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งเข้ากับตัวถังรถยนต์ จะช่วยเพิ่มระยะทางในการขับขี่และลดต้นทุนพลังงาน [4]

หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ คือ การลดแรงต้านอากาศ ซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศกระทบกับตัวถังของรถขณะที่รถเคลื่อนที่ ความต้านทานนี้ไม่เพียงแต่ทำให้รถต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการเคลื่อนที่ แต่ยังมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ [5] ดังนั้นการออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีแรงต้านอากาศต่ำจึงมีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยเฉพาะในรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาหรือผิวของตัวรถเพื่อเก็บพลังงานจากแสงแดด การลดแรงต้านอากาศเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากแรงต้านอากาศที่สูงจะส่งผลให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการขับขี่และทำให้พลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานระยะยาว [6] ดังนั้นการออกแบบรูปทรงของตัวถังรถยนต์ที่สามารถลดแรงต้านอากาศได้ จะช่วยให้รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้พลังงานจากแสงแดด นอกจากนี้แรงต้านอากาศยังมีผลต่อการใช้พลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าคิดเป็น 48% ของแรงต้านการขับขี่ทั้งหมดเมื่อใช้ความเร็วบนทางหลวง [7] สำหรับรถโดยสารทั่วไปจะเกิดแรงต้านอากาศในส่วนบนของตัวถัง 50% ส่วนด้านหน้ารถ ส่วนท้ายรถ ล้อ และซุ้มล้อ 25% และส่วนด้านล่างตัวถังรถ 25% [8]

นอกจากนี้การลดแรงต้านอากาศเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของยานยนต์ไฟฟ้า โดยแรงต้านอากาศจะแปรผันตามรูปร่างของวัตถุ ความเร็ว และความหนาแน่นของอากาศ ดังนั้นการออกแบบตัวถังรถยนต์ตามหลักอากาศพลศาสตร์ให้มีรูปทรงที่ลู่ลม จะช่วยลดแรงต้านอากาศ ซึ่งจะส่งผลให้ประหยัดพลังงาน และเพิ่มระยะทางในการขับขี่ [9] การเลียนแบบชีวภาพเป็นแนวทางการออกแบบที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน [10] โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการศึกษารูปร่าง และการเคลื่อนไหวของสัตว์ต่าง ๆ เช่น นกเหยี่ยวเพเรกริน ซึ่งเป็นนกล่าเหยื่อที่สามารถบินดิ่งด้วยความเร็วสูงถึง 320 กม./ชม. โดยยังคงมีความมั่นคงทางการทรงตัวและมีแรงต้านต่ำมาก [11] จากการศึกษาพบว่านกเหยี่ยวเพเรกรินมีลักษณะลำตัวที่เรียวยาว หัวมีความลาดเอียง และปีกกางเฉียงเพื่อควบคุมการไหลของอากาศให้แนบไปกับลำตัว ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรง

ต้านของนกมีค่าต่ำกว่า 0.18 ในขณะที่รถยนต์ทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.26 ถึง 0.35 [12]

นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ 10% สามารถเพิ่มระยะทางได้ 5% [13] การใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบ และปรับปรุงประสิทธิภาพอากาศพลศาสตร์ของยานยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ CFD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการไหลของอากาศรอบตัวถังรถยนต์ และสามารถช่วยนักออกแบบในการทดสอบรูปร่างของตัวถังรถยนต์ในสภาวะต่าง ๆ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างต้นแบบจริง ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน และเวลาในการพัฒนา [14] การจำลองการไหลของอากาศยังสามารถใช้เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงต้านอากาศ และแรงยก ในการออกแบบรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบรถยนต์มีประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้นำเสนอการนำลักษณะรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกรินขณะบินมาออกแบบตัวถังรถยนต์ และศึกษาค่าอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงตัวถังรถยนต์โดยใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้จำลองระบบการไหลของอากาศสำหรับออกแบบตัวถังรถยนต์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศโดยใช้ทฤษฎีดังต่อไปนี้

*2.1 สมการ Reynold Number*

สมการ Reynold Number [15] แสดงดังสมการที่ 1

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1)$$

เมื่อ

$Re$ = เลข Reynold Number

$\rho$ = ความหนาแน่นของอากาศ

$u$ = ความเร็วของอากาศ

$L$ = ความยาวของรถยนต์

$\mu$ = ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ

*2.2 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)*

สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) [16] แสดงดังสมการที่ 2

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

เมื่อ

$\rho$ = ความหนาแน่นของอากาศ

$u$ = ความเร็วของอากาศ

$\nabla \cdot (\rho u)$= การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $u$ ในแต่ละตำแหน่ง

*2.3 สมการ Navier-Stokes*

สมการ Navier-Stokes [17] ดังแสดงในสมการที่ 3 ใช้สำหรับการคำนวณการไหลของอากาศ และให้ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการกระจายของความดัน และการเคลื่อนที่ของอากาศในระหว่างการจำลอง CFD

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + v\nabla^2 u + f \quad (3)$$

เมื่อ

$u$ = ความเร็วของอากาศ

$p$ = ความดันอากาศ

$v$ = ความหนืดจลน์

$f$ = แรงภายนอก

$(u \cdot \nabla)u$ = การเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามทิศทางของการไหล

$\nabla p$ = การเปลี่ยนแปลงของความดันในแต่ละทิศทาง

$\nabla^2 u$ =การกระจายของความเร็วภายใต้ความหนืดของอากาศ

*2.4 สมการ Reynolds-Averaged Navier-Stokes*

สมการ Reynolds - Averaged Navier - Stokes (RANS) [18] ดังแสดงในสมการที่ 4 ใช้สำหรับการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์ โดยใช้ Navier-Stokes โดยใช้ Reynolds averaging เพื่อคำนวณผลกระทบจากการหมุนวนของอากาศ

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla \bar{p} + v\nabla^2 \bar{u} + \bar{f} - \nabla \cdot \bar{\tau} \quad (4)$$

เมื่อ

$\bar{u}$ = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ

$\bar{p}$ = ความดันเฉลี่ยของอากาศ

$\bar{\tau}$ = Reynolds Stress Tensor

$(\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u}$ = การเปลี่ยนแปลงของความเร็วเฉลี่ยของอากาศตามทิศทางของการไหล

$\nabla\bar{p}$ = การเปลี่ยนแปลงของความดันเฉลี่ยของอากาศในแต่ละทิศทาง

$\nabla^2\bar{u}$ = การกระจายของความเร็วเฉลี่ยภายใต้ความหนืดของอากาศ

$\nabla \cdot \bar{\tau}$ = การกระจายของแรงภายในของไหล

*2.5 สมการ Reynolds Stress Tensor*

สมการ Reynolds Stress Tensor [19] ดังแสดงในสมการที่ 5 ใช้สำหรับคำนวณผลกระทบจากการหมุนวนของอากาศที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i u_j} \quad (5)$$

เมื่อ

$\tau_{ij}$ = Reynolds Stress Tensor

$\overline{u_i u_j}$ = อัตราการเฉลี่ยความเร็วเฉลี่ยที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

*2.6 สมการ Eddy Viscosity*

สมการ Eddy Viscosity [20] ดังแสดงในสมการที่ 6 ใช้สำหรับคำนวณการกระจายความหนืดจากการหมุนวนของอากาศที่ไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

เมื่อ

$v_t$ = ความหนืดเทอร์บิวลันต์

$C_\mu$ = ค่าคงที่

$k$ = พลังงานจลน์เทอร์บิวลันต์

$\varepsilon$ = อัตราการกระจายพลังงาน

*2.7 โมเดล $k-\varepsilon$*

โมเดล k-**ε** [20] ดังแสดงในสมการที่ 7 - 8 ใช้เป็นโมเดลพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \cdot \nabla k = \nabla \cdot (\mu_t \nabla k) + P_k - \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot (\mu_t \nabla \varepsilon) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

เมื่อ

$k$ = พลังงานจลน์ที่เกิดจากการไหลแบบเทอร์บิวลันต์

$\varepsilon$ = อัตราการกระจายพลังงาน

$\mu_t$ = ความหนืดเทอร์บิวลันต์

$P_k$ = แหล่งพลังงานเทอร์บิวลันต์

$u \cdot \nabla k$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในเชิงพื้นที่

$\nabla \cdot (\mu_t \nabla k)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในเชิงปริมาตร

*2.8 ค่าตัวประกอบคงที่สำหรับ Turbulent Model*

ค่าตัวประกอบคงที่สำหรับ Turbulent Model [20] ได้แก่ $C_\mu$ = 0.09, $C_1$ = 1.44, $C_2$ = 1.92 ใช้สำหรับแทนค่าเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในการจำลองการไหลแบบเทอร์บิวลันต์ที่แม่นยำ

*2.9 สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ*

สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ [21] ดังแสดงในสมการที่ 9 ใช้สำหรับคำนวณแรงต้านอากาศที่กระทำต่อตัวถังรถยนต์

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (9)$$

เมื่อ

$C_d$ = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

$F_d$ = แรงต้านอากาศ

$\rho$ = ความหนาแน่นของอากาศ

$v$ = ความเร็วของอากาศ

$A$ = พื้นที่หน้าตัดของตัวถังรถ

*2.10 สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ*

สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ [21] ดังแสดงในสมการที่ 10 ใช้สำหรับคำนวณแรงยกที่เกิดจากการไหลของอากาศที่กระทำกับตัวถังรถยนต์

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (10)$$

โดย

$C_l$ = สัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ

$F_l$ = แรงยกอากาศ

$\rho$ = ความหนาแน่นของอากาศ

$v$ = ความเร็วของอากาศ

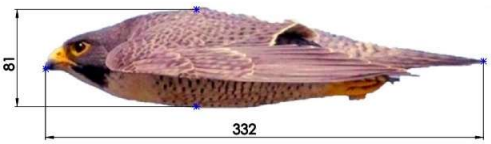
$A$ = พื้นที่หน้าตัดของตัวถังรถ

## 3. การดำเนินการวิจัย

การนำลักษณะรูปร่างของนกเหยี่ยวขณะบินมาออกแบบตัวถังรถยนต์ และศึกษาค่าอากาศพลศาสตร์ของรูปทรงตัวถังรถยนต์โดยใช้เทคโนโลยีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังนี้

*3.1 ศึกษาลักษณะเชิงมิติของนกเหยี่ยวขณะบิน*

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกนกเหยี่ยวสายพันธุ์ Peregrine Falcon ซึ่งเป็นนกนักล่าที่มีความสามารถในการบินเร็วที่สุดในโลก เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษารูปทรงทางอากาศพลศาสตร์ โดยนำภาพถ่ายด้านข้างของนกเหยี่ยวสายพันธุ์ดังกล่าวขณะบินดังแสดงใน รูปที่ 1 มาศึกษาลักษณะเชิงมิติ จากการวัดความยาวลำตัวของนกเหยี่ยวได้ประมาณ 332 มิลลิเมตร และวัดความสูงลำตัวได้ประมาณ 81 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูงได้เท่ากับ 4.1 ต่อ 1




รูปที่ 1 ขนาดความยาวและความสูงของนกเหยี่ยวสายพันธุ์ Peregrine Falcon [22]

จากรูปที่ 1 พบว่ารูปทรงลำตัวของนกเหยี่ยวเป็นรูปทรงที่ใกล้เคียงกับรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงต่าง ๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศสำหรับรูปทรงต่าง ๆ [23]

| Shape | | Drag Coefficient |
|---|---|---|
| Sphere | | 0.47 |
| Half-sphere | | 0.42 |
| Cube | | 1.05 |
| Streamlined Body | | 0.04 |
| Streamlined Half-body | | 0.09 |

*3.2 สร้างแบบจำลองตัวถังรถยนต์*

ในการออกแบบตัวถังรถยนต์ต้นแบบแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

*3.2.1 สร้างแบบจำลองจากรูปทรงนกเหยี่ยวเพเรกริน*

จากการศึกษารูปร่างของนกเหยี่ยว พบว่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูง 4.1 ต่อ 1 ผู้วิจัยได้นำอัตราส่วนดังกล่าวมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบรูปทรงรถยนต์ต้นแบบ โดยอ้างอิงลักษณะรูปร่างของนกเหยี่ยวดังแสดงในรูปที่ 1 และสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยได้มีการปรับขนาดแบบจำลองให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง โดยกำหนดความยาวของตัวรถที่ 4,900 มิลลิเมตร ความสูง 1,195 มิลลิเมตร และความกว้าง 1,800 มิลลิเมตร แบบจำลองนี้ถูกกำหนดให้เป็น แบบจำลองที่ 1 ซึ่งจะใช้เป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนา และปรับปรุงเพิ่มเติมในขั้นตอนถัดไป ดังแสดงในรูปที่ 2

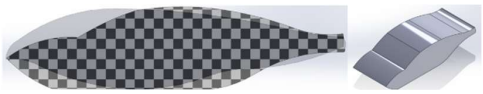
รูปที่ 2 แบบจำลองเลียนแบบรูปร่างนกเหยี่ยว

*3.2.2 ประเมินข้อจำกัดของแบบจำลองเบื้องต้น*

แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2 ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง เนื่องจากขนาด และสัดส่วนของห้องผู้โดยสารยังไม่เหมาะสมกับการใช้งาน

*3.2.3 ปรับปรุงแบบจำลองตามมาตรฐาน BWSC*

การปรับปรุงแบบจำลองโดยอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในรายการ Bridgestone World Solar Challenge (BWSC) รุ่น Cruiser [24] เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดด้านความปลอดภัย และการใช้งานจริง ผลจากการปรับปรุงทำให้ได้ขนาดของตัวถังรถยนต์ดังนี้ ความยาว 4,900 มิลลิเมตร ความสูง 1,172 มิลลิเมตร และความกว้าง 1,800 มิลลิเมตร ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความสูง 4.180 ต่อ 1 อัตราส่วนนี้มีความใกล้เคียงกับรูปร่างของนกเหยี่ยวที่ใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบ โดยแบบจำลองหลังการปรับปรุงถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองที่ 2 ดังแสดงใน รูปที่ 3

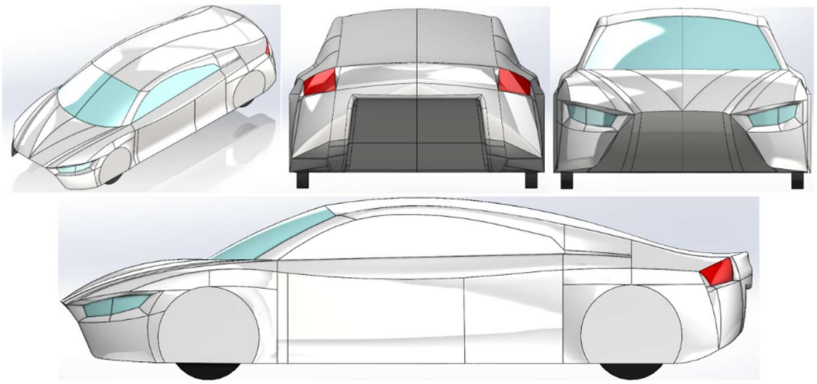


รูปที่ 3 แบบจำลองตัวถังรถยนต์จากรูปร่างของนกเหยี่ยว

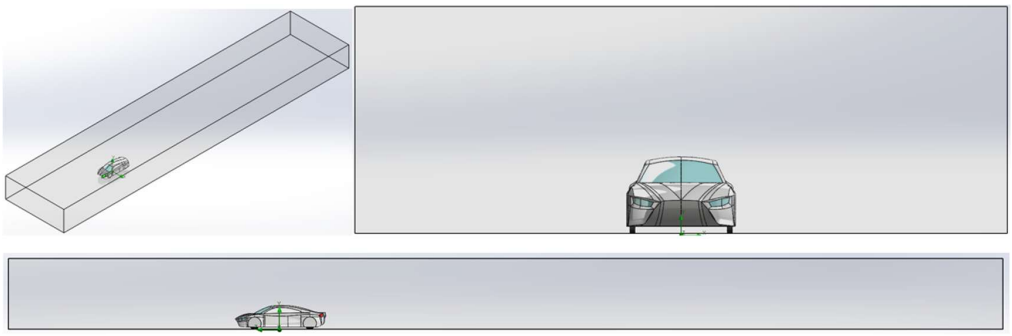
จากนั้นได้นำแบบจำลองที่ 2 มาทำการปรับแต่งเพิ่มเติม โดยเน้นที่การลดพื้นที่หน้าตัดของตัวรถซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดแรงต้านอากาศ พร้อมทั้งเพิ่มรายละเอียดของพื้นผิว ส่วนโค้ง และการจัดวางองค์ประกอบต่าง ๆ บนตัวถัง เพื่อให้รูปทรงโดยรวมมีความใกล้เคียงกับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถใช้งานจริงได้ ทั้งในด้านรูปลักษณ์ ความสมดุล และความเป็นไปได้ในการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ แบบจำลองที่ได้ปรับแต่งนี้ถูกกำหนดให้เป็นแบบจำลองที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4

*3.3 สร้างห้องทดสอบจำลองในคอมพิวเตอร์*

ในการจำลองการไหลของอากาศรอบตัวถังรถยนต์ด้วยวิธี CFD จำเป็นต้องสร้างห้องจำลองการทดสอบเพื่อกำหนดขอบเขตของการไหลของอากาศรอบแบบจำลองให้เหมาะสม และลดผลกระทบของขอบเขตที่อาจมีผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างขอบเขตสามมิติที่ล้อมรอบแบบจำลองตัวถังรถยนต์ โดยกำหนดระยะห่างของขอบเขตจากตัวรถในแต่ละทิศทางดังนี้ ด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบน กำหนดให้มีระยะห่างจากตัวรถเท่ากับ 3 เท่าของความยาวรถ ด้านหลังกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 8 เท่าของความยาวรถ ด้านล่างตัวแบบจำลองถูกจัดวางให้ติดกับพื้นล่างของขอบเขต [25] ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 แบบจำลองของตัวถังรถยนต์ที่ปรับลดพื้นที่หน้าตัด และเพิ่มรายละเอียดต่าง ๆ บนตัวถัง



รูปที่ 5 ขนาดของห้องจำลองการไหลของอากาศ

*3.4 การกำหนดตัวแปรสำหรับการทดสอบ*

แบบจำลองทั้ง 3 แบบมีการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการไหล และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก โดยจำลองผ่านโปรแกรม SolidWorks Flow Simulation ซึ่งคำนวณด้วยวิธีการ FVM (Finite Volume Method) ความถูกต้องของผลการจำลองขึ้นอยู่กับขอบเขตของการจำลองและการลู่เข้าของคำตอบโดยกำหนดขอบเขตของการจำลองดังแสดงในตารางที่ 2

1) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย ความดันอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความหนาแน่นอากาศ ที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ ณ ความดันบรรยากาศปกติ ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบ และรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน

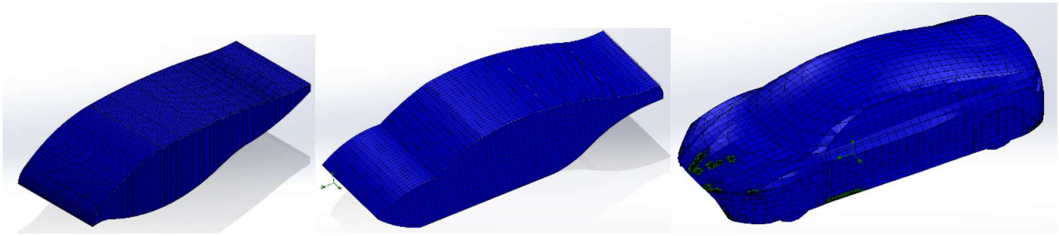
2) ตัวแปรต้น ประกอบด้วย ความเร็วอากาศ ขนาดพื้นที่ตัดของแบบจำลอง

3) ตัวแปรตาม ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก แรงยก แรงต้านอากาศ ความดันสัมพัทธ์ที่ผิว พื้นที่ความเร็วอากาศ และทิศทางเวกเตอร์

โดยการทดสอบจะพิจารณาจากการลู่เข้าของคำตอบขึ้นกับการแบ่งพื้นที่ของแบบจำลอง (meshing) จนคำตอบของการจำลองเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 1% ดังแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 2 เงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองเชิงตัวเลข

| **ตัวต้นแบบ** | **แบบจำลองที่ 1** | **แบบจำลองที่ 2** | **แบบจำลองที่ 3** |
|---|---|---|---|
| **ตัวแปรควบคุม** | ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ ความหนาแน่น 1.225 kg/m³<br>ทุกวัสดุในระบบมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่: 25 $^{\circ}C$<br>ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับผนังของระบบ: Adiabatic Wall<br>โมเดลของการไหลปั่นป่วน $K-\varepsilon$<br>ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s$^2$<br>ไม่คิดผลจากการถ่ายเทความร้อน | | |
| **ตัวแปรต้น** | | | |
| ความเร็วของอากาศ | 80 km/h, 120 km/h | 80 km/h, 120 km/h | 80 km/h, 120 km/h |
| พื้นที่หน้าตัดของแบบจำลอง | 2.23 m$^2$ | 2.11 m$^2$ | 1.985 m$^2$ |
| **ตัวแปรตาม** | ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ, ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก, แรงยก, แรงต้านอากาศ, ความดันสัมพัทธ์ที่ผิว, พื้นที่ความเร็วอากาศ และทิศทางเวกเตอร์ | | |

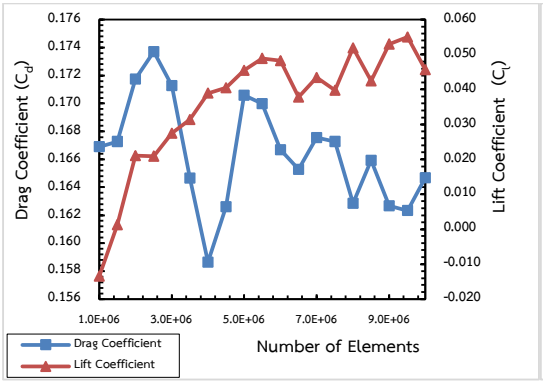


รูปที่ 6 แบบจำลองต่าง ๆ หลังจากถูกแบ่งพื้นที่ (Meshing)

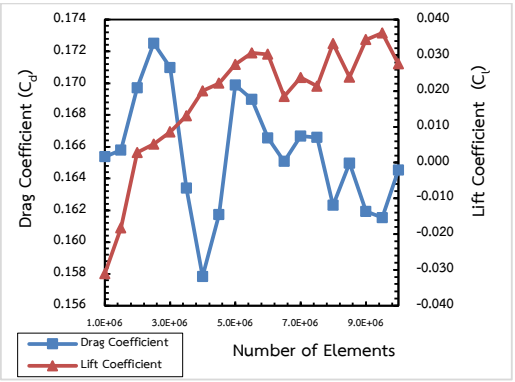
**4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล**

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Study) โดยใช้จำนวนเมชที่หลากหลายระดับตั้งแต่ระดับ 1 ล้านองค์ประกอบ (elements) จนถึงระดับกว่า 10 ล้านองค์ประกอบ เพื่อประเมินผลกระทบของความละเอียดเมชต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ($C_d$) และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ($C_l$) จากรูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนเมชเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงน้อยในกรณีที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงซึ่งสอดคล้องกับหลักการของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Parameters) [26] อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์แรงยกยังคงมีความผันผวนบางประการ โดยเฉพาะในแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 ทั้งกรณีความเร็วลม 80 km/h และ 120 km/h ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากลักษณะของการแยกตัวของกระแสลมบริเวณท้ายแบบจำลอง [27] หรือจากความละเอียดของเมชที่ยังไม่เพียงพอในบางพื้นที่สำคัญ แม้ว่าการศึกษาความเป็นอิสระของเมช (Mesh Independence Study) ในครั้งนี้จะยังไม่สามารถแสดงการเข้าสู่ภาวะคงที่อย่างสมบูรณ์สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงยกในบางช่วงความเร็ว แต่จำนวนเมชที่ใช้ในแต่ละกรณีถือว่าอยู่ในระดับที่สูงและเพียงพอในเชิงวิศวกรรมสำหรับการเปรียบเทียบเชิงสัมพัทธ์ระหว่างรูปทรงแบบจำลองแต่ละแบบ ทั้งนี้ได้มีการกำหนดจำนวนเมชให้ใกล้เคียงกันในทุกกรณีศึกษา เพื่อให้ผลการจำลองมีความเที่ยงตรง และสามารถสะท้อนแนวโน้มทางอากาศพลศาสตร์ของแต่ละแบบจำลองได้อย่างเหมาะสมภายใต้กรอบแนวทางการศึกษาในครั้งนี้นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศในแบบจำลองเดียวกัน ไม่มีความแตกต่างระหว่างความเร็วลมที่แตกต่างกัน

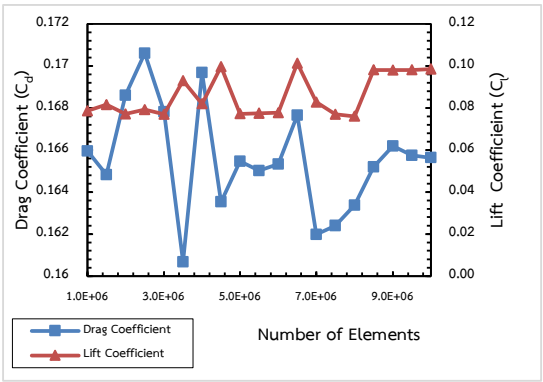
เมื่อพิจารณาตามรูปที่ 8 (ก) พบว่าแรงต้านอากาศของทั้งสามแบบจำลองเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วของอากาศจาก 80 km/h เป็น 120 km/h แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศกลับไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากค่าดังกล่าวพิจารณาตามสมการสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศดังสมการที่ 9 จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำสุดคือ 0.139 ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 สูงสุด มีค่าสูงสุดคือ 0.164 ซึ่งแสดงให้เห็นประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ดีขึ้นในแบบจำลองที่ 3 และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกตามรูปที่ 8 (ข) จะพบว่าค่าดังกล่าวลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่าดังกล่าวพิจารณาตามสมการสัมประสิทธิ์แรงยกอากาศ ดังสมการที่ 10 และลักษณะดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งสามแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุดคือ 0.095 ที่ความเร็ว 80 km/h ขณะที่แบบจำลองที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำที่สุดคือ 0.0276 ที่ความเร็ว 120km/h ดังนั้นจากรูปที่ 8 จึงแสดงให้เห็นถึงผลของรูปทรงที่มีต่อแรงยกภายใต้ความเร็วเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานโดย Kumar และคณะ [28]



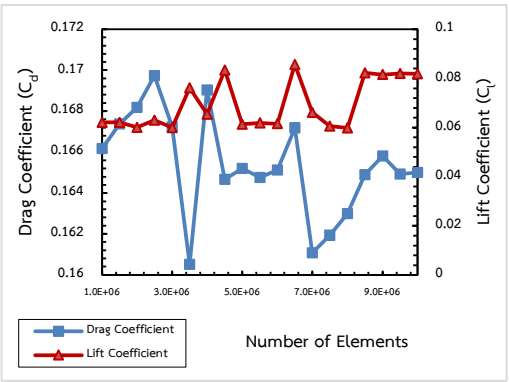

(ก) แบบจำลองที่ 1 ภายใต้ความเร็วลม 80 km/h



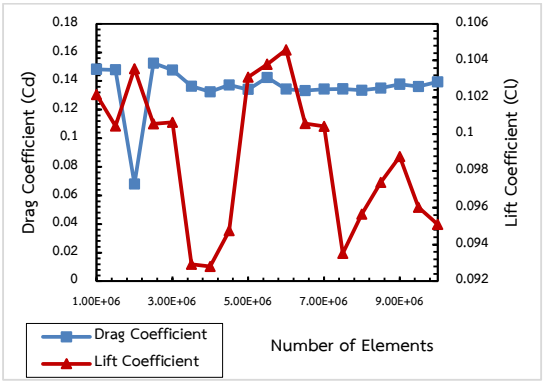

(ข) แบบจำลองที่ 1 ภายใต้ความเร็วลม 120 km/h



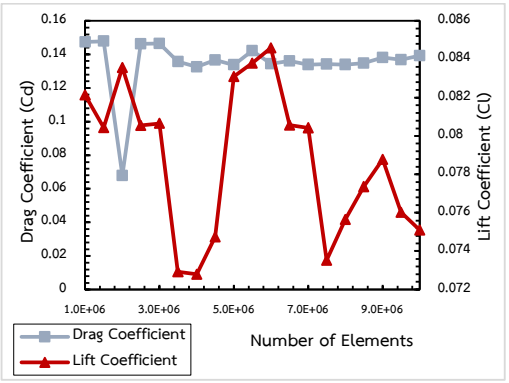

(ค) แบบจำลองที่ 2 ภายใต้ความเร็วลม 80 km/h




(ง) แบบจำลองที่ 2 ภายใต้ความเร็วลม 120 km/h

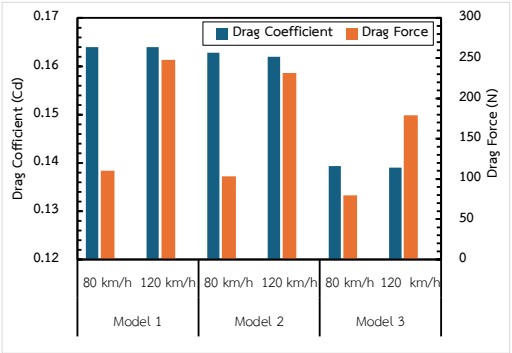



(จ) แบบจำลองที่ 3 ภายใต้ความเร็วลม 80 km/h

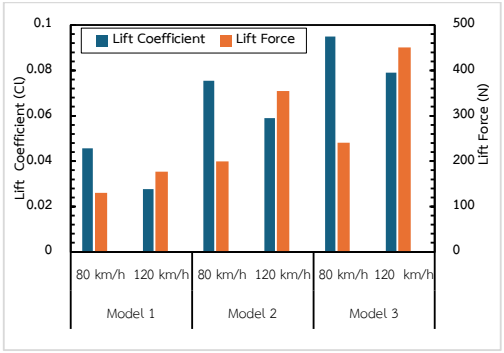



(ฉ) แบบจำลองที่ 3 ภายใต้ความเร็วลม 120 km/h

รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงฉุด และค่าสัมประสิทธิ์แรงยก ภายใต้ความเร็วลม 80 km/h และ 120 km/h ตามลำดับ



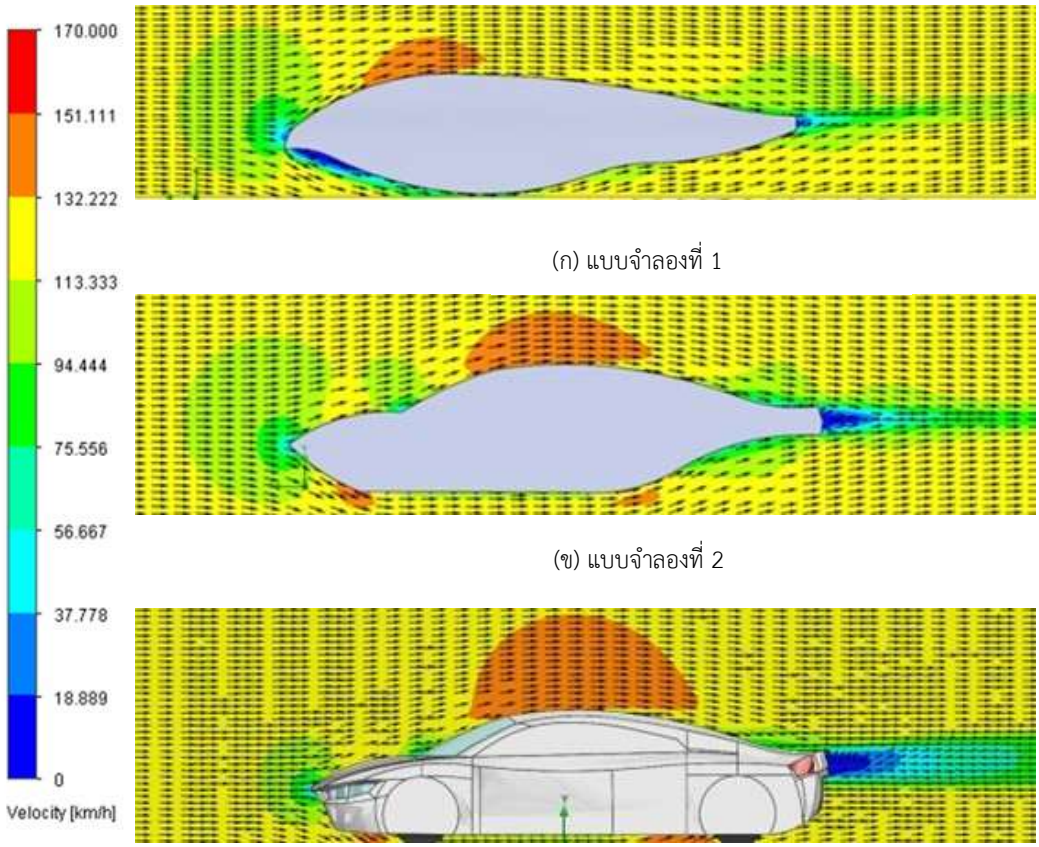

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านกับแรงต้านอากาศ




(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงยกกับแรงยกอากาศ

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบจำลองส่งผลต่อการไหลของอากาศ และการเกิดอากาศวนซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านและแรงยกโดยตรง แบบจำลองที่ 1 ดังรูปที่ 9 (ก) พบว่ามีพื้นที่ความเร็วสูงบริเวณด้านบน (พื้นที่สีส้ม) มีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับทั้งสามแบบจำลอง ส่งผลให้แรงยก และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของนกขณะโจมตีเหยื่อที่ต้องการแรงกดเพื่อเสถียรภาพในการทรงตัว [29]. นอกจากนี้ยังพบลักษณะอากาศวน (Vortex) บริเวณใต้ส่วนหัวของแบบจำลอง ส่งผลให้มีความเร็วลมต่ำ และแรงยกอยู่ในระดับต่ำ สำหรับแบบจำลองที่ 2 ดังรูปที่ 9 (ข) ได้ปรับให้มีรูปทรงเพื่อให้ใกล้เคียงกับรูปทรงของตัวถังรถยนต์ ทำให้บริเวณด้านบนของแบบจำลองมีพื้นที่ความเร็วสูงเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ 1 ส่งผลให้แรงยกและค่าสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้บริเวณใต้ท้ายของแบบจำลองที่ 2 พบพื้นที่ความเร็วต่ำ (พื้นที่สีเขียวอ่อน) โดยเฉพาะเมื่อมีการลดความหนาของส่วนท้าย ส่งผลให้แรงยกในบริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แบบจำลองที่ 2 ยังแสดงให้เห็นการสะสมของอากาศบริเวณส่วนท้าย เนื่องจากความลาดชันของแนวผิวด้านหลังที่มีลักษณะเกือบตั้งฉากส่งผลให้อากาศไม่สามารถไหลลู่ไปตามพื้นผิวได้อย่างราบเรียบเกิดการแยกตัวของกระแสลมและก่อตัวเป็นบริเวณความเร็วต่ำ (พื้นที่สีน้ำเงิน) บริเวณท้ายแบบจำลอง การแยกตัวของอากาศนำไปสู่การก่อตัวของอากาศวน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น [30] แม้จะมีการไหลของอากาศแนบผิวที่ดีขึ้น แต่การแยกตัวบริเวณท้ายทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 ในส่วนของแบบจำลองที่ 3 ได้มีการปรับรูปทรงให้มีความใกล้เคียงกับรูปร่างของรถยนต์ที่ใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะบริเวณด้านท้ายมีการปรับให้มีพื้นที่เพื่อรองรับการติดตั้งมอเตอร์บริเวณล้อหลัง จากรูปที่ 9 (ค) พบว่าแบบจำลองที่ 3 มีลักษณะการกระจายความเร็วของอากาศคล้ายคลึงกับแบบจำลองที่ 2 แต่แรงยกที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกระทบต่อความสามารถในการยึดเกาะถนนของรถยนต์ โดยเฉพาะในช่วงความเร็วสูง นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองที่ 3 มีขนาดของอากาศวนบริเวณส่วนท้ายเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากอากาศถูกบีบใต้ส่วนท้ายของรูปทรง ทำให้อากาศบริเวณดังกล่าวมีความเร็วมากขึ้นจนทำให้อากาศวนเกิดมากขึ้น




(ก) แบบจำลองที่ 1

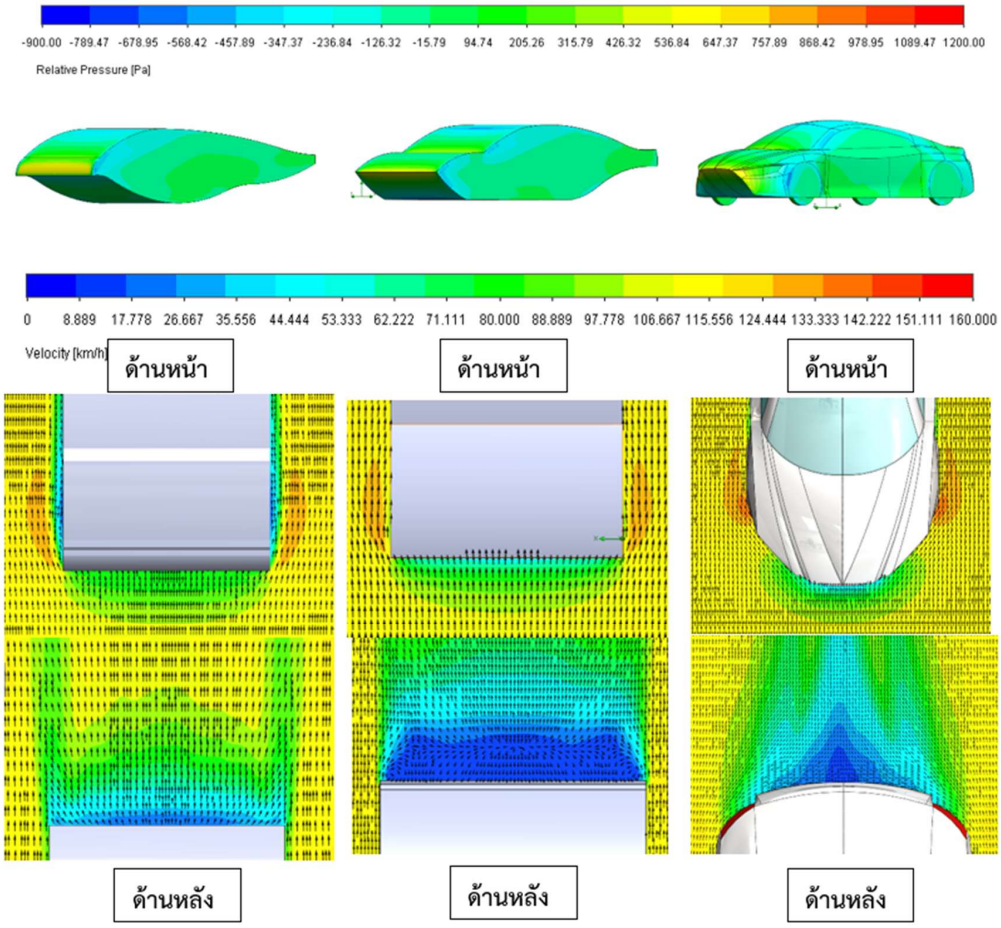
(ข) แบบจำลองที่ 2

(ค) แบบจำลองที่ 3

รูปที่ 9 การกระจายความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองที่ความเร็ว 120 km/h

จากรูปที่ 10 พบว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเป็นผลจากแรงต้านอากาศที่กระทำบนผิวของแบบจำลอง ซึ่งสังเกตได้จากการกระจายตัวของความดันสัมพัทธ์บริเวณด้านหน้าของแบบจำลองทั้งสามแบบแสดงถึงบริเวณที่มีความดันสัมพัทธ์สูง (พื้นที่สีเหลือง) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 536.84 Pa ถึง 647.37 Pa อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ 3 ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะใกล้เคียงกับรถยนต์ที่ใช้งานจริง มีการลบมุม และโค้งมนบริเวณส่วนหน้าของรถ ทำให้อากาศสามารถไหลผ่านได้ราบเรียบมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของเวกเตอร์การไหลของอากาศ (ลูกศรสีดำ) และการกระจายพื้นที่ความเร็วสูงบริเวณด้านหน้าของแบบจำลองที่ 3 (พื้นที่สีเหลือง) ซึ่งมีความต่อเนื่องและราบเรียบกว่ารูปแบบอื่น [31] ในทางตรงกันข้าม แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีจุดที่เกิดความเร็วสูงโดยเฉพาะบริเวณขอบแหลมของแบบจำลอง (พื้นที่สีส้มเข้ม) ความเร็วมากกว่า 120 km/h ลักษณะดังกล่าวเป็นผลจากการไหลของอากาศผ่านขอบที่ไม่มีการลบมุม ทำให้อากาศเปลี่ยนทิศทางกะทันหัน และความเร็วลดลงหลังจากผ่านวัตถุ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากทิศทางของเวกเตอร์ และพื้นที่สีน้ำเงิน (ความเร็วต่ำ) ที่เกิดขึ้นบริเวณท้ายแบบจำลอง สำหรับแบบจำลองที่ 1 แม้การไหลของอากาศบริเวณส่วนท้ายค่อนข้างราบเรียบเนื่องจากส่วนท้ายมีความหนาน้อย แต่พบว่ามีการก่อตัวของอากาศวนบริเวณใต้ส่วนด้านหน้าของแบบจำลอง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แรงต้านเพิ่มขึ้น [32] สำหรับแบบจำลองที่ 2 พบว่ามีการก่อตัวของอากาศวนบริเวณส่วนท้าย เนื่องจากการ

แยกตัวของอากาศที่เกิดการแทนที่ระหว่างอากาศความเร็วสูง และความเร็วต่ำลักษณะการไหลเวียนบริเวณดังกล่าวส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ 1 [33] ส่วนแบบจำลองที่ 3 มีการไหลของอากาศบริเวณส่วนท้ายที่ราบเรียบกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างผิวที่โค้งมนทำให้อากาศไหลออกด้านหลังได้อย่างต่อเนื่อง แม้จะยังคงมีลักษณะอากาศไหลวนอยู่บ้างแต่มีความรุนแรงน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 และ 2 ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของแบบจำลองที่ 3 มีค่าต่ำสุดคือ 0.139 ขณะที่แบบจำลองที่ 2 และ 1 มีค่าเท่ากับ 0.162 และ 0.164 ตามลำดับ




รูปที่ 10 พื้นที่ความดันสัมพัทธ์ของแบบจำลองและลักษณะการกระจายของอากาศด้านหน้าและด้านหลัง

## 5. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์

การศึกษานี้ซึ่งเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านแบบจำลองทั้งสามรูปแบบ โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ได้ผลดังนี้

*5.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ*

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำที่สุด คือ 0.139 แสดงถึงประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ดีที่สุด ขณะที่

แบบจำลองที่ 1 มีค่าสูงสุด คือ 0.164 ซึ่งสะท้อนถึงรูปทรงที่ไม่เหมาะสมต่อการไหลของอากาศ โดยเฉพาะในส่วนหน้าของตัวถังที่มีขอบคมและก่อให้เกิดอากาศวนมาก

*5.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก*

แบบจำลองที่ 3 มี ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสูงสุด อยู่ที่ 0.095 ที่ความเร็ว 80 km/h ซึ่งอาจก่อให้เกิดแรงยกมากเกินไปเมื่อใช้ความเร็วสูงและส่งผลต่อการยึดเกาะถนน ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 มี แรงยกต่ำที่สุด อยู่ที่ 0.0276 ที่ความเร็ว 120 km/h ซึ่งเหมาะสำหรับความมั่นคงและเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ แต่แลกด้วยแรงต้านที่สูงกว่า

*5.3 แรงต้านอากาศ*

แรงต้านอากาศของแบบจำลองทั้งสามมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วลมเพิ่มจาก 80 km/h เป็น 120 km/h ตามสมการแรงต้าน อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ 3 ให้ค่าแรงต้านต่ำที่สุดในทุกระดับความเร็ว เนื่องจากการออกแบบที่ช่วยให้อากาศไหลผ่านตัวถังได้อย่างราบเรียบทั้งด้านหน้าและท้าย

*5.4 แรงยก*

ผลการจำลองพบว่าแบบจำลองที่ 1 มีแรงยกต่ำที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงลักษณะการออกแบบที่ช่วย “กด” ตัวรถให้แนบถนน เหมาะสำหรับการทรงตัวแบบเสถียร เช่นเดียวกับพฤติกรรมของนกเหยี่ยวขณะโจมตีเหยื่อ ส่วนแบบจำลองที่ 3 แม้มีแรงยกมากที่สุด ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมรถที่ความเร็วสูง

*5.5 การกระจายความดันสัมพัทธ์ที่ผิว*

จากผลการทดสอบการกระจายความดันพบว่าแบบจำลองที่ 3 มีการจัดการความดันบริเวณด้านหน้าได้ดีที่สุด โดยมีการลบมุมและโค้งมน ส่งผลให้อากาศสามารถไหลผ่านได้อย่างต่อเนื่องและลดการสะสมของความดันสูง ขณะที่แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีจุดที่เกิดความดันสูงเฉพาะจุด ส่งผลให้เกิดแรงต้านสะสม

*5.6 พื้นที่ความเร็วอากาศ*

แบบจำลองที่ 3 แสดงพื้นที่การกระจายของความเร็วอากาศบริเวณด้านบนที่ต่อเนื่องและกว้างขวางมากกว่าแบบอื่น แสดงถึงการไหลแนบผิวที่ดี ในขณะที่แบบจำลองที่ 1 มีพื้นที่ความเร็วสูงน้อยที่สุด สะท้อนถึงอากาศที่ถูกกีดขวางมากและไหลไม่ราบเรียบ

*5.7 ทิศทางการไหลของอากาศ*

แบบจำลองที่ 3 แสดงการกระจายของเวกเตอร์อากาศที่ราบเรียบและต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณด้านหน้าและด้านข้าง ช่วยให้อากาศไหลผ่านโดยไม่มีจุดแยกตัวแบบรุนแรง ขณะที่แบบจำลองที่ 1 มีการไหลของอากาศเปลี่ยนทิศกะทันหันบริเวณขอบคม ซึ่งส่งผลให้เกิดการแยกตัวเร็วและแรงต้านสูง นอกจากนี้แบบจำลองที่ 1 มีอากาศวนเกิดขึ้นบริเวณใต้ส่วนหน้าของตัวถัง ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มแรงต้าน ส่วนแบบจำลองที่ 2 มีอากาศวนบริเวณท้ายรถ อันเป็นผลจากการออกแบบผนังด้านหลังที่เกือบตั้งฉาก ขณะที่แบบจำลองที่ 3 แม้จะมีอากาศวนท้ายรถเช่นกัน แต่มีขนาดเล็กลงเนื่องจากผิวโค้งที่ช่วยให้การแยกตัวของอากาศลดลง

จากการวิเคราะห์ทั้งหมดสรุปได้ว่า รูปทรงของแบบจำลองส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการไหล และค่าพลศาสตร์อากาศของแบบจำลอง การลดมุมหรือการปรับรูปร่างให้มีความลู่ลมมากขึ้นสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านได้อย่างชัดเจน แต่ต้องคำนึงถึงแรงยกหากมีค่ามากเกินไปจะส่งผลต่อความปลอดภัย และเสถียรภาพของรถยนต์ในขณะขับขี่ที่ความเร็วสูง ดังนั้นการออกแบบที่เหมาะสมจึงควรสร้างสมดุลระหว่างแรงต้านและแรงยก และอาจต้องพิจารณาอุปกรณ์เสริมทางด้านพลศาสตร์ เช่น สปอยเลอร์หรือดิฟฟิวเซอร์ เพื่อควบคุมแรงยกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck,

A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, and B. Rama, Eds., IPCC, Geneva, Switzerland, 2022.

[2] A. Chauhan, A. Singh, P. Baredar and V. Pant, "Solar powered electric vehicles and their charging infrastructure: A review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 1875-1891, 2021.

[3] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis and X. Hao, "Solar cell efficiency tables (version 61)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 1, pp. 3-12, 2023.

[4] S. Chauhan, *et al.*, "Integration of solar cells into electric vehicles: A review of technologies, design, and performance," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111021, 2021.

[5] K. Li and L. Wu, "Computational Fluid Dynamics for Vehicle Aerodynamics," *SAE Int. J. Passenger Cars - Mechanical Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 93-101, 2017.

[6] H. Yeo and S. Hwang, "Design of a Solar-Powered Vehicle Using Biomimetic Principles for Drag Reduction," *Energy Convers. Manage.*, vol. 185, pp. 88-98, 2019.

[7] H. Lohse-Busch, M. Duoba, E. Rask and K. Stutenberg, "Ambient temperature (20°F, 72°F and 95°F) impact on fuel and energy consumption for several conventional vehicles, hybrid and plug-in hybrid electric vehicles and battery electric vehicle," SAE Technical Report, SAE International, 2013.

[8] S. Sebben and A. Vdovin, *Aerodynamics of Passenger Vehicles*, class lecture, Road Vehicle Aerodynamics VT16, Chalmers Technical University, Gothenburg, Sweden, 2016.

[9] J. Han, M. Zhang and X. Gong, "Aerodynamic drag reduction of electric vehicles based on flow control: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 156, p. 111974, 2022.

[10] D. Yang, Q. Zhao and H. Zhang, "Biomimicry in engineering design: A comprehensive review," *J. Bionic Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–27, 2023.

[11] L. R. Tucker, "The deep dive: Peregrine falcon high-speed stoops and aerodynamic efficiency," *Nature*, vol. 509, no. 7500, pp. 473–476, 2014.

[12] J. Katz and A. Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics*, 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.

[13] R. Palin, V. Johnston, S. Johnson, *et al.*, "The aerodynamic development of the Tesla Model S – Part 1: Overview," SAE Technical Paper 2012-01-0177, SAE International, 2012.

[14] S. Suman, A. Kumar and P. R. Sharma, "Computational fluid dynamics simulations for vehicle aerodynamics: Recent advances and applications," *Appl. Energy*, vol. 296, p. 117059, 2021.

[15] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2000, pp. 264–377.

[16] H. Wang, *A Guide to Fluid Mechanics*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2023, pp. 57–107

[17] I. Khalil and I. Lakkis, *Computational Fluid Dynamics: An Introduction to Modeling and*

*Applications*. New York, NY, USA: McGraw Hill, 2023.

[18] M. A. Leschziner, "Reynolds-Averaged Navier–Stokes methods," in *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, vol. 3, J. D. Anderson and M. J. L. Turner, Eds. Chichester, U.K.: Wiley, 2010, pp. 1–10.

[19] B. E. Launder and B. Rodi, *The Turbulence Model: A Second-Moment Closure*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1981.

[20] B. E. Launder and D. B. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974.

[21] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2015, pp. 45–60.

[22] BurningCandleSample. (2020, May 1). PsBattle: Peregrine falcon diving in the air, side view [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/photoshopbattles/comments/g9jn6r/psbattle_peregrine_falcon_diving_in_the_air_side/

[23] X-engineer.org. How to calculate aerodynamic drag force [Online]. Available: https://x-engineer.org/aerodynamic-drag/

[24] BWSC. (2025). Vehicle Specifications and Regulations, Bridgestone World Solar Challenge [Online]. Available: https://www.worldsolarchallenge.org/rules/vehicle-specifications/

[25] SimScale. (2023). Aerodynamic Flow Behavior Around a Vehicle Tutorial [Online]. Available: https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/

[26] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2016.

[27] J. D. Anderson, Jr., *Fundamentals of Aerodynamics,* 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2017.

[28] S. Kumar et al., "Effect of air speed on aerodynamic drag and lift forces on a sport utility vehicle," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.*, vol. 9, no. 1, pp. 181–188, 2016.

[29] R. L. DeLaurier, "Aerodynamics of birds," Comp. Biochem. *Physiol. A: Mol. Integr. Physiol*., vol. 133, no. 1, pp. 3–14, 2002.

[30] H. Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Design*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 1998.

[31] B. E. Larcombe, "The aerodynamics of blunt bodies," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 12, no. 2, pp. 97–164, 1972.

[32] D. R. Kuethe and C.-Y. Chow, *Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*, 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1997.

[33] S. F. Hoerner and H. V. Borst, *Fluid-Dynamic Drag: Theoretical, Experimental and Statistical Information*. Midland Park, NJ: Hoerner Fluid Dynamics, 1985.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 46-56 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การศึกษาประสิทธิภาพของการบูรณะพื้นสะพานกลับรถ : กรณีศึกษาบนถนนทางหลวงหมายเลข 35

# Performance Evaluation of U-Turn Bridge Deck Rehabilitation: A Case Study on Highway No. 35 Thailand

กฤตเมธ มีปัญโญ[1]* วันชัย ยอดสุดใจ[1] สุกิจ ยินดีสุข[2]
[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ, 10900
[2] กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม 2/486 ถนนศรีอยุธยา แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ, 10400
Kittamet Meepunyo[1]* Wanchai Yodsujai[1] Sukit Yindeesuk[2]
[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd, Chatuchak, Bangkok, 10900
[2] Department of Highway, Ministry of Transport, 2/486 Si Ayutthaya Rd, Ratchathewi, Bangkok, 10400
*Corresponding author Email: Kittamet.me@ku.th
(Received: July 22, 2025; Revised: July 31, 2025 ; Accepted: October 6, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างของสะพานกลับรถ โดยวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวและแรงภายในของโครงสร้างทั้งในช่วงก่อนและระหว่างการดำเนินงานบูรณะ เพื่อประเมินความมั่นคงและความปลอดภัยระหว่างการดำเนินงานบูรณะ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการบูรณะทั้งสองรูปแบบ ได้แก่ การบูรณะโดยไม่เสริมคานเหล็ก และการบูรณะโดยการเสริมคานเหล็ก เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสองวิธี ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การบูรณะแบบไม่เสริมคานเหล็กส่งผลให้ค่าการโก่งตัวเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 188.2% เมื่อเทียบกับช่วงก่อนการบูรณะ แต่ในขณะที่การบูรณะแบบเสริมคานเหล็กสามารถลดค่าการโก่งตัวลงได้เฉลี่ย 67.3% เมื่อเปรียบเทียบกับการบูรณะแบบไม่เสริมคานเหล็ก แสดงให้เห็นว่าการเสริมคานเหล็กนั้น จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความมั่นคงของโครงสร้างในระหว่างกระบวนการบูรณะได้อย่างมีนัยสำคัญ ในเชิงปฏิบัติ นั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนพัฒนา หรือปรับปรุงแนวทางการบูรณะสะพานกลับรถในอนาคต โดยเน้นการใช้เทคนิคที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และความปลอดภัยในระหว่างดำเนินงาน

**คำสำคัญ:** สะพานกลับรถ การบูรณะ การโก่งตัว ความมั่นคงของโครงสร้าง การเสริมคานเหล็ก

**ABSTRACT**

This research aims to evaluate the structural performance of a U-turn bridge by analyzing its deflection behavior and internal forces both before and during the rehabilitation process, in order to assess structural stability and safety throughout the construction phase. The study focuses on

comparing two rehabilitation approaches: one without steel girder reinforcement and the other with steel girder reinforcement, to examine the impacts of each method. The results indicate that rehabilitation without girder reinforcement led to an average deflection increase of 188.2% compared to the pre-rehabilitation condition. In contrast, the use of steel girders reduced the average deflection by 67.3% compared to the non-reinforced method. These findings clearly demonstrate that steel girder reinforcement significantly enhances the safety and stability of the structure during rehabilitation. In practical applications, the results of this study can be utilized to support the planning, development, or improvement of U-turn bridge rehabilitation strategies, with an emphasis on techniques that enhance efficiency and safety during execution.

**Keyword:** U-turn bridges, Rehabilitation, Deflection, Structural stability, steel girder reinforcement.

## 1. บทนำ

โครงสร้างพื้นสะพาน ทำหน้าที่รองรับภาระการจราจรและน้ำหนักบรรทุกโดยตรงจากยานพาหนะที่สัญจรในแต่ละวัน ตลอดอายุการใช้งาน พื้นสะพานจะสะสมความเสียหายจากภาระทางกล ได้แก่ แรงล้อและน้ำหนักของรถบรรทุกซ้ำๆ รวมถึงปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น ความชื้น, คลอไรด์, อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง และปฏิกิริยาทางเคมี [1], [2] ความเสียหายที่สะสมดังกล่าว ก่อให้เกิดรอยแตกร้าว การหลุดร่อน การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และส่งผลให้พื้นสะพานไม่สามารถรองรับภาระได้ตามที่ออกแบบไว้ [3], [4]

เพื่อรับมือกับปัญหาดังกล่าว การตรวจสอบประเมินสภาพ และการบูรณะซ่อมแซมพื้นสะพานจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง โดยแนวทางในการบูรณะพื้นสะพานมีหลากหลายรูปแบบ ทั้งการซ่อมเฉพาะจุด การเทคอนกรีตเสริมในพื้นส่วนที่เกิดความเสียหาย หรือการรื้อและเปลี่ยนพื้นสะพานใหม่ทั้งหมด [5] โดยขึ้นอยู่กับระดับความเสียหาย สภาพโครงสร้างเดิม และข้อจำกัดด้านการจราจร หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างมากคือการรื้อและเปลี่ยนพื้นสะพานทั้งความลึก(Full depth replacement) ซึ่งเป็นแนวทางแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6], [7]

ถึงแม้ว่า แนวทางการรื้อและเปลี่ยนพื้นสะพานทั้งความลึก(Full depth replacement) จะมีข้อดีด้านความมั่นคงของโครงสร้าง และทนทานในระยะยาว แต่มักพบปัญหาในด้านระยะเวลาการก่อสร้าง และความจำเป็นในการปิดสะพาน [8] ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการจราจร ด้วยเหตุผลนี้ หลายประเทศจึงได้พัฒนาเทคโนโลยีการรื้อและติดตั้งพื้นสะพานแบบเร่งด่วน โดยการใช้แผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบเต็มความลึก ซึ่งสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วหลังการรื้อพื้นเดิม [9]-[11] ไม่เพียงลดระยะเวลาก่อสร้างและผลกระทบต่อการจราจร แต่ยังเพิ่มความปลอดภัยในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ [12], [13]

เช่นเดียวกับงานของ Zhang และ Chai ที่เสนอการรื้อพื้นโดยไม่ต้องใช้ค้ำยันด้านล่าง เพื่อลดผลกระทบต่อการปิดเส้นทาง และโครงสร้างเดิม [14]

แม้เทคโนโลยีแผ่นพื้นสำเร็จรูปจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายประเทศ การประยุกต์ใช้ในประเทศไทยยังคงมีข้อจำกัดและไม่แพร่หลายมากนัก โดยเฉพาะในกรณีของสะพานกลับรถ หรือสะพานขนาดเล็กที่ยังคงใช้วิธีการรื้อพื้นเดิมด้วยเครื่องจักรกลทั่วไป การควบคุมพฤติกรรมโครงสร้างระหว่างการรื้อถอนจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ แต่ยังขาดการศึกษาเชิงโครงสร้างโดยเฉพาะในช่วงระหว่างการรื้อพื้น ซึ่งเป็นช่วงที่เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายเชิงโครงสร้าง

จากเหตุการณ์ เมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 เวลาประมาณ 20:00 น. ได้เกิดอุบัติเหตุจากการรื้อพื้นสะพานที่บริเวณสะพานกลับรถบนถนนทางหลวงหมายเลข 35 (ถนนพระราม 2) หลักกิโลเมตรที่ 34+000 โดยพบว่าคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) พลิกคว่ำในขณะดำเนินการรื้อพื้นสะพาน สาเหตุเบื้องต้นนั้น อาจเกิดจากขั้นตอนการสกัดพื้นคอนกรีตออก เพื่อทำการปรับปรุงบูรณะพื้นสะพาน แต่การรื้อถอนไม่สามารถสกัดพื้นที่ยื่นออกจากคานตัวริมได้ เนื่องจากราวคอนกรีตกันตก(Barrier) มีการติดตั้งด้วยวิธีการล้วงเหล็กเข้าไปในส่วนของพื้น ซึ่งอาจทำให้คานตัวริมมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และเกิดการเยื้องศูนย์ ประกอบกับพื้นที่ไม่มีการยึดรั้ง ทำให้เกิดโมเมนต์และความไม่สมดุล จนอาจเป็นเหตุให้คานหล่นลงมาซึ่งอาจก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งต่อชีวิต และทรัพย์สิน [15]

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาประสิทธิภาพของพื้นสะพาน และพฤติกรรมการโก่งตัวของพื้นสะพานทั้งในช่วงก่อนและระหว่างกระบวนการรื้อพื้นแบบไม่มีการใช้ค้ำยัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของพื้นสะพาน และตรวจสอบความปลอดภัยในช่วงก่อน และระหว่างการบูรณะสะพาน อีกทั้งยังศึกษาวิธีการลดการโก่งตัวของพื้นสะพานในระหว่างการบูรณะ โดยเสนอแนวทางการรื้อให้ปลอดภัยในระหว่างการดำเนินงาน

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

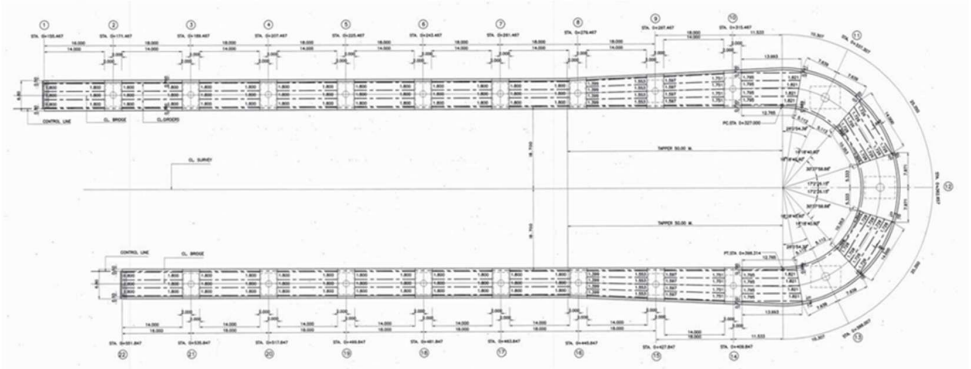
*2.1 รายละเอียดสะพานที่ใช้ในการวิจัย*

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา โดยเลือกสะพานกลับรถหลักกิโลเมตรที่ 34 บนทางหลวงหมายเลข 35(ถนนพระราม 2) ซึ่งได้รับการออกแบบโดยกรมทางหลวง ดังรูปที่ 1

โดยสะพานดังกล่าวเป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงชนิดคานรูปตัวไอ(Prestressed Concrete I-girder) ซึ่งมีจำนวนช่วงคานทั้งหมด 21 ช่วง ความยาวรวมตลอดแนวสะพาน 396.38 เมตร และมีความกว้างของทางเดินรถอยู่ในช่วงระหว่าง 5-8 เมตร โดยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของช่วงสะพาน

คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง ถูกกำหนดตามมาตรฐานของกรมทางหลวง โดยคอนกรีตทั่วไปจะต้องสามารถรับกำลังอัด(ทดสอบด้วยการหล่อทรงลูกบาศก์ที่อายุ28วัน) f’c=300 กก./ซม$^2$ ชั้นคุณภาพของเหล็กเสริมข้ออ้อยและเหล็กเสริมเส้นกลมใช้ SD30 และ SR24 ตามลำดับ

ในส่วนของคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) จะต้องสามารถรับกำลังอัด(ทดสอบด้วยการหล่อทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน) f’c=350 กก./ซม$^2$ กำลังอัดของคอนกรีตขณะดึงลวดอัดแรง f’ci=288 กก./ซม$^2$ ลวดเหล็กอัดแรงขนาด 1/2” กำลังรับแรงดึงสูงสุด Fpu= 18,730 กก. Jacking force 13,382 กก./เส้น

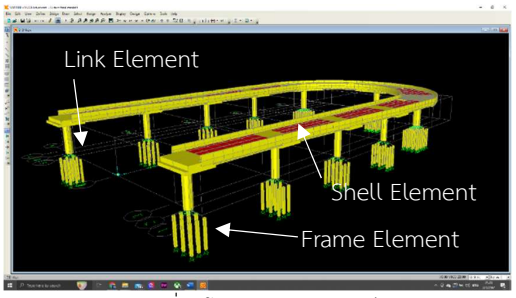


รูปที่ 1 ลักษณะสะพานกลับรถ

*2.2 การสร้างแบบจำลองโมเดลในการวิเคราะห์*

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินพฤติกรรมของสะพานกลับรถก่อนและระหว่างการบูรณะ ได้ดำเนินการด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบจำกัด(Finite Element Analysis) ผ่านโปรแกรม SAP2000 โดยในการสร้างแบบจำลองได้ใช้ Frame Element, Shell Element และLink Element ดังรูปที่ 2

- Frame Element ใช้สำหรับโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้น ได้แก่ เสาเข็ม เสา คานขวาง คานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) และราวคอนกรีตกันตก(Barrier)
- Shell Element ใช้ในส่วนของพื้นสะพาน
- Link Element ใช้เชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างต่างชนิดกัน เช่น การเชื่อมระหว่างเสาเข็มกับเสา และการเชื่อมระหว่างคานขวางกับคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder)



รูปที่ 2 โมเดลการวิเคราะห์

ในการสร้างแบบจำลอง ได้มีการนำแนวคิดการกำหนดค่าขั้นตอนการก่อสร้าง(Construction stage Analysis) มาใช้ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละช่วงของการก่อสร้างและการรื้อถอน โดยแบบจำลองสามารถแสดงผลลัพธ์แยกตามลำดับขั้นตอนการก่อสร้าง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ยังคำนึงถึงพฤติกรรมของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา(Time-dependent) โดยใช้ CEB-FIP Model Code 1990 ซึ่งพิจารณาผลกระทบของวัสดุ ได้แก่ การคืบ(creep) การหดตัว(Shrinkage) และการพัฒนากำลังของคอนกรีต(Hardening)

*2.3 รูปแบบการวิเคราะห์*

ในการวิเคราะห์ได้ทำการเลือกช่วง 7-17 ซึ่งเป็นช่วงที่มีขนาดความกว้างทางเดินรถ และจำนวนคานมากที่สุด โดยแบบจำลองการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ก่อนทำการบูรณะ และระหว่างการบูรณะ

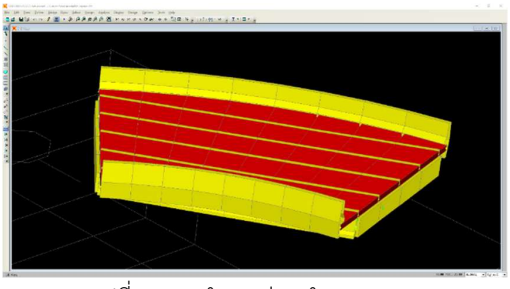
รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการวิเคราะห์พิจารณาเฉพาะน้ำหนักจากตัวเอง(Self-weight) เป็นหลัก โดยมิได้รวมน้ำหนักบรรทุกจร(Live load) หรือน้ำหนักที่กระทำจากภายนอก เนื่องจากในช่วงที่ศึกษาสะพานอยู่ระหว่างปิดการใช้งานทั้งในกรณีเมื่อก่อสร้างเสร็จ และในช่วงระหว่างการบูรณะ

สำหรับกรณีที่สะพานผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี ได้ใช้หลักการวิเคราะห์พฤติกรรมวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา(Time-dependent) ตามมาตรฐาน CEB-FIP Model Code 1990 เพื่อสะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของโครงสร้างและเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์

นอกจากนี้ ยังได้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ ไม่เชิงเส้น (nonlinear analysis) เพื่อพิจารณาผลกระทบจาก secondary effects และประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดพฤติกรรมไม่เสถียร (instability) ของโครงสร้าง โดยเฉพาะในช่วงที่มีการรื้อพื้นสะพานแบบเต็มความลึก (full-depth removal)

*2.3.1 การวิเคราะห์ก่อนทำการบูรณะ*

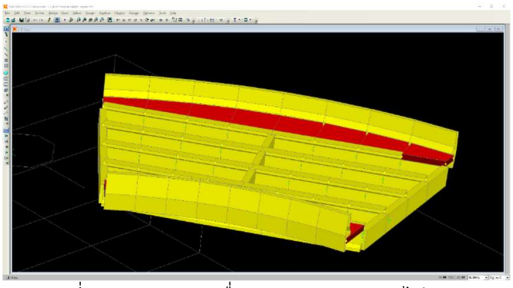
ในขั้นตอนนี้ ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองของสะพานดังรูปที่ 3 เพื่อใช้วิเคราะห์ 2 สภาวะ ได้แก่ สะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ และสะพานเมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี เพื่อประเมินประสิทธิภาพของพื้นสะพานและตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งตัวก่อนทำการบูรณะ


รูปที่ 3 แบบจำลองก่อนทำการบูรณะ

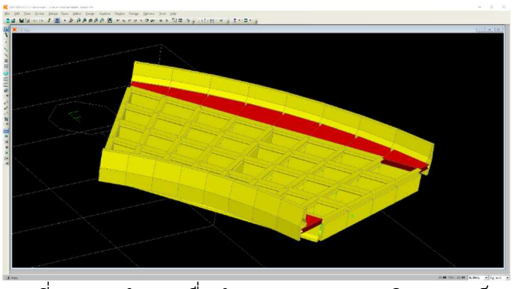
*2.3.2 การวิเคราะห์ระหว่างการบูรณะ*

ในระหว่างการบูรณะ ได้จำลองสถานการณ์การรื้อพื้นแบบเต็มความลึก(Full depth) โดยทำการตรวจสอบพฤติกรรมการโก่งตัวของพื้นสะพาน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกรณีที่ไม่มีการเสริมคานเหล็กดังรูปที่ 4 และมีการเสริมคานเหล็กดังรูปที่ 5

โดยการบูรณะแบบเสริมคานเหล็กนั้น จะทำการติดตั้งคานเหล็กยึดระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) แล้วจึงทำการรื้อพื้น เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวของพื้นสะพาน



รูปที่ 4 แบบจำลองเมื่อทำการบูรณะแบบไม่เสริมคานเหล็ก



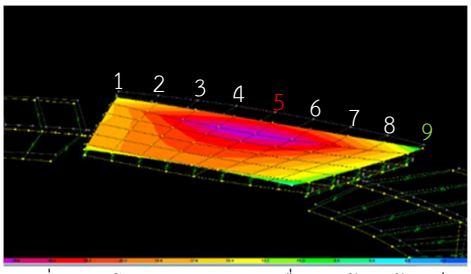
รูปที่ 5 แบบจำลองเมื่อทำการบูรณะแบบเสริมคานเหล็ก

## 3. ผลการวิเคราะห์งานวิจัย

โดยแบบจำลองการวิเคราะห์ จะแบ่งออกเป็น 4 สภาวะ ได้แก่ สะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ สะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี สะพานเมื่อมีการบูรณะแบบยังไม่มีการเสริมคานเหล็ก และสะพานเมื่อมีการบูรณะแบบเสริมคานเหล็ก

*3.1 สะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ*

หลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวของพื้นสะพาน โดยรูปที่ 6 แสดงลักษณะการโก่งตัวของพื้นสะพาน และตารางที่ 2 แสดงค่าการโก่งตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ

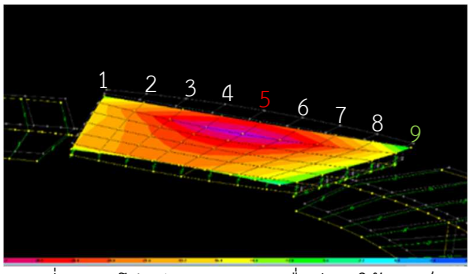



รูปที่ 6 การโก่งตัวของสะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ

ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าการโก่งตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งด้านนอกไปยังตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นสะพาน โดยตำแหน่งที่มีค่าการโก่งตัวมากที่สุดคือบริเวณตำแหน่งที่ 5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ -23.95 มิลลิเมตร ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นช่วงที่พื้นสะพานยื่นออกจากแนวคานมากที่สุด จึงส่งผลต่อค่าการโก่งตัวที่สูง เมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ

*3.2 สะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี*

หลังจากสะพานถูกใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวของพื้นสะพานอีกครั้ง เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของพื้นสะพาน โดยรูปที่ 7 แสดงลักษณะการโก่งตัวของพื้นสะพานหลังการใช้งานเป็นระเวลา 10 ปี และตารางที่ 2 แสดงค่าการโก่งตัวแต่ละตำแหน่ง



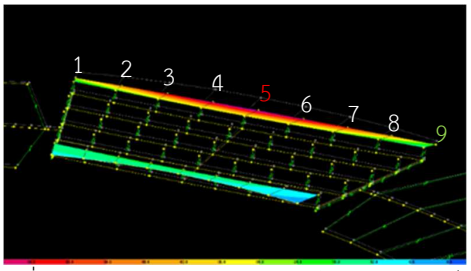

รูปที่ 7 การโก่งตัวของสะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี

จากการเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวกับกรณีเมื่อสะพานก่อสร้างแล้วเสร็จ พบว่าค่าการโก่งตัวมีการเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 2–3 มิลลิเมตร ในแต่ละตำแหน่ง โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งที่ 5 ยังคงแสดงค่าการโก่งตัวสูงสุดเท่ากับ -26.52 มิลลิเมตร

แม้ว่าค่าการโก่งตัวที่เพิ่มขึ้นจะไม่มากนัก แต่จากการสำรวจสภาพภาคสนามด้วยการสังเกต พบว่าพื้นสะพานมีร่องรอยความเสียหายสะสม เช่น รอยร้าว การแตกร่อน และการหลุดร่อนของผิวคอนกรีต ซึ่งบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของพื้นสะพาน จึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการบูรณะพื้นสะพาน เพื่อยืดอายุการใช้งาน และเพื่อความปลอดภัยของผู้สัญจรในอนาคต

*3.3 สะพานเมื่อมีการบูรณะแบบยังไม่มีการเสริมคานเหล็ก*

ในขั้นตอนการบูรณะพื้นสะพาน ได้ดำเนินการรื้อพื้นที่เสื่อมสภาพออก แต่บริเวณพื้นที่ยื่น ไม่สามารถทำการรื้อได้เนื่องจากการติดตั้งราวคอนกรีตกันตก(Barrier) จึงทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการโก่งตัวของพื้นที่ยื่น โดยปรากฏในรูปที่ 8 และค่าการโก่งตัวแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 การโก่งตัวของสะพานแบบยังไม่เสริมคานเหล็ก

จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าการโก่งตัวมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้จากกรณีสะพานที่ใช้งานมาแล้วเป็นระยะเวลา 10 ปี โดยตำแหน่งที่มีค่าการโก่งตัวสูงสุดยังคงเป็นตำแหน่งที่ 5 ซึ่งมีค่าถึง -77.72 มิลลิเมตร และมีอัตราการเพิ่มขึ้นฉลี่ยถึง 188.18% เมื่อเทียบกับสะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัวเมื่อมีการบูรณะแบบยังไม่มีการเสริม

| ตำแหน่ง | อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการโก่งตัว (%) |
|---|---|
| 1 | 150.70 |
| 2 | 179.91 |
| 3 | 186.68 |
| 4 | 190.55 |
| 5 | 193.06 |
| 6 | 195.38 |
| 7 | 197.54 |
| 8 | 204.34 |
| 9 | 195.45 |
| **เฉลี่ย** | **188.18** |

สาเหตุของการโก่งตัวนั้น เกิดจากข้อจำกัดการรื้อพื้นที่ไม่สามารถทำการรื้อพื้นในส่วนที่ยื่นออกมา เนื่องจากมีการติดตั้งราวคอนกรีตกันตก(Barrier) ยึดเข้ากับตัวพื้นในส่วนที่ยื่นออกมา ส่งผลให้เกิดค่าการโก่งตัวที่สูงมากยิ่งขึ้น

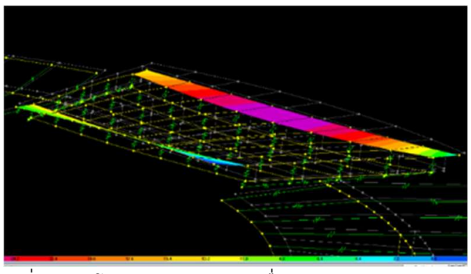
พฤติกรรมดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการบูรณะด้วยการรื้อพื้นเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการเสริมกำลัง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาวิธีการบูรณะที่ครอบคลุมมากขึ้น เช่น การเสริมคานเหล็ก หรือการรับแรงเพิ่มเติม เพื่อควบคุมการโก่งตัวและเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้างทั้งหมด

*3.4 สะพานเมื่อมีการบูรณะแบบเสริมคานเหล็ก*

ผู้วิจัยได้ดำเนินการเสริมคานเหล็กชนิด WF ขนาด 250x250x72.4 kg/m โดยการเชื่อมระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) ทุกระยะ 2 เมตร ก่อนทำการรื้อพื้นสะพาน ลักษณะการโก่งตัวของพื้นดังรูปที่ 9 และค่าการโก่งตัวของพื้นสะพานในแต่ละตำแหน่งแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการโก่งตัวของสะพานแต่ละสภาวะ

| ตำแหน่ง | สะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ (มิลลิเมตร) | สะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี (มิลลิเมตร) | สะพานเมื่อมีการบูรณะแบบยังไม่มีการเสริมคานเหล็ก (มิลลิเมตร) | สะพานเมื่อมีการบูรณะแบบเสริมคานเหล็ก (มิลลิเมตร) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -12.40 | -12.92 | -32.39 | -12.14 |
| 2 | -17.26 | -18.62 | -52.12 | -19.04 |
| 3 | -21.20 | -23.27 | -66.71 | -24.37 |
| 4 | -23.47 | -25.93 | -75.34 | -27.32 |
| 5 | -23.95 | -26.52 | -77.72 | -27.68 |
| 6 | -22.71 | -25.10 | -74.14 | -25.55 |
| 7 | -19.60 | -21.52 | -64.03 | -20.75 |
| 8 | -14.57 | -15.68 | -47.72 | -13.30 |
| 9 | -8.59 | -8.79 | -25.97 | -4.50 |
| **เฉลี่ย** | **-18.19** | **-19.82** | **-57.35** | **-19.41** |



รูปที่ 9 การโก่งตัวของสะพานเมื่อมีการบูรณะแบบเสริมคานเหล็ก

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าการเสริมคานเหล็กช่วยลดค่าการโก่งตัวของพื้นสะพานได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะตำแหน่งที่ 5 ซึ่งค่าการโก่งตัวมีการลดลงเหลือเพียง -27.68 มิลลิเมตร และมีอัตราการลดลงเฉลี่ยถึง 67.28% เมื่อเทียบกับการบูรณะแบบยังไม่มีการเสริมคานเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 อัตราการลดลงของค่าการโก่งตัวเมื่อมีการบูรณะแบบมีการเสริมคานเหล็ก

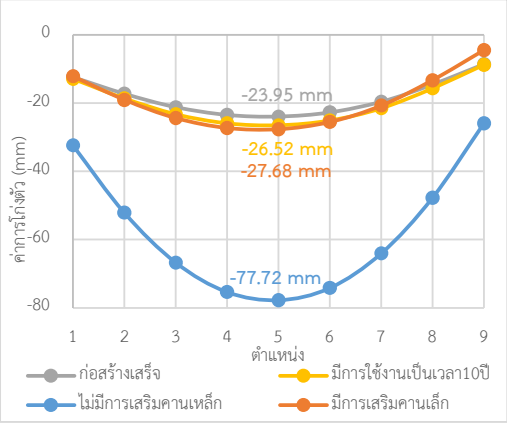
| ตำแหน่ง | อัตราการลดลงของค่าการโก่งตัว (%) |
|---|---|
| 1 | 62.52 |
| 2 | 63.47 |
| 3 | 63.47 |
| 4 | 63.74 |
| 5 | 64.38 |
| 6 | 65.54 |
| 7 | 67.59 |
| 8 | 72.13 |
| 9 | 82.67 |
| **เฉลี่ย** | **67.28** |

*3.5 การเปรียบเทียบผลก่อนบูรณะ และระหว่างการบูรณะ*

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของพื้นสะพาน ได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ก่อนการบูรณะ และระหว่างการบูรณะ โดยพิจารณาจากค่าการโก่งตัว (Deflection), แรงเฉือน (Shear Force), โมเมนต์ดัด (Bending Moment) และแรงบิด (Torsion)

*3.5.1 ค่าของการโก่งตัว (Deflection)*

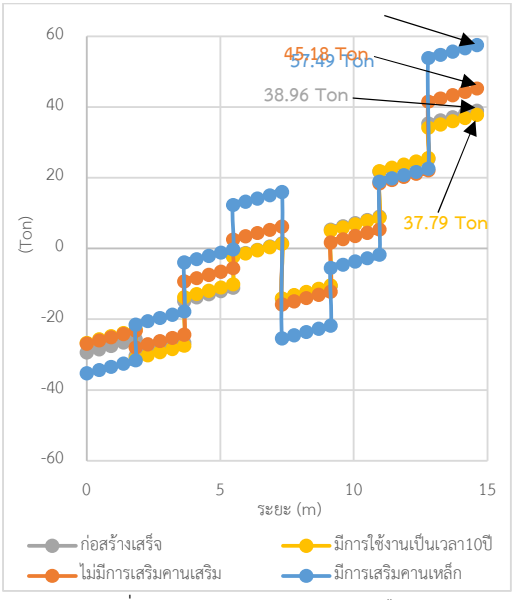
จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าการโก่งตัวของพื้นในแต่ละตำแหน่งมีความใกล้เคียงกันในกรณีก่อนการบูรณะและระหว่างการบูรณะแบบมีการเสริมคานเหล็ก ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการเสริมคานเหล็กช่วยลดค่าการโก่งตัวของพื้นสะพานอย่างมีนัยสำคัญในทุกตำแหน่ง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเสริมคานเหล็ก โดยเฉพาะตำแหน่งที่ 5 ซึ่งมีค่าการโก่งตัวสูงสุดลดลงจาก -77.72 มิลลิเมตร เหลือ -27.68 มิลลิเมตร คิดเป็นความแตกต่างเท่ากับ 50.04 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 10




รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัว

*3.5.2 ค่าแรงเฉือน (Shear Force)*

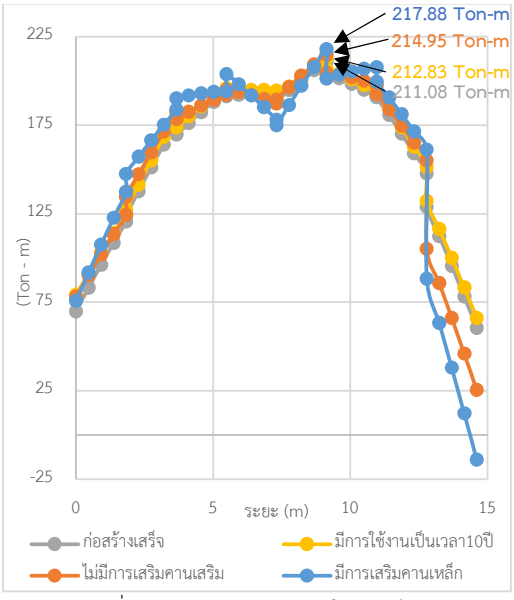
จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าแรงเฉือนในกรณีก่อนการบูรณะ และและระหว่างการบูรณะ มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่งของคาน แสดงให้เห็นว่าการดำเนินการบูรณะพื้นสะพานในลักษณะที่ศึกษา ไม่มีผลกระทบต่อแรงเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 11




รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าแรงเฉือน

*3.5.3 โมเมนต์ดัด (Bending Moment)*

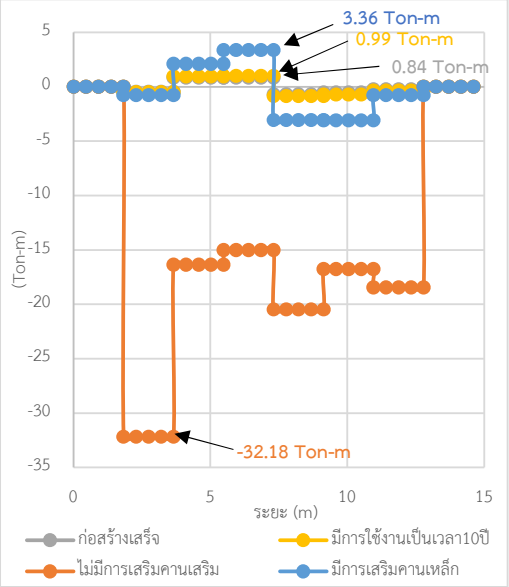
เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัด ที่เกิดขึ้นพบว่าในแต่ละสภาวะ พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นอยู่ที่ประมาณ 217.88 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 12 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าการเสริมคานเหล็กไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ดัด




รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัด

*3.5.4 ค่าแรงบิด (Torsion)*

การวิเคราะห์แรงบิดที่เกิดขึ้นก่อนการบูรณะพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละสภาวะ อย่างไรก็ตามระหว่างการบูรณะ พบความแตกต่างกันอย่างชัดเจนของค่าแรงบิดระหว่างกรณีไม่มีการเสริมคานเหล็ก และกรณีมีการเสริมคานเหล็ก โดยกรณีที่ไม่มีการเสริมคานเหล็ก ค่าแรงบิดสูงถึง -32.18 ตัน-เมตร ขณะที่มีการเสริมคานเหล็ก ค่าแรงบิดลดลงเหลือเพียง 3.36 ตัน-เมตร ซึ่งแสดงในเห็นถึงการลดลงของแรงบิดจากการเสริมคานเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 13




รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าแรงบิด

โดยค่าการโก่งตัว และแรงบิดที่ลดลงในกรณีที่มีการเสริมคานเหล็ก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมคานเหล็ก ที่ช่วยลดค่าการโก่งตัว และแรงบิด ส่งผลให้มีความปลอดภัยในระหว่างการบูรณะได้มากขึ้น

## 4. สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ประเมินพฤติกรรมการโก่งตัวของสะพานกลับรถบนถนนทางหลวงหมายเลข 35 ภายใต้สภาวะต่างๆ ทั้งช่วงก่อนและระหว่างการบูรณะ รวมถึงวิเคราะห์ผลจากการเสริมคานเหล็ก และไม่เสริมคานเหล็กเพื่อประเมินความปลอดภัย โดยมีข้อสรุปดังนี้

*4.1 สะพานในช่วงก่อนการบูรณะ*

การเปรียบเทียบผลระหว่างสะพานเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จ กับกรณีสะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี พบว่าค่าการโก่งตัวในทั้งสองสภาวะมีความใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณ 2-3 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามในการสำรวจสภาพภาคสนามด้วยการสังเกต พบความเสียหายของพื้นคอนกรีต เช่น รอยร้าว แตกร่อน และการหลุดร่อนของผิว ซึ่งเป็นผลจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการบูรณะ เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ที่สัญจร และยืดอายุการใช้งานของสะพานให้มากขึ้น

*4.2 สะพานในช่วงดำเนินการบูรณะ*

ในการดำเนินการบูรณะโดยการรื้อพื้นสะพาน พบว่าในกรณีที่ไม่มีการเสริมคานเหล็ก ค่าการโก่งตัวของพื้นสะพานเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง -77.72 มิลลิเมตร ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นของการโก่งตัวร้อยละ 193.06 เมื่อเทียบกับกรณีสะพานเมื่อมีการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 ปี ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในระหว่างดำเนินงาน อาจเสี่ยงต่อการพลิกคว่ำ และเกิดอุบัติเหตุได้ในที่สุด

ในทางตรงกันข้าม การบูรณะแบบมีคานเหล็กเสริมนั้น จะช่วยลดค่าการโก่งตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งค่าการโก่งตัวลดเหลือเพียง -27.68 มิลลิเมตร โดยค่าการโก่งตัวลดลงร้อยละ 64.38 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เสริมคานเหล็ก จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และลดการเกิดอุบัติเหตุในระหว่างการดำเนินงาน

*4.3 การเปรียบเทียบผลแรงภายใน*

จากการเปรียบเทียบแรงภายในที่กระทำต่อคานในแต่ละสภาวะ พบว่า ค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดมีความใกล้เคียงกันในทุกสภาวะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแต่ละสภาวะไม่ได้ส่งผลกระทบต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด

แต่เมื่อพิจารณาแรงบิด จะพบได้ว่า มีความแตกต่างอย่างชัดเจนในช่วงระหว่างการบูรณะ ในกรณีไม่มีการเสริมคานเหล็ก ค่าแรงบิดสูงสุดจะอยู่ที่ -32.18 ตัน แต่เมื่อมีการเสริมคานเหล็ก ค่าแรงบิดที่จะลดลงเหลือเพียง

3.36 ตัน คิดเป็นการลดลงของแรงบิดร้อยละ 89.56 แสดงให้ถึงความสามารถของคานเหล็กเสริมในการควบคุมแรงบิดระหว่างการบูรณะ

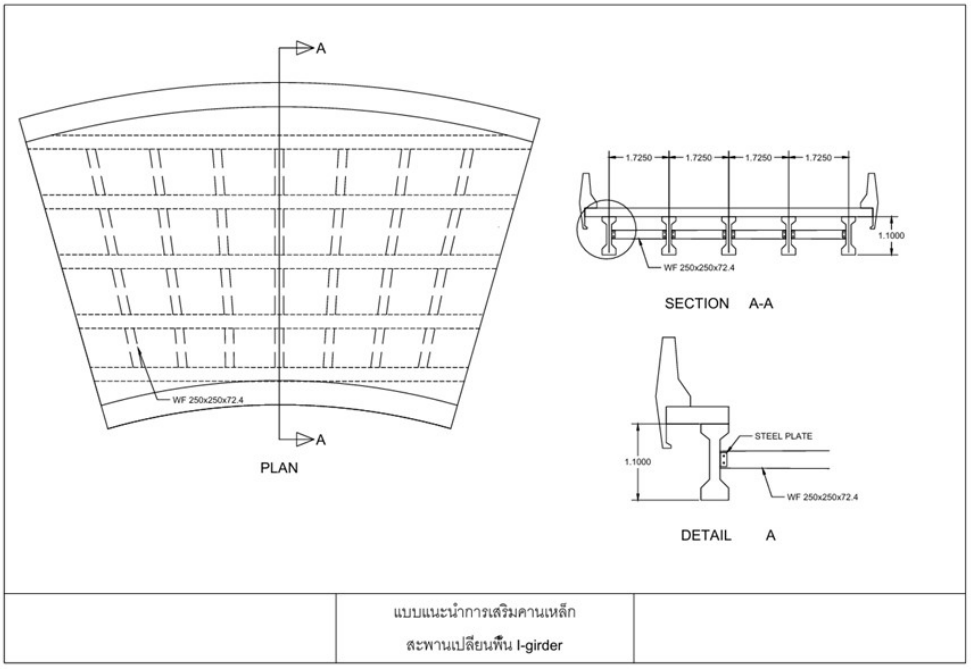
อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ยังไม่ได้มีการดำเนินการวางแผนและทดสอบภาคสนามจริง เพื่อยืนยันค่าการโก่งตัว และพฤติกรรมแรงภายในที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข ทั้งนี้ในอนาคตอาจมีการวางแผนดำเนินการทดสอบเพิ่มเติม เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และสนับสนุนการบูรณะให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 5. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่า การติดตั้งคานเหล็กเสริมในระหว่างการดำเนินงาน สามารถช่วยลดค่าการโก่งตัว ให้มีความปลอดภัย และลดการเกิดอุบัติเหตุได้มากขึ้น แต่เนื่องจากการติดตั้งคานเหล็กเสริมในทุกช่วงอาจส่งผลต่อภาระต้นทุนที่สูง จึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

- ควรมีการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของคานเหล็กเสริมให้มีความเหมาะสม
- การพิจารณาหน้าตัด และรูปแบบการติดตั้ง
- ติดตั้งแผ่นเหล็กกับคานคอนกรีตอัดแรงรูปตัวไอ(I-girder) จากโรงงานเพื่อความสะดวกในการบูรณะ
- แบบแนะนำการติดตั้ง ดังรูปที่ 14

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะและคุณสมบัติของสะพานแต่ละตัว




รูปที่ 14 แบบแนะนำเสริมคานเหล็ก

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] T. E. Boothby and J. A. Laman, “Cumulative damage to bridge concrete deck slabs due to vehicle loading,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 80–82, 1999.

[2] E. Shahrokhinasab and D. Garber, “Long-term performance of full-depth precast concrete (FDPC) deck panels,” *Engineering Structures*, vol. 244, p. 112738, 2021.

[3] S. Seguirant and R. Miller, “Precast, prestressed concrete products for infrastructure,” *PCI Journal*, vol. 68, no. 1, pp. 3–05, 2023.

[4] R. Al-Rousan, “Behavior of prefabricated full-depth precast concrete bridge deck panel system: Optimum prestress level,” *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp. 607–614, 2020.

[5] G. Ramey and S. O. Russell, *Rapid rehabilitation/replacement of bridge decks*. Montgomery, AL: Alabama Dept. of Transportation, 1998.

[6] M. P. Culmo, “Rapid bridge deck replacement with full-depth precast concrete slabs,” *Transportation Research Record*, vol. 1712, no. 1, pp. 139–146, 2000.

[7] M. Biswas, “On modular full depth bridge deck rehabilitation,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 112, no. 1, pp. 105–120, 1986.

[8] M. Hu, Z. Jia, Q. Han, Y. Ni, C. Jiao and P. Long, “Shear behavior of innovative high performance joints for precast concrete deck panels,” *Engineering Structures*, vol. 261, p. 114307, 2022.

[9] D. Garber and E. Shahrokhinasab, *Performance comparison of in-service, full-depth precast concrete deck panels to cast-in-place decks*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41831

[10] J. Umphrey, D. Beck, G. E. Ramey, and M. L. Hughes, “Rapid replacement of four GDOT bridge decks,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 12, no. 1, pp. 48–58, 2007.

[11] T. J. Mander, M. D. Henley, R. M. Scott, M. H. Head, J. B. Mander, and D. Trejo, “Experimental performance of full-depth precast, prestressed concrete overhang, bridge deck panels,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 503–510, 2010.

[12] H. L. Stefaniuk, A. A. Semendary, and D. Svecova, “Full scale testing of ultra-high performance concrete closure joint for prefabricated full-depth precast concrete bridge deck panel system,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 27, no. 10, pp. 1791–1809, 2024.

[13] M. Abokifa, M. A. Moustafa, and A. M. Itani, “Comparative structural behavior of bridge deck panels with polymer concrete and UHPC transverse field joints,” *Engineering Structures*, vol. 247, p. 113195, 2021.

[14] Y. Zhang and Y. H. Chai, “Bridge deck replacement of posttensioned concrete box-girder bridges,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 25, no. 12, p. 04020107, 2020.

[15] P. Thammarak, “Explain the mechanism of the incident in which a prestressed concrete I-girder on a U-turn bridge at kilometer marker 34 on Rama II Road overturned and fell onto vehicles traveling below,” *Thailand Engineering Journal*, vol. 75, no. 3, pp. 34–42, 2022.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 57-72 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การออกแบบและสร้างชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดย MediaPipe Holistic

# Design and Make a Work Study Simulation Model Using MediaPipe Holistic

กันยารัตน์ พูลเพียร
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
110/1-4 ถนนประชาชื่น ทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
Kanyarat Punpain
College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University,
110/1-4 Prachachuen Road, Thung Song Hong Lak Si District, Bangkok 10210
* Corresponding author Email: kanyarat.pun@dpu.ac.th
(Received: February 7, 2024; Revised: July 22, 2025 ; Accepted: October 16, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดย MediaPipe Holistic สำหรับประเมินความเมื่อยล้า เพิ่มความแม่นยำในการบันทึกเวลาและองศาการเคลื่อนไหวของร่างกายในการปฏิบัติงาน เพื่อแก้ไขปัญหาข้อผิดพลาดจากการจับเวลาด้วยมือและข้อจำกัดในการประเมินความเมื่อยล้า การทดสอบดำเนินการด้วยกันทั้งหมด 2 รูปแบบ: รูปแบบที่ 1 ใช้กระบะห่าง 42 ซม. เก้าอี้สูง 62.8 ซม. และรูปแบบที่ 2 ใช้กระบะห่าง 27.5 ซม. เก้าอี้สูง 54.8 ซม. ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบที่ 1 ช่วยลดความเมื่อยล้าได้ดีกว่ารูปแบบที่ 2 เนื่องจากลดการเอี้ยวตัว แต่ทั้งสองรูปแบบยังคงมีอาการปวดบ่า ไหล่ และแขนเมื่อทำงานต่อเนื่อง การวิเคราะห์เวลามาตรฐานด้วย MediaPipe Holistic ชี้ว่ารูปแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 9.89 วินาที/ชิ้นงาน และมีการเคลื่อนไหวต่อเนื่องกว่า ขณะที่รูปแบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ย 9.91 วินาที/ชิ้นงาน และเน้นความยืดหยุ่นของไหล่มากกว่า การค้นพบนี้มีประโยชน์ในการออกแบบสถานีงานตามหลักการยศาสตร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความเมื่อยล้า

**คำสำคัญ:** การศึกษาการทำงาน, MediaPipe Holistic, ความเมื่อยล้า, การยศาสตร์, การวิเคราะห์ท่าทางการเคลื่อนไหว

**ABSTRACT**

This research aimed to design and develop a work simulation set using MediaPipe Holistic to assess fatigue, improve the accuracy of time recording, and measure body movement angles during task performance, thereby addressing issues of manual timing errors and limitations in fatigue evaluation. Testing was conducted in two configurations: Configuration 1 used a tray positioned 42 cm away with a chair height of 62.8 cm, while Configuration 2 used a tray positioned 27.5 cm away with a chair height of 54.8 cm. The study found that Configuration 1 was more effective at reducing fatigue than Configuration 2, primarily due to minimizing torso twisting; however, both configurations still resulted in shoulder and arm pain with continuous work. Standard time analysis with MediaPipe Holistic revealed that Configuration 1 had an average of 9.89 seconds per piece and demonstrated more

continuous movement, whereas Configuration 2 had an average of 9.91 seconds per piece and emphasized greater shoulder flexibility. This finding is valuable for designing ergonomic workstations to enhance efficiency and reduce fatigue.

**Keyword:** Work study, MediaPipe Holistic, Fatigue, Ergonomics, Motion analysis.

## 1. บทนำ

การศึกษาการทำงาน (Work Study) เป็นกระบวนการสำคัญที่ประกอบด้วยการวิเคราะห์วิธีการทำงาน (Method Study) และการวัดผลการทำงาน (Work Measurement) โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์และปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของมนุษย์ รวมถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตและเศรษฐกิจในการดำเนินงาน ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพจากทรัพยากรที่มีอยู่เดิม โดยใช้เงินลงทุนที่ลดลง ในอดีตการศึกษาในสาขาวิชานี้มักถูกเรียกว่า การศึกษาเวลาและการเคลื่อนไหว (Time and Motion Study) [1] ซึ่งใช้เครื่องมือจับเวลาเพื่อบันทึกระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตามวิธีการสังเกตและบันทึกข้อมูลด้วยตนเองนั้นอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาด ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานและการคำนวณเวลามาตรฐาน

ด้วยเหตุนี้ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดยใช้ MediaPipe Holistic เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของการทำงาน งานลักษณะนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการเคลื่อนไหวของร่างกายและเวลาที่ใช้ในแต่ละกิจกรรมย่อยของงาน โดยอาศัยเทคโนโลยี MediaPipe Holistic เข้ามาเป็นหัวใจสำคัญในการประมวลผลข้อมูล ระบบดังกล่าวจะประมวลผลโดยการผสานรวมโมเดลของท่าทางร่างกาย ใบหน้า และมือเข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณเวลามาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้งานวิจัยยังมุ่งเน้นการหาข้อมูลระยะเวลาการทำงานของมือซ้ายและมือขวาในระหว่างการประกอบงาน รวมถึงการเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงสรีระร่างกายให้เหมาะสมขณะปฏิบัติงาน ขอบเขตของการศึกษานี้จะรวมถึงการจัดสร้างห้องทดสอบที่ใช้ MediaPipe Holistic เพื่อบันทึกการเคลื่อนไหวของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] โดยจะใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและวิดีโอด้วย โอเพ่นซีวี (OpenCV) เพื่อตรวจจับจุดสำคัญต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ศีรษะ มือ และแขน เพื่อนำมาวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนที่ของแขนและความเหมาะสมของลักษณะท่าทางขณะปฏิบัติงาน การศึกษานี้คาดว่าจะช่วยปรับปรุงพื้นที่การทำงานให้เหมาะสมกับสรีระของผู้ปฏิบัติงาน และเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์เวลามาตรฐาน ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงขั้นตอนการผลิตที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*2.1 การศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study)*

เป็นระเบียบวิธีที่มุ่งวิเคราะห์และปรับปรุงวิธีการทำงานอย่างเป็นระบบ รวมถึงวัดเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ทฤษฎีนี้ประกอบด้วยการศึกษาการเคลื่อนไหว (Motion Study) เพื่อค้นหาวิธีการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและการวัดเวลา (Work Measurement) เพื่อกำหนดเวลามาตรฐาน เป้าหมายหลักคือการเพิ่มผลผลิต ลดความสูญเปล่า (เช่น เวลาและความพยายาม) และความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน พร้อมทั้งกำหนดมาตรฐานการปฏิบัติงานที่เหมาะสม.

*2.2 การประมวลผลภาพ (Image Processing)*

การใช้คอมพิวเตอร์จัดการและวิเคราะห์ภาพดิจิทัลเพื่อสกัดข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณ เทคนิคนี้ช่วย

ปรับปรุงคุณภาพภาพและเพิ่มความแม่นยำในหลายด้าน เช่น การแพทย์และอุตสาหกรรม

*2.3 Machine Learning (ML)*

ทฤษฎีที่ศึกษาอัลกอริทึมที่ช่วยให้ระบบคอมพิวเตอร์ "เรียนรู้" จากข้อมูลโดยไม่ต้องถูกตั้งโปรแกรมอย่างชัดเจน มันเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองที่สามารถจดจำรูปแบบ ทำนายผลลัพธ์ ตัดสินใจจากข้อมูลที่ได้รับ และปรับปรุงประสิทธิภาพการเรียนรู้เมื่อมีข้อมูลมากขึ้น [3]

*2.4 การคำนวณมุมและองศาของร่างกายสำคัญในแพทย์ กีฬา และวิศวกรรมศาสตร์*

เพื่อเข้าใจการเคลื่อนไหวและกลไกกล้ามเนื้อ จึงจำเป็นจะต้องมีการคำนวณมุมและองศาของร่างกายเทียบกับหลักสรีรศาสตร์ (รูปที่ 1) และนำองศาและมุมที่ได้จากการคำนวณไปตั้งค่าในการออกแบบและสร้างชุดจำลองการศึกษาการทำงาน (สมการที่ 1) โดยองศา (Degree) เป็นหน่วยวัดมุมและสามารถแปลงเป็นเรเดียน (Radian) ได้

$$\text{รัศมี} = \frac{\text{องศา} \times \pi}{180} \qquad (1)$$

การคำนวณมุม เมื่อต้องการคำนวณหามุมระหว่างจุด 2 จุดบนระนาบสองมิติ สามารถใช้สูตรคำนวณมุมระหว่างเวกเตอร์ (Vector) ได้โดยใช้สูตรดังสมการที่ 2

$$\theta = cos^{-1}\left(\frac{y_1^2 - y_1 \times y_2}{y_1\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2}}\right) \qquad (2)$$

*2.5 การวิเคราะห์ท่าทางการทำงานช่วยป้องกันปัญหากล้ามเนื้อและกระดูก*

โดยเฉพาะในงานที่นั่งนานจำเป็นต้องปรับสภาพแวดล้อมการทำงานเพื่อสุขภาพที่ดีขึ้นและลดการบาดเจ็บ [4]

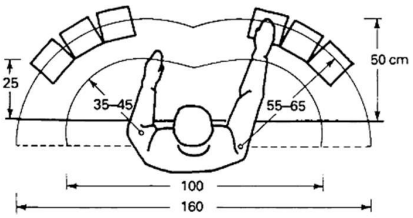
รูปที่ 1 แสดงถึงท่าทางที่ดีต่อสุขภาพตามหลักสรีรศาสตร์ (Ergonomics healthy postures) การวิเคราะห์ท่าทางการทำงานเช่นนี้มีความสำคัญในการป้องกันปัญหากล้ามเนื้อและกระดูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่ต้องนั่งเป็นเวลานาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับสภาพแวดล้อมการทำงานเพื่อสุขภาพที่ดีขึ้นและลดการบาดเจ็บ [5]

รูปที่ 1 ลักษณะท่าทางการทำงานที่เหมาะสม [ 6 ]

*2.6 การออกแบบโซนทำงานควรพิจารณาระยะการเอื้อม*

ตำแหน่งอุปกรณ์ ความสูงที่เหมาะสม และการเข้าถึงสิ่งของที่ใช้บ่อย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสะดวกสบาย

1) พื้นที่ทำงานปกติ คือบริเวณที่คนงานทำงานได้โดยไม่ต้องยืดหรือเอื้อมมาก ช่วยลดความเครียดและความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ [7]




รูปที่ 2 ภาพวงพื้นที่การทำงานของแขนที่สามารถเอื้อมได้มากสุดและน้อยสุด [7]

*2.7 การแปลงข้อมูลโดยใช้ Outliers*

การแปลงข้อมูลช่วยลดอิทธิพลของ Outlier หรือปรับการกระจายตัวให้เข้าสู่ภาวะปกติ เพื่อให้ข้อมูลเหมาะสมกับการวิเคราะห์ทางสถิติมากขึ้น หากมีการผิดพลาดในการจัดการหรือแปลงค่าผิดปกติเหล่านั้น จะ

ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีลักษณะถ้า Outliers ไม่ถูกจัดการให้เหมาะสม เช่น ไม่ตัดออก หรือไม่ได้ใช้การแทนค่าที่เหมาะสม อาจทำให้ข้อมูลมี distribution ที่เบ้ไปด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป ผลลัพธ์ของโมเดล Machine Learning ผิดเพี้ยน ตัวอย่างการแปลงข้อมูลโดยใช้ Outliers เช่น

1. Log Transformation: แปลงข้อมูลที่มีค่าสูงมาก (เช่น รายได้)
2. Square Root Transformation: สำหรับข้อมูลที่มีการกระจายบวก (เช่น จำนวนครั้ง)
3. Winsorization: การจำกัดค่า Outlier ให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด [8]

*2.8 Normalize Data*

Normalization Data (การปรับข้อมูลให้เป็นปกติ) มีความเกี่ยวข้องอย่างมากกับ Machine Learning โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลล่วงหน้า (Pre-processing) ก่อนที่ข้อมูลจะถูกป้อนเข้าสู่แบบจำลอง Machine Learning การปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยการ ปรับข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อลดผลกระทบจากคุณลักษณะที่มีสเกลแตกต่างกัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างโมเดล Machine Learning [9]

*2.9 MediaPipe*

MediaPipe เป็นเฟรมเวิร์กโอเพนซอร์สที่พัฒนาโดย Google ซึ่งออกแบบมาเพื่อรันโมเดล Machine Learning ในแบบเรียลไทม์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสื่อสตรีมมิ่ง เช่น วิดีโอ มีความสามารถในการตรวจจับคุณลักษณะของมนุษย์ที่หลากหลาย เช่น ท่าทาง (Pose), ใบหน้า (Face), และมือ (Hands) โมเดลการตรวจจับท่าทาง (Pose Detection Model) ของ MediaPipe โดยทั่วไปจะให้จุดสำคัญ (landmarks) 33 จุด สำหรับร่างกายมนุษย์ จุดเหล่านี้ครอบคลุมบริเวณสำคัญต่างๆ ของร่างกาย เช่น ไหล่ ข้อศอก สะโพก หัวเข่า และจุดอื่น ซึ่งจะครอบคลุมทุกจุดที่ต้องการเก็บข้อมูลในงานวิจัย [10]

*2.10 K-score*

ระบบการให้คะแนนแบบใหม่เพื่อวัดปริมาณความเสี่ยงต่อความเหนื่อยล้า

1) Rescaling (Min-Max Normalization) คือการปรับข้อมูลให้อยู่ในช่วง [0, 1] เพื่อลดความลำเอียงจากค่าสูงหรือต่ำ โดยใช้สูตรดังสมการที่ 3

$$X' = \frac{x - min(x)}{max(x) - min(x)} \quad (3)$$

เมื่อ $x$ = ค่าข้อมูลดั้งเดิม
$min(x)$ = ค่าต่ำสุดของข้อมูล
$max(x)$ = ค่าสูงสุดของข้อมูล
$X'$ = ค่าข้อมูลหลังการปรับ

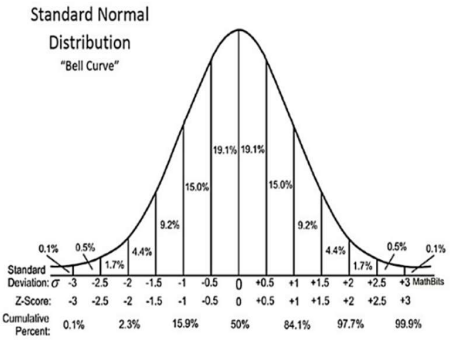
2) Mean Normalization เป็นการปรับข้อมูลให้กระจายรอบจุดศูนย์ (0) เพื่อให้ค่ามีความสมดุลระหว่างบวกและลบ โดยผลลัพธ์จะอยู่ในช่วงประมาณ [-0.5, 0.5] ต่างจาก Min-Max Normalization ที่ใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) แทนค่าต่ำสุด (Min) ในการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 4

$$X' = \frac{x - average(x)}{max(x) - min(x)} \quad (4)$$

เมื่อ $x$ = ค่าข้อมูลดั้งเดิม
$average(x)$ = ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล
$\max(x)$ =ค่าสูงสุดของชุดข้อมูล
$min(x)$ =ค่าต่ำสุดของชุดข้อมูล
$X'$ =ค่าหลังการปรับ

Mean Normalization ช่วยให้ข้อมูลกระจายอย่างสมดุลรอบศูนย์ ทำให้เหมาะกับอัลกอริทึมที่ไวต่อสเกลของข้อมูล เช่น การวิเคราะห์เชิงสถิติและโมเดล Machine Learning บางประเภท

3) Standardization (Z-Score Normalization) (รูปที่ 5) คือ การนำข้อมูล Feature / Column มาปรับให้ Mean = 0 และ Standard Deviation = 1 (Unit Variance) ดังแสดงในสมการที่ 5




รูปที่ 3 ภาพกราฟ Standardization [11]

$$X' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (5)$$

เมื่อ $x$ = ค่าข้อมูลดั้งเดิม

$\bar{x}$ (หรือ mean(x)) = ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในชุดข้อมูล

σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในชุดข้อมูล

$X'$ = ค่าข้อมูลหลังการปรับค่า

อัลกอริทึม Machine Learning หลาย ๆ ตัว จำเป็นต้องมีการให้ปรับข้อมูลก่อนที่จะนำเข้าข้อมูลให้โมเดลใช้เทรน ซึ่งต้องเก็บค่า Mean และ Std ไว้ด้วย เพราะในการทดสอบค่าที่ใช้ควรจะเป็นประเภทเดียวกันกับตอนเทรนในการปรับข้อมูล Validation Set / Test

4) Scale to Unit Length ในกรณีที่ข้อมูลเป็น Vector ชุดข้อมูลเหล่านั้นจะหารด้วย Euclidean Norm เพื่อปรับให้เป็น Unit Vector ดังแสดงในสมการที่ 6

$$X' = \frac{x}{\|x\|} \quad (6)$$

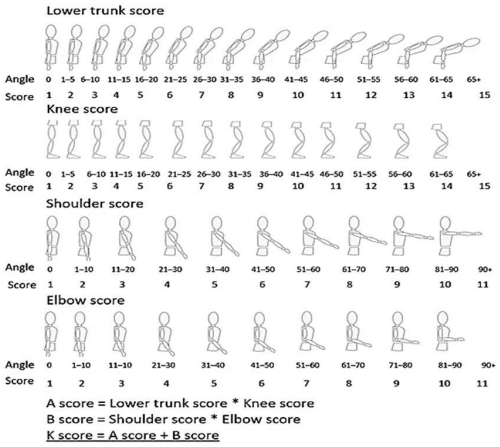
เมื่อ $x$ = เวกเตอร์ที่ต้องการทำให้เป็นเวกเตอร์หน่วย

$\|x\|$ = ความยาว (หรือนอร์ม) ของเวกเตอร์ $\mathbf{X}$

$X'$ = เวกเตอร์หน่วยที่ได้จากการหารเวกเตอร์ $\boldsymbol{x}$ ด้วยความยาวของมันเอง

*2.11 K-score (Kinematic Score)*

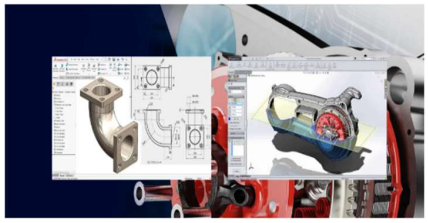
เป็นระบบคะแนนที่ประเมินความเสี่ยงต่อความเหนื่อยล้าและการบาดเจ็บ โดยวัดการเคลื่อนไหวของข้อต่อด้วยอุปกรณ์ IMU ผลลัพธ์ช่วยปรับปรุงสภาพการทำงานเพื่อลดปัญหากล้ามเนื้อและกระดูกในระยะยาว [12] ดังแสดงในรูปที่ 4




รูปที่ 4 สูตรการคำนวณ K-score [13]

*2.11 ซอลิดเวิกส์ (SolidWorks)*

เป็นโปรแกรม CAD สำหรับการออกแบบ 2D และ 3D ช่วยจำลองชิ้นงานและวิเคราะห์ความแข็งแรง เปิดตัวในปี 2536 โดย Jon Hirschtick ปัจจุบันเป็นที่นิยมในด้านการออกแบบเมคคาทรอนิกส์ก่อนผลิต ดังแสดงในรูปที่ 5

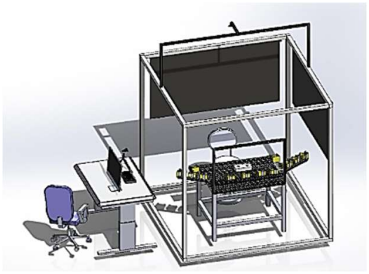


รูปที่ 5 แบบ 3 มิติในโปรแกรม SOLIDWORKS

## 3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ชุดทดลองนี้เน้นการศึกษาการเคลื่อนไหวและสรีระโดยใช้ Machine Learning และ Image Processing ในการประมวลผลภาพ พร้อมติดตั้งกล้อง 3 ตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับการเคลื่อนไหว โดยตำแหน่ง

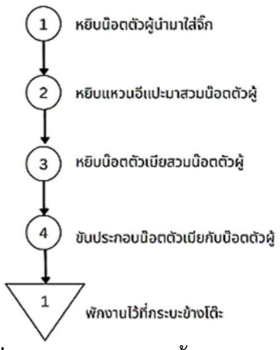
ของกล้องจะถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ 1 เหนือศรีษะผู้ทำการทดสอบ ตำแหน่งที่ 2 ด้านหน้าผู้ทำการทดสอบ ตำแหน่งที่ 3 อยู่ด้านข้างผู้ทำการทดสอบ ซึ่งจะได้มุมภาพดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบจำลองห้องทดลอง

*3.1 กำหนดการทำงานในการทดลอง*

ขั้นตอนที่ทางผู้วิจัยกำหนดเพื่อการทดลองนั้น คือ แผนภูมิการผลิตต่อเนื่องคือการประกอบโบลท์หัวหกเหลี่ยม (Hex Bolt) และใส่จุดพักงาน ดังแสดงในรูปที่ 7

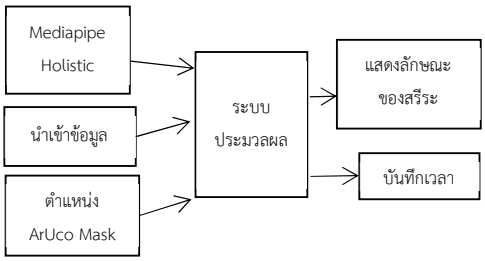



**รูปที่ 7** แผนภูมิการไหลขั้นตอนการทำงาน

*3.2 ระบบทำงานหลักของโปรแกรม*

ระบบวิเคราะห์ภาพจากกล้องขณะปฏิบัติงาน โดยใช้ Machine Learning ผ่าน MediaPipe Holistic เพื่อตรวจจับจุดสำคัญของร่างกายและตำแหน่ง ArUco Marker ก่อนประมวลผลข้อมูลเพื่อแสดงผลขั้นตอนการปฏิบัติงาน

รูปที่ 8 แสดงแผนผังโครงสร้างโดยรวมของระบบโปรแกรมที่ประกอบด้วย MediaPipe Holistic ข้อมูลนำเข้า และตำแหน่ง ArUco Mask ซึ่งทั้งหมดนี้จะถูกส่งไปยังระบบประมวลผล จากนั้นระบบประมวลผลจะแสดงผลคุณสมบัติทางสรีรวิทยาและทำการบันทึกเวลาการทำงาน




รูปที่ 8 โครงสร้างระบบตรวจจับการเคลื่อนไหว

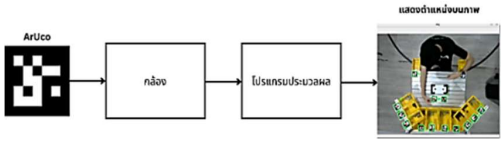
ระบบประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ระบบประมวลผลข้อมูลสำหรับจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลดิบ และระบบ MediaPipe Holistic ที่ตรวจจับจุดข้อต่อของร่างกายจากภาพเว็บแคมเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและท่าทาง

จากรูปที่ 9 แสดงถึงหน้าจอการทำงานหลักที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการบันทึกข้อมูล การเลือกแหล่งที่มาของภาพ และการตรวจสอบภาพจากมุมกล้องต่างๆ ในขณะที่ระบบทำการตรวจจับและประมวลผลข้อมูลร่างกายด้วย MediaPipe

รูปที่ 9 ระบบตรวจจับร่างกายด้วย MediaPipe

ArUco Marker เป็นเครื่องมือโอเพนซอร์สที่ใช้กล้องเว็บแคมและ OpenCV เพื่อตรวจจับและติดตามตำแหน่งชิ้นส่วนในพื้นที่สองมิติในการหยิบจับและประกอบ [14]

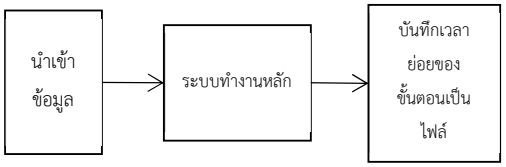
รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างการทำงานจริงของระบบที่ตรวจจับร่างกายบุคคล โดยมีการซ้อนทับเส้นโครงร่างกระดูกและจุดสำคัญของร่างกายที่ MediaPipe ตรวจจับได้ พร้อมทั้งแสดงค่ามุมของข้อต่อต่าง ๆ เช่น มุมไหล่ มุมข้อศอก และมุมสะโพก รวมถึงแสดงเวลาทำงานของมือซ้ายและมือขวาแบบเรียลไทม์.




รูปที่ 10 ระบบแสดงตำแหน่ง ArUco Masker

ระบบนำเข้าข้อมูลขั้นตอนการทำงานช่วยตรวจสอบและบันทึกเวลาของแต่ละขั้นตอน หากการทำงานถูกต้องตามที่กำหนด ระบบจะบันทึกและแปลงข้อมูลเป็นไฟล์ *.CSV

รูปที่ 11 แสดงหน้าต่างการตั้งค่าจุดจับเวลา ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกแขน (ซ้ายหรือขวา) และขั้นตอนการทำงานที่ต้องการกำหนดจุดจับเวลา พร้อมทั้งแสดงตำแหน่งพิกัดแกน X Y Z ของจุดนั้น ๆ และมีปุ่มสำหรับตั้งค่า บันทึกตำแหน่ง หรือยกเลิกการตั้งค่า.




รูปที่ 11 ระบบนำเข้าข้อมูลเพื่อระบุขั้นตอนการทำงาน

ระบบการทำงานหลักเป็นซอฟต์แวร์ที่ประมวลผลข้อมูลจาก MediaPipe Holistic ตรวจจับร่างกาย คำนวณองศาการเคลื่อนไหว จับเวลา และบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์ *.CSV พร้อมแสดงผลแบบเรียลไทม์

1.ส่วนรับข้อมูลจากผู้ใช้ ซึ่งผู้ใช้ต้องทำการระบุลำดับขั้นตอนการทำงานและคำสั่งให้โปรแกรมทำงาน

จากรูปที่ 12 หน้าต่างโปรแกรมของผู้ใช้งานประกอบด้วย 8 ส่วนหลัก ได้แก่

ส่วนที่ 1 ช่องกรองข้อมูลสำหรับใส่ชื่อผู้ทดสอบและขั้นตอนการทำงานของมือซ้ายและมือขวา

ส่วนที่ 2 ปุ่ม OK สำหรับยืนยันข้อมูล

ส่วนที่ 3 ปุ่มตัวเลือกสำหรับเลือกแหล่งข้อมูลจากกล้องหรือวิดีโอ

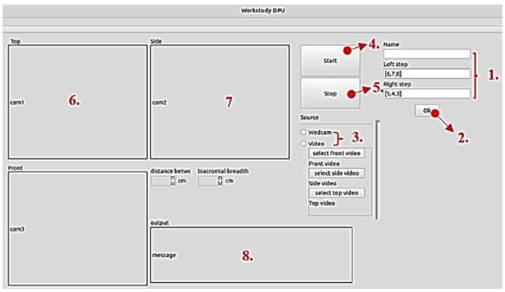
ส่วนที่ 4 ปุ่ม Start เพื่อเริ่มการทำงาน

ส่วนที่ 5 ปุ่ม Stop เพื่อหยุดการบันทึกและบันทึกไฟล์ข้อมูลเป็น *.CSV

ส่วนที่ 6 หน้าต่างภาพจากกล้องมุมมอง Bird’s Eye View

ส่วนที่ 7 หน้าต่างภาพจากกล้องมุมมอง Eye View

ส่วนที่ 8 หน้าต่าง Debug แสดงข้อผิดพลาดของโปรแกรม




รูปที่ 12 หน้าต่างโปรแกรม

2.การตรวจจับร่างกายและตำแหน่งของ ArUco Masker ดำเนินการระหว่างการปฏิบัติงานของผู้เข้าทดสอบ โดยใช้ MediaPipe Holistic เพื่อระบุตำแหน่ง X, Y ของส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น หัวไหล่ ข้อศอก ข้อมือ และสะโพกทั้งสองข้าง ระบบจะรวมโมเดลท่าทางของร่างกาย ใบหน้า และมือเข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลามาตรฐานของผู้ปฏิบัติงาน กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการใช้ภาพจากเว็บแคมเพื่อจับการเคลื่อนไหว ซึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อกำหนดมุมการเคลื่อนไหวและติดตามระยะเวลาของงานเฉพาะ เช่น เวลาทำงานของมือซ้ายและมือขวาในระหว่างการประกอบชิ้นงาน ข้อมูลที่รวบรวมได้ รวมถึงเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนย่อย จะถูกบันทึกเป็นไฟล์ CSV และใช้ OpenCV เพื่อระบุตำแหน่ง

X, Y ของ ArUco Masker แต่ละตัวที่มีเลขประจำตัวเฉพาะ

3.การตรวจสอบขั้นตอนการปฏิบัติงานและวิเคราะห์สรีระที่ไม่เหมาะสม [12] ใช้เซ็นเซอร์บนกระบะบรรจุชิ้นส่วนเพื่อส่งค่าพิกัด X, Y และคำนวณระยะห่างระหว่างข้อมือกับ ArUco Masker บนจิ๊กประกอบงาน โดยใช้โค้ดในการวิเคราะห์ตำแหน่งและระยะห่างอย่างแม่นยำ [15] ดังรูปที่ 13

```python
def findDistance(p1, p2):
    x1, y1 = p1
    x2, y2 = p2

    dist = int(math.sqrt(((x2-x1)**2 + (y2-y1)**2)))

    return dist
```

รูปที่ 13 ฟังก์ชั่นโปรแกรมคำนวณระยะห่างระหว่างจุด
x1, y1 หมายถึงพิกัด (x,y) ของข้อมือ
x2, y2 หมายถึงพิกัด (x,y) ของArUco
dist หมายถึงคำนวณระยะห่างระหว่างจุดสองจุด

จากรูปที่ 14 และ รูปที่ 15 การใช้งานฟังก์ชั่นการคำนวณหาองศาจะต่างกันตรงที่ กรณี 2 จุดใช้ในกรณีที่ไม่มีจุดที่ 3 อ้างอิง เช่น องศาการก้มหน้าจะมีจุดอ้างอิงที่ต้นคอและหู กรณี 3 จุด จะมีองศาการก้มหน้าเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ต้องมีการอ้างอิงต้นคอ และหู เป็นต้น

```python
def findAngle(p1,p2):

    x1, y1 = p1
    x2, y2 = p2

    theta = math.acos(y2-y1)*(-y1) / (math.sqrt((x2 - x1)**2 + (y2 - y1)**2) * y

    degree = int(((180 * math.pi) + theta))
```

รูปที่ 14 ฟังก์ชั่นการคำนวณหาองศาโดยใช้ 2 จุด
x1, y1 หมายถึงตำแหน่งของจุดที่1
x2, y2 หมายถึงตำแหน่งของจุดที่ 2
theta หมายถึงองศาที่คำนวณได้เป็นเรเดียน
degree หมายถึงแปลงองศาเรดียนเป็นดีกรี

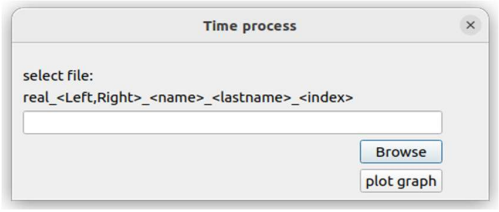
```python
def findAngle_threepoint(p1, p2, p3):

    x1, y1 = p1
    x2, y2 = p2
    x3, y3 = p3

    angle = int(math.degrees(math.atan2(y3 - y2, x3 - x2) - math.atan2(y1 - y2, x1
```

รูปที่ 15 ฟังก์ชั่นการคำนวณหาองศาโดยใช้ 3 จุด
x1, y1 หมายถึงตำแหน่ง x, y ของจุดที่ 1
x2, y2 หมายถึงตำแหน่ง x, y ของจุดที่ 2
x3, y3 หมายถึงตำแหน่ง x, y ของจุดที่ 3
angle หมายถึงองศาที่คำนวณ

4. เครื่องมือแสดงกราฟและการคำนวณเวลามาตรฐานช่วยวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบ ฟังก์ชันหลักของเครื่องมือในระบบที่ออกแบบมาเพื่อช่วยวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบได้อย่างแม่นยำ โดยเครื่องมือนี้จะแสดงผลโดยแสดงกราฟเส้นของเวลาซึ่งสร้างขึ้นจากไฟล์ข้อมูล CSV เหล่านี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องมือโปรแกรมเฉพาะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเลือกไฟล์ CSV ที่สร้างขึ้นและพล็อตเป็นกราฟเส้นได้ กราฟเหล่านี้จะแสดงค่ามาตรฐานข้อมูล (Normalized data values) บนแกน Y เทียบกับลำดับชิ้นงาน (Part number) บนแกน X การแสดงภาพนี้ช่วยในการวิเคราะห์แนวโน้มของเวลาการปฏิบัติงานและคำนวณเวลามาตรฐานได้อย่างแม่นยำ กราฟยังช่วยระบุช่วงเวลาที่เกิดความเมื่อยล้าได้อีกด้วย โดยแนวโน้มที่สูงขึ้นหรือค่าที่สูงกว่า 0 บ่งชี้ถึงเวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเมื่อยล้า ในขณะที่แนวโน้มที่ลดลงหรือค่าที่ต่ำกว่า 0 บ่งบอกถึงช่วงเวลาของการพักผ่อน

การใช้ของหน้าต่างโปรแกรมสร้างกราฟเส้นของเวลา (รูปที่ 16) ประกอบงานแต่ละชิ้นและเวลาขั้นตอนย่อยมีดังต่อไปนี้

1. คลิกที่ปุ่ม Browse เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูลที่ต้องการ
2. คลิกที่ปุ่ม plot graph เพื่อโปรแกรมประมวลผลและแสดงกราฟเส้น

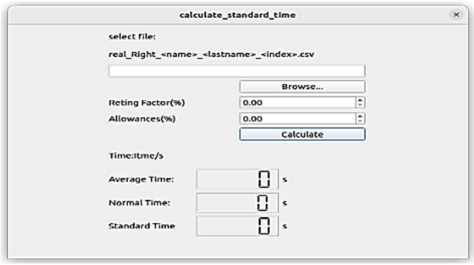



รูปที่ 16 หน้าต่างโปรแกรมสร้างกราฟเส้นของเวลาประกอบงานแต่ละชิ้นและเวลาขั้นตอนย่อย

การใช้ของหน้าต่างโปรแกรมคำนวณเวลาเฉลี่ย เวลามาตรฐาน (รูปที่ 17) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. คลิกที่ปุ่ม Browse เพื่อเลือกไฟล์ข้อมูล
2. กรองข้อมูลในช่อง Reting Factor(%) และ Allowances(%) ตามต้องการ
3. คลิกที่ปุ่ม Calculate เพื่อให้โปรแกรมคำนวณ

ผลลัพธ์จะแสดงที่ Average Time, Normal Time, และ Standard Time

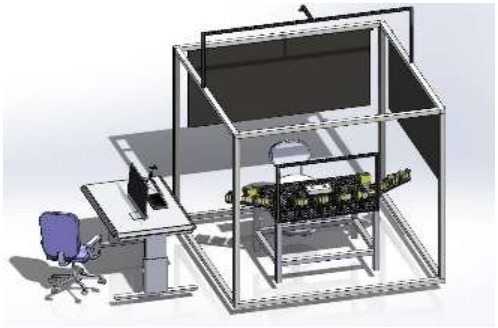



รูปที่ 17 หน้าต่างคำนวณเวลาเฉลี่ย เวลามาตรฐาน

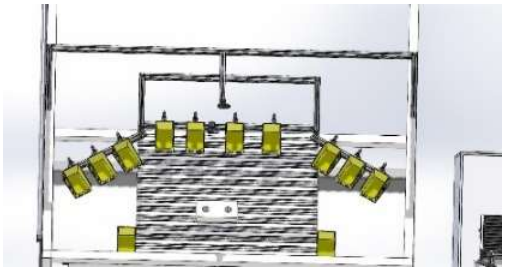
*3.3 วิธีการเก็บข้อมูล*

ห้องทดลองมีโครงสร้างกล่องสี่เหลี่ยม (รูปที่ 18) ขนาด 220x200 เซนติเมตร ออกแบบให้ติดตั้งอุปกรณ์และปิดกั้นสิ่งรบกวน มีโต๊ะและเก้าอี้ปรับระดับได้ พร้อมกล่องใส่ชิ้นส่วนโค้งเพื่อลดระยะการหยิบจับอย่างมีประสิทธิภาพ

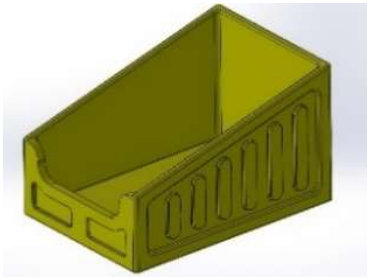
การออกแบบโครงสร้างห้องทดลองใช้โปรแกรม SolidWorks โดยดัดแปลงแบบโต๊ะ เก้าอี้ และโครงสร้างอลูมิเนียม พร้อมใช้ฟังก์ชัน Assembly และ MATE ในการประกอบส่วนต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 19 แสดงโต๊ะทำงานที่ติดตั้งกระบะใส่ชิ้นส่วนสำหรับการทดสอบ โดยกระบะด้านข้างสามารถปรับหมุนโค้งได้ และรูปที่ 20 แสดงกระบะชิ้นส่วนประกอบทำจากพลาสติกเกรดโรงงาน ใช้สำหรับเก็บอะไหล่เล็ก ๆ



รูปที่ 18 ห้องทดลองการศึกษาการทำงาน



รูปที่ 19 รูปโต๊ะทำงาน



รูปที่ 20 รูปกระบะชิ้นส่วนประกอบ

รูปที่ 21 แสดงกล้อง Logitech ที่ใช้จับภาพและส่งไปยัง MINIPC สำหรับประมวลผลการทำงานของแขนทั้งสองข้าง

รูปที่ 21 กล้อง

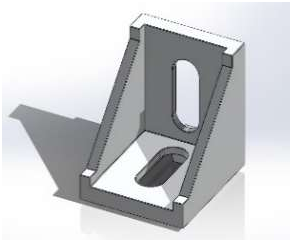
รูปที่ 22 แสดงเก้าอี้สำหรับผู้เข้าทดสอบที่สามารถปรับระดับได้ตามสรีระผู้เข้าทดสอบเพื่อให้ได้ท่าทางที่เหมาะสม

รูปที่ 22 เก้าอี้

รูปที่ 23 แสดงข้อต่อพับได้ข้อต่อแบบพับได้จะใช้สำหรับต่ออลูมิเนียมที่ต้องการให้สามารถพับได้

รูปที่ 23 ข้อต่อพับได้

รูปที่ 24 แสดงฉากยึดใช้สำหรับยึดอลูมิเนียม สำหรับยึดอลูมิเนียม (รูปที่ 25) เข้าด้วยกัน โดยใช้น็อต M5x10 ตัวยึดโปรไฟล์



รูปที่ 24 ฉาก

รูปที่ 25 อลูมิเนียมโปรไฟล์ ขนาด 30x60 มม.

**4. ผลการวิจัยและอภิปราผล**

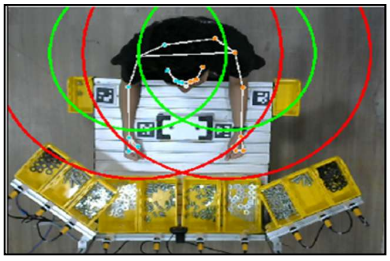
การทดสอบนี้บันทึกเวลาทำงานและองศาการเคลื่อนไหวของร่างกาย (ตารางที่ 1) โดยมี 2 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 ใช้กระบะบรรจุชิ้นส่วนห่าง 42 เซนติเมตร. จากขอบโต๊ะ และเก้าอี้ไม้สูง 62.8 เซนติเมตร รูปแบบที่ 2 ใช้กระบะห่าง 27.5 เซนติเมตร และเก้าอี้พนักพิงสูง 54.8 เซนติเมตร การทดสอบแบ่งเป็น 2 ช่วง: ช่วงที่ 1 วัดเวลามาตรฐานในการประกอบชิ้นงาน 2 ชั่วโมง; ช่วงที่ 2 กำหนดให้ประกอบ 729 ชิ้นในรูปแบบที่ 1 และ 727 ชิ้นในรูปแบบที่ 2 โดยทดลองกับผู้ทดสอบ 2 คนเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงาน

ตารางที่ 1 แบบบันทึกข้อมูลการทดสอบ

| ชิ้นที่ | เวลาขั้นตอนย่อย (วินาที) | | | | รวมเวลา (วินาที) | องศาข้อต่อ(ดีกรี) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | ไหล่ | ข้อศอก | ลำตัว | คอ |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| เวลาทั้งหมดในการทำงาน (วินาที) | | | | | | | | | |

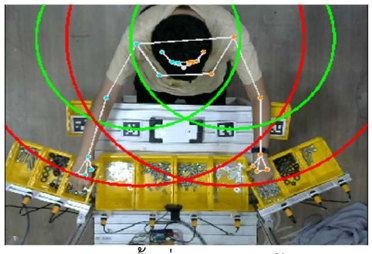
*4.1 สรีระร่างกายในการปฏิบัติงาน*

1) ในการทดสอบรูปแบบที่ 1 ใช้กล้อง 2 ตัวเพื่อตรวจสอบการทำงาน โดยกระบะบรรจุชิ้นส่วนห่างจากขอบโต๊ะ 42 เซนติเมตร ผู้ทดสอบต้องเอื้อมมือเกินระยะที่โปรแกรมคำนวณไว้ ซึ่งโปรแกรมแสดงขอบเขตพื้นที่ทำงานใกล้สุดและไกล ดังแสดงในรูปที่ 26 พบว่า ผู้ทดสอบเกิดอาการเมื่อยล้าหลังและบ่าไหล่จากการเอี้ยวตัวหยิบชิ้นส่วนที่ปลายกระบะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับความสูงของกระบะและการออกแบบพื้นที่ทำงานให้เหมาะสม



รูปที่ 26 การคำนวนพื้นที่ทำงานของผู้ทดลอง ครั้งที่ 1
วงกลมสีแดง พื้นที่ทำงานไกลที่สุด
วงกลมสีเขียว พื้นที่ทำงานใกล้ที่สุด

2) การปรับระยะกระบะในรูปแบบที่ 2 ลดระยะระหว่างขอบโต๊ะกับปลายกระบะ ทำให้ผู้ทดสอบเอี้ยวตัวไปข้างหน้าน้อยลง แต่การหยิบชิ้นส่วนจากกระบะเล็กทำให้เกิดอาการปวดต้นแขน เนื่องจากไม่สามารถยืดแขนได้เต็มที่ ส่งผลให้เกิดความเมื่อยล้าหากทำงานเป็นเวลานาน ดังแสดงในรูปที่ 27

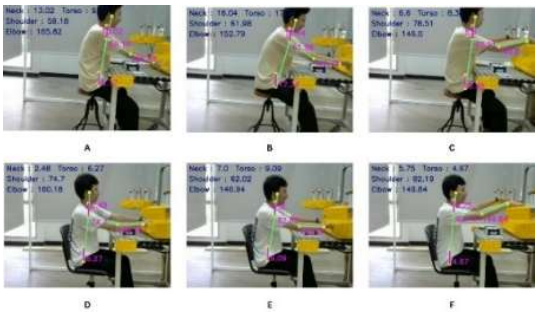


**รูปที่ 27** การคำนวนพื้นที่ทำงานของผู้ทดลอง ครั้งที่ 2

3) การบันทึกภาพสรีระจากกล้องตัวที่ 2 เป็นภาพด้านข้างเพื่อวิเคราะห์องศาข้อต่อของคอ ไหล่ ข้อศอก และสันหลัง ข้อมูลนี้ใช้ประเมินความเสี่ยงของการเกิดความเมื่อยล้าผ่านคะแนนเค (K-score) ตามเกณฑ์

ในการทดสอบรูปแบบที่ 1 คะแนนเค (K-Score) ของผู้ทดลองคนที่ 1 คือ [42, 53, 80] และคนที่ 2 คือ [41, 51, 73] ขณะที่รูปแบบที่ 2 คะแนนเคของผู้ทดลองคนที่ 1 เพิ่มขึ้นเป็น [44, 63, 90] และคนที่ 2 เป็น [55, 68, 84] ซึ่งแสดงว่ารูปแบบที่ 2 ทำให้เกิดความเมื่อยล้ามากกว่ารูปแบบที่ 1

จากรูปที่ 28 รูปแบบที่ 1 ช่วงการเคลื่อนไหวของไหล่อยู่ระหว่าง 59.18° ถึง 78.51° ข้อศอกลดจาก 165.82° เป็น 146° ในขณะที่รูปแบบที่ 2 มีช่วงไหล่สูงสุดที่ 97.19° ข้อศอกเพิ่มเป็น 149.84° แสดงว่ารูปแบบที่ 2 เน้นความยืดหยุ่นของไหล่มากกว่าประมาณ 14.64% ขณะที่รูปแบบที่ 1 มีการเคลื่อนไหวที่ต่อเนื่องและควบคุมมากกว่า



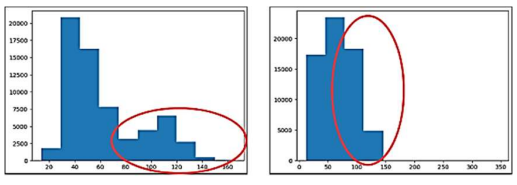
รูปที่ 28 ขั้นตอนการทำงานด้านข้างของผู้ทดสอบคนที่ 2

จากตารางที่ 2 การคำนวณคะแนน K-score อ้างอิงจากค่าเฉลี่ยองศาของไหล่ ข้อศอก ลำตัว และคอ โดยองศาที่สูงขึ้นจะได้คะแนนมากขึ้น เช่น ไหล่ที่องศาสูงสะท้อนถึงการใช้กล้ามเนื้อมาก การทดสอบพบว่ารูปแบบที่ 2 มีคะแนนสูงกว่ารูปแบบที่ 1 ซึ่งบ่งบอกถึงความเสี่ยงต่อความเมื่อยล้ามากกว่า เนื่องจากการใช้องศาไหล่ที่สูงทำให้กล้ามเนื้อต้นแขนเกร็งมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเมื่อยล้าเร็วกว่ารูปแบบที่ 1

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยองศาในการทดสอบรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 โดยหน่วยองศาที่ใช้คือ ดีกรี

| รูปแบบที่ 1 | | | | | รูปแบบที่ 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| คนที่ | ไหล่ | ข้อศอก | ลำตัว | คอ | คนที่ | ไหล่ | ข้อศอก | ลำตัว | คอ |
| 1 | 16.52° | 88.95° | 4.31° | 44.51° | 1 | 32.05° | 84.10° | 3.92° | 36.08° |
| 2 | 13.37° | 83.92° | 6.48° | 40.53° | 2 | 36.51° | 91.68° | 3.09° | 33.69° |

จากแผนภูมิฮิสโตแกรมในรูปที่ 29 แสดงส่วน A (รูปแบบที่ 1): แผนภูมิแสดงให้เห็นว่าการสะสมของคะแนนเคที่เกิน 100 คะแนนมีจำนวนน้อยกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าผู้ทดสอบมีท่าทางการทำงานที่เหมาะสมกว่าและมีความเสี่ยงต่อความเมื่อยล้าในระดับต่ำถึงปานกลางเป็นส่วนใหญ่ ส่วน B (รูปแบบที่ 2): แผนภูมิแสดงให้เห็นว่ามีคะแนนเคที่เกิน 100 คะแนนจำนวนมาก และการกระจายตัวของคะแนนเคในรูปแบบที่ 2 มีช่วงที่แคบกว่าหรือมีการกระจุกตัวของคะแนนสูงกว่าในบางช่วง ซึ่งยืนยันว่ารูปแบบการทำงานที่ 2 ส่งผลให้ผู้ทดสอบเกิดความเมื่อยล้าได้เร็วกว่ารูปแบบที่ 1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการใช้องศาไหล่ที่สูงขึ้นซึ่งทำให้กล้ามเนื้อต้นแขนเกร็งมากขึ้น แผนภูมิฮิสโตแกรมนี้แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของระดับความเมื่อยล้าที่เกิดขึ้นในผู้ทดสอบคนที่ 1 ระหว่างรูปแบบการทำงานทั้งสอง โดยรูปแบบที่ 2 มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดความเมื่อยล้าสะสมมากกว่ารูปแบบที่ 1




รูปที่ 29 แผนภูมิฮิสโตแกรมคะแนนเคของผู้ทดสอบคนที่ 1

A คือรูปแบบที่ 1

B คือรูปแบบที่ 2

แกน X คือคะแนนเค

แกน Y คือจำนวนสะสมของช่วงคะแนนเค

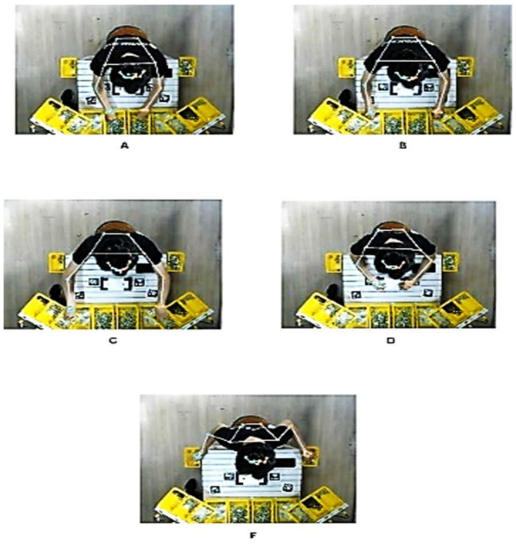
*4.2 เวลามาตรฐาน*

จากตารางที่ 3 การทดสอบช่วงที่ 1 เพื่อหาเวลามาตรฐานในการปฏิบัติงานภายใน 2 ชั่วโมง โดยมีเวลาเผื่อ 15% สำหรับพักและใช้ประสิทธิภาพการทำงาน 60% ผลการทดสอบพบว่า ผู้ทดสอบคนที่ 1 ผลิตงานได้ 1,032 ชิ้น และ 1,011 ชิ้นในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนผู้ทดสอบคนที่ 2 ผลิตได้ 899 ชิ้น และ 870 ชิ้น แสดงให้เห็นประสิทธิภาพการทำงานที่แตกต่างกันในแต่ละรูปแบบ

**ตารางที่ 3** จำนวนชิ้นงานที่ทดสอบสามารถทำได้ในเวลา

| คนที่ | รูปแบบที่ 1 (ชิ้น) | รูปแบบที่ 2 (ชิ้น) |
|---|---|---|
| 1 | 1,032 | 1,011 |
| 2 | 899 | 870 |

รูปที่ 30 แสดงขั้นตอนการทำงานดังนี้ A คือการหยิบน็อตตัวผู้, B หยิบแหวนอีแปะ, C หยิบน็อตตัวเมีย, D ประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน, และ F นำชิ้นงานที่เสร็จแล้วใส่กระบะข้างโต๊ะประกอบงาน ทั้งรูปแบบที่ 1 และ 2




รูปที่ 30 แสดงขั้นตอนการทำงานจากภาพด้านบน

ตารางที่ 4 ผู้ทดสอบทั้งสองผลิตชิ้นงานได้เร็วกว่ามาตรฐาน โดยผู้ทดสอบคนที่ 1 ทำได้ 1,038 ชิ้น (142%) และ 1,050 ชิ้น (144%) ในรูปแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนผู้ทดสอบคนที่ 2 ทำได้ 843 ชิ้น (115%) และ 1,005 ชิ้น (138%) แสดงว่ามีประสิทธิภาพการผลิตสูงกว่ามาตรฐาน

ตารางที่ 4 วิเคราะห์เวลามาตรฐานในการประกอบชิ้นงานของช่วงที่ 1 (หน่วยเป็นวินาที)

| รูปแบบที่ 1 | | | | | รูปแบบที่ 2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| แกน | ปกติ | ปกติ | 15% | ปกติ | แกน | ปกติ | ปกติ | 15% | ปกติ |
| ลำ. | เวลาเฉลี่ย | เบี่ยงเบน | เวลาเฉลี่ย | เวลาเฉลี่ย | ลำ. | เวลาเฉลี่ย | เบี่ยงเบน | เวลาเฉลี่ย | เวลาเฉลี่ย |
| 1 | 13.5 | 8.1 | 1.22 | 9.31 | 1 | 13.09 | 7.85 | 1.17 | 9.03 |
| 2 | 15.17 | 9.1 | 1.37 | 10.47 | 2 | 15.63 | 9.38 | 1.41 | 10.78 |
| รวม เฉลี่ย | 14.34 | 8.6 | 1.295 | 9.89 | รวม เฉลี่ย | 14.30 | 8.62 | 1.29 | 9.91 |

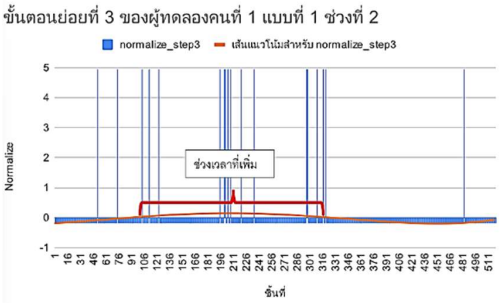
*4.3 เวลางานย่อยที่เกิดความเมื่อยล้า*

การทำงานต่อเนื่องนาน 2 ชั่วโมงในลักษณะงานซ้ำๆ มีโอกาสทำให้เกิดความเมื่อยล้า โดยเฉพาะในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งต้องใช้องศาการเคลื่อนไหวของไหล่และข้อศอกมาก ดังที่แสดงในรูปที่ 31

รูปที่ 31 ภาพการปฏิบัติย่อยขั้นตอนที่ 3

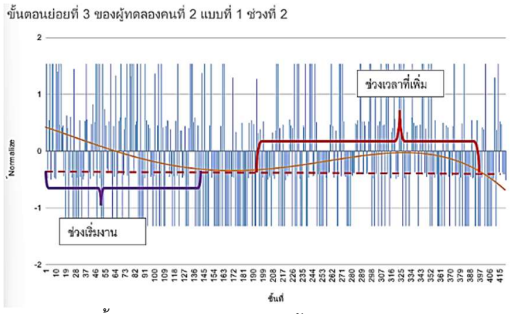
รูปที่ 31 แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนย่อยที่ 3 ใช้องศาการเคลื่อนไหวมากที่สุด เนื่องจากหยิบน็อตตัวเมียจากกระบะสูง มีคะแนนเคสูงสุด การวิเคราะห์ความเมื่อยล้าจะปรับค่าผิดปกติด้วย IQR และ Normalize ข้อมูลโดยใช้สมการพหุนามยกกำลัง 4 ค่ามาตรฐานที่ 0 แสดงเวลาในระดับปกติ ขณะที่ค่ามากกว่า 1 แสดงว่าใช้เวลาเกินปกติ

จากรูปที่ 32 - 33 ผู้ทดสอบคนที่ 1 ใช้เวลาเพิ่มขึ้นจากชิ้นที่ 106 ถึงสูงสุดที่ 211 ก่อนลดลงที่ชิ้นที่ 316 แสดงถึงความเมื่อยล้า ส่วนผู้ทดสอบคนที่ 2 เริ่มใช้เวลามากขึ้นที่ชิ้นที่ 199 สูงสุดชิ้นที่ 334 ก่อนลดลงจนถึงชิ้นที่ 388 โดยช่วงแรกใช้เวลานานกว่าปกติ แต่หลังจากนั้นต่ำกว่าเฉลี่ย




แกน X ลำดับชิ้นงาน แกน Y ค่ามาตรฐานข้อมูล (Normalize)

รูปที่ 32 ขั้นตอนย่อยที่ 3 ของผู้ทดสอบคนที่ 1 รูปแบบที่ 1 ช่วงที่ 2

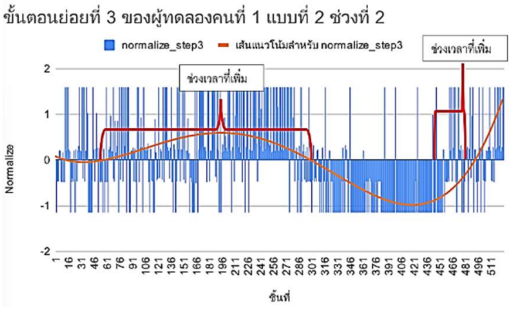



แกน X ลำดับชิ้นงาน แกน Y ค่ามาตรฐานข้อมูล (Normalize)

รูปที่ 33 ขั้นตอนย่อยที่ 3 ของผู้ทดสอบคนที่ 2 รูปแบบที่ 1 ช่วงที่ 2

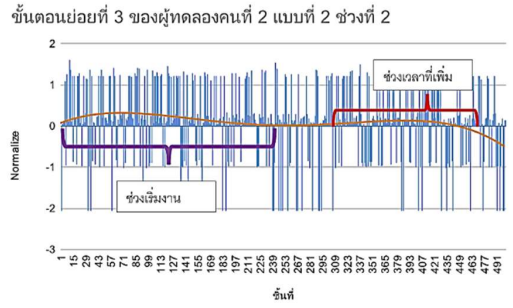
จากรูปที่ 34 ในการทดสอบรูปแบบที่ 2 ผู้ทดสอบคนที่ 1 ใช้เวลาเพิ่มขึ้น 2 ช่วง คือชิ้นที่ 61-196 และชิ้นที่ 496 เป็นต้นไป การใช้องศาไหล่สูงในขั้นตอนย่อยที่ 3 ทำให้เมื่อยล้าง่ายกว่าในรูปแบบที่ 1 เส้นแนวโน้มที่สูงกว่าบ่งชี้ถึงผลกระทบที่มากขึ้น แต่เมื่อหยุดพัก เวลาที่ใช้ลดลงอย่างต่อเนื่อง จากรูปที่ 35 ในการทดสอบรูปแบบที่ 2 ผู้ทดลองคนที่ 2 แสดงแนวโน้มเริ่มขึ้นที่ชิ้นที่ 295 และ

สูงสุดที่ชิ้นที่ 393 ก่อนจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงชิ้นที่ 435 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าช่วงเริ่มงานในรูปแบบที่ 2 ใช้เวลานานกว่าและสูงกว่ารูปแบบที่ 1 เส้นแนวโน้มลดลงจนเข้าใกล้ 0 ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีกครั้ง แสดงถึงสัญญาณความล้าที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนั้น




แกน X ลำดับชิ้นงาน แกน Y ค่ามาตรฐานข้อมูล (Normalize)

รูปที่ 34 ขั้นตอนย่อยที่ 3 ของผู้ทดสอบคนที่ 1 รูปแบบที่ 2 ช่วงที่ 2




แกน X ลำดับชิ้นงาน แกน Y ค่ามาตรฐานข้อมูล (Normalize)

รูปที่ 35 ขั้นตอนย่อยที่ 3 ของผู้ทดสอบคนที่ 2 รูปแบบที่ 2 ช่วงที่ 2

แนวโน้มแสดงให้เห็นว่าเวลาทำงานที่เกินค่าเฉลี่ยบ่งบอกถึงความเมื่อยล้า การลดลงของแนวโน้มสะท้อนถึงการพักของผู้ทดสอบ เช่น การยืดกล้ามเนื้อหรือดื่มน้ำ

จากกราฟที่แสดงผู้ทดสอบคนที่ 1 ในรูปแบบที่ 2 มีแนวโน้มเวลาเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในรูปแบบที่ 1 ขณะที่ผู้ทดสอบคนที่ 2 ในรูปแบบที่ 2 กลับมีแนวโน้มเวลาที่ช้ากว่าในรูปแบบที่ 1 เนื่องจากช่วงเริ่มงานที่นาน ซึ่งทำให้ผู้ทดสอบคนที่ 2 ต้องหยุดพักบ่อยครั้ง

## 5. สรุปผล

ในการดำเนินงานที่ผ่านมาได้ออกแบบและพัฒนาชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดย MediaPipe Holistic เพื่อเก็บข้อมูลเรียลไทม์สำหรับวิเคราะห์การปฏิบัติงานและหามาตรฐานเวลา ผลการทดสอบพบว่ารูปแบบที่ 1 ช่วยลดอาการปวดเมื่อยล้าได้ดีกว่ารูปแบบที่ 2 เนื่องจากกระบะบรรจุชิ้นส่วนอยู่ใกล้ ลดการเอี้ยวตัว แต่ทั้งสองรูปแบบยังมีอาการปวดบ่า ไหล่ และแขนเมื่อทำงานต่อเนื่อง เมื่อตรวจสอบเวลามาตรฐานพบว่ารูปแบบที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 9.89 วินาที/ชิ้น และรูปแบบที่ 2 มีค่าเฉลี่ย 9.91 วินาที/ชิ้น โปรแกรมช่วยแสดงผลเวลาเฉลี่ย เวลาปกติ และเวลามาตรฐาน พร้อมให้ผู้ใช้กำหนดเวลาเผื่อได้เอง นอกจากนี้ การวิเคราะห์องศาการเคลื่อนไหวจากขั้นตอนที่ 3 ซึ่งมีการยกแขนมากที่สุด ถูกนำมาสร้างกราฟเส้นแนวโน้มพหุนามยกกำลัง 4 เพื่อระบุช่วงที่เกิดความเมื่อยล้า หากส่วนโค้งของกราฟสูงกว่า 0 แสดงถึงช่วงที่ผู้ทดลองเริ่มเกิดอาการเมื่อยล้า และหากต่ำกว่า 0 บ่งบอกว่าผู้ทดลองมีช่วงพัก เช่น ยืดกล้ามเนื้อ ดื่มน้ำ หรือเข้าห้องน้ำ การวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการออกแบบพื้นที่และรูปแบบการทำงานที่เหมาะสมเพื่อลดความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานโดยรวม และชุดจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการวิเคราะห์และปรับปรุงกระบวนการทำงานให้มีประสิทธิภาพและลดความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บจากการทำงานซ้ำๆ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำงานครั้งนี้ พื้นที่และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการศึกษาและปฏิบัติงานเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การทำงานสำเร็จลุล่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกอย่างดียิ่ง และบริษัทไวด์สเปรด โกรว์ จำกัด ผู้ให้ทุนสนับสนุนในการสร้างชุดจำลอง

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] G. Kanawaty, *Work Study*, 3rd (Revised) ed., trans. by W. Tantasut, C. Mahitthaphonkul, and C. Chansangawet. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University Press, 2007.

[2] M. P. N. K. Rajapaksha, G. G. T. D. Rathnayake and H. M. C. K. Herath, "Skeleton Detection Using MediaPipe as a Tool for Musculoskeletal Disorders Analysis," *Int. J. Res. Eng. Appl. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 45–50, 2024.

[3] E. Alpaydin, *Introduction to Machine Learning*, 3rd ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2014.

[4] K. Beltrán Martínez, "Risk assessment for work-related musculoskeletal injury using wearable sensors," M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Alberta, Edmonton, Canada, 2021.

[5] J. Dul and B. Weerdmeester, *Ergonomics for Beginners: A Quick Reference Guide*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.

[6] JORPOR TODAY. (2024). Ergonomics healthy postures [Online]. Available: https://www.jorportoday.com/workplace-ergonomics-benefits/.

[7] S. Pheasant, *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, London, U.K.: Taylor & Francis/CRC Press, 1996.

[8] F. E. Meyers and J. R. Stewart Jr., *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.

[9] V. K. Singh and S. Verma, "Feature Scaling and Normalization in Machine Learning: A Review," *J. Eng. Res. Appl.*, vol. 8, no. 4, pp. 24–29, 2018.

[10] V. Bazarevsky and I. Grishchenko, "On-device, Real-time Body Pose Tracking with MediaPipe BlazePose," *Google Research Blog*, Aug. 2020.

[11] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2021.

[12] K. Beltrán Martinez, M. Nazarahari, and H. Rouhani, "K-score: A novel scoring system to quantify fatigue-related ergonomic risk based on joint angle measurements via wearable inertial measurement units," *Appl. Ergon.*, vol. 104, p. 103804, 2022.

[13] K. M. Lee, M. Nazarahari, and H. Rouhani, "K-score: A novel scoring system to quantify fatigue-related ergonomic risk based on joint angle measurements via wearable inertial measurement units," *Appl. Ergon.*, vol. 100, p. 103657, 2022,

[14] Simtec Institute, "Introducing SOLIDWORKS for industrial designers," *Simtec Blog*, Mar. 14, 2022.

[15] L. Lu, M. Robinson, Y. Tan, K. Goonewardena, X. Guo, I. Mareels, and D. Oetomo, "Effective

Assessments of a Short-Duration Poor Posture on Upper Limb Muscle Fatigue Before Physical Exercise," *Front. Physiol.*, vol. 11, p. 610216, 2020.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 73-86 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ กรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชน จังหวัดจันทบุรี

# Development of a Community-Based Business Model Utilizing Solar Energy and Net Metering: A Case Study of Community Enterprises in Chanthaburi Province, Thailand

กรณ์ปภพ รัตนวิจิตร* อาทิตย์ คำต่าย กฤษณะ จันทสิทธิ์
สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000
Kornpaphop Ruttanawijit* Artit Kamtai Kritsana Chanthasit
Department of Energy Technology, Faculty of Industry Technology,
Rambhai Barni Rajaphat University, Aumpher Muang, Chanthaburi Province, 22000
*Corresponding author Email: kornpaphop.r@rbru.ac.th
(Received: June 1, 2025; Revised: July 30, 2025 ; Accepted: October 16, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนโดยประยุกต์ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ เพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายพลังงานในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจังหวัดจันทบุรี การวิจัยใช้ระเบียบวิธีแบบผสมผสาน ประกอบด้วยการเก็บข้อมูลย้อนหลัง 12 เดือนจากใบแจ้งค่าไฟฟ้าและการสัมภาษณ์เชิงลึกกับกลุ่มเป้าหมายจำนวน 15 กลุ่ม ครอบคลุมพื้นที่เมืองและชนบท ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่ากลุ่มในพื้นที่ชนบทมีต้นทุนต่อหน่วยพลังงานเฉลี่ยสูงถึง 5.20 บาท/หน่วย เทียบกับพื้นที่เมืองที่อยู่ที่ 4.50 บาท/หน่วย เนื่องจากข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐาน การวิเคราะห์เชิงกลุ่มด้วยเทคนิค K-Means Clustering จำแนกกลุ่มวิสาหกิจออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีพฤติกรรมใช้พลังงานต่ำ-ต้นทุนสูง และกลุ่มใช้พลังงานสูง-ต้นทุนสูง เพื่อนำข้อมูลไปออกแบบกลยุทธ์ด้านเทคโนโลยีและพลังงานที่เหมาะสม

โมเดลธุรกิจได้รับการออกแบบโดยใช้กรอบ Business Model Canvas (BMC) ครอบคลุม 9 องค์ประกอบหลัก การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบการวัดพลังงานสุทธิ โดยพบว่าค่าใช้จ่ายอยู่ที่ 2.21 บาท/หน่วย ต่ำกว่าราคาค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ 4.10 บาท/หน่วย และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ประมาณ 13.5% ซึ่งยืนยันถึงความเหมาะสมในการลงทุนและความเป็นไปได้ของการขยายผลโมเดลในชุมชนอื่นที่มีบริบทใกล้เคียง ทั้งนี้ การมีส่วนร่วมของภาคประชาชนจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความยั่งยืนของระบบพลังงานระดับฐานรากในระยะยาว

**คำสำคัญ:** โมเดลธุรกิจ, พลังงานชุมชน, การวัดพลังงานสุทธิ, วิสาหกิจชุมชน, จันทบุรี

**ABSTRACT**

This study aims to design and develop a community energy business model by applying a solar photovoltaic (PV) system with Net Metering to reduce energy expenses among community enterprises in Chanthaburi Province. The research employed a mixed-methods approach, including a twelve-month

retrospective analysis of electricity bills and in-depth interviews with 15 target community groups across both urban and rural areas. Statistical analysis revealed that rural community enterprises had a higher average energy cost of 5.20 THB/kWh compared to 4.50 THB/kWh in urban areas, primarily due to outdated technology and inadequate infrastructure.

Cluster analysis using K-Means classified the enterprises into two groups; Cluster 0 (low energy use with high costs) and Cluster 1 (high energy use with high costs), providing insights for designing tailored energy and technology strategies. The business model was developed using the Business Model Canvas (BMC) framework, covering nine core components. An economic feasibility assessment of the Net Metering system showed a levelized cost of electricity (LCOE) at 2.21 THB/kWh, significantly lower than the regional utility rate of 4.10 THB/kWh. The internal rate of return (IRR) was approximately 13.5%, affirming the investment's viability and its potential scalability to other communities with similar contexts. Importantly, community participation was identified as a key factor for ensuring the long-term sustainability of decentralized energy systems.

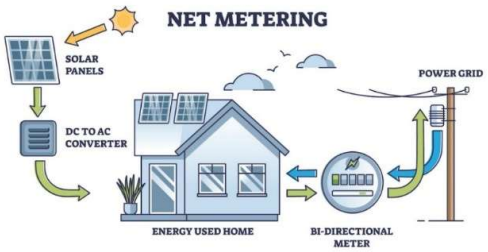
**Keyword:** Business Model, Community Energy, Net Metering, Local Enterprise, Chanthaburi.

## 1. บทนำ

*1.1 บริบทโลกและนโยบายพลังงานไทยต่อการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด*

ในศตวรรษที่ 21 ความมั่นคงทางพลังงานและการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดได้กลายเป็นประเด็นยุทธศาสตร์ในระดับสากล โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเผชิญกับความท้าทายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความไม่แน่นอนของแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล และภาวะความเปราะบางของระบบพลังงานแบบรวมศูนย์ ประเทศไทยในฐานะประเทศกำลังพัฒนาได้ให้ความสำคัญกับการปรับโครงสร้างพลังงาน โดยส่งเสริมการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนอย่างเป็นระบบ สอดคล้องกับแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561–2580 ที่ตั้งเป้าเพิ่มสัดส่วนพลังงานทดแทนให้มีสัดส่วนร้อยละ 35 ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมดภายในปี 2580 ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงและได้รับการส่งเสริมเป็นพิเศษ [1]

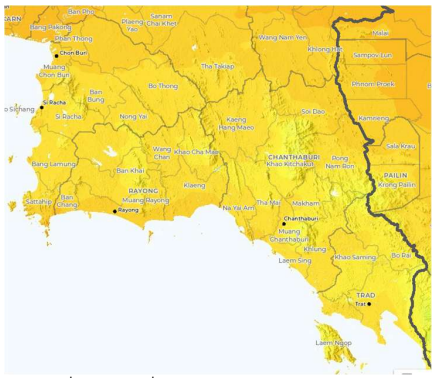
หนึ่งในกลไกเชิงนโยบายที่มีศักยภาพในการขับเคลื่อนการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับฐานราก คือ ระบบการวัดพลังงานสุทธิ (Net Metering) ซึ่งเปิดโอกาสให้ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อใช้เอง และสามารถขายไฟฟ้าส่วนเกินเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าได้ ส่งผลให้เกิดการกระจายอำนาจการผลิตไฟฟ้าในระดับชุมชน และลดภาระต้นทุนพลังงานในระยะยาว กลไกนี้ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบพลังงานแบบกระจาย (Decentralized Energy System) ที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล [2] กรณีศึกษาทั้งในและต่างประเทศพบว่า การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการวัดพลังงานสุทธิ สามารถลดภาระค่าใช้จ่ายพลังงานในระดับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังรูปที่ 1 ตัวอย่างเช่น ในประเทศไทย การศึกษาโดย Tongsopit [3] ระบุว่า การติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์บนหลังคาร่วมกับการวัดพลังงานสุทธิ สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ถึง 30% ในบางกรณี นอกจากนี้ การศึกษาในประเทศโครเอเชียโดย IRENA [4] พบว่าการวัดพลังงานสุทธิเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนในระดับชุมชน




รูปที่ 1 ผังแสดงการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ [2]

*1.2 ศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์และโครงสร้างเศรษฐกิจชุมชนในจังหวัดจันทบุรี*

จังหวัดจันทบุรีตั้งอยู่ในภูมิภาคตะวันออกของประเทศไทย มีศักยภาพทางภูมิอากาศที่เอื้อต่อการพัฒนาโครงการพลังงานแสงอาทิตย์อย่างยิ่ง จากข้อมูลของ Global Solar Atlas [5] พบว่าพื้นที่ดังกล่าวมีค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 5.2–5.5 kWh/m²/day ดังรูปที่ 2 ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของประเทศ อีกทั้งยังมีพื้นที่ว่างบนหลังคาโรงเรือนในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้โดยไม่กระทบต่อพื้นที่เพาะปลูก



รูปที่ 2 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของจังหวัดจันทบุรี [5]

ในเชิงโครงสร้างเศรษฐกิจ จังหวัดจันทบุรีมีวิสาหกิจชุมชนจำนวนมากที่เน้นการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร เช่น ทุเรียน เงาะ และมังคุด ซึ่งกระบวนการผลิตเหล่านี้มีลักษณะพลังงานเข้มข้น (energy-intensive) โดยเฉพาะในส่วนของการแช่เย็น การอบแห้ง และการบรรจุภัณฑ์ที่ต้องใช้ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง การบริหารจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจเหล่านี้ [6]

*1.3 สาเหตุของต้นทุนพลังงานที่สูงในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน*

แม้ว่าประเทศไทยจะมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง แต่ในทางปฏิบัติวิสาหกิจชุมชนขนาดเล็กยังคงเผชิญกับภาระต้นทุนค่าไฟฟ้าสูงอย่างมีนัยสำคัญ สำนักงานสถิติแห่งชาติ [7] รายงานว่ากลุ่มวิสาหกิจชุมชนในภาคเกษตรแปรรูปต้องรับภาระค่าไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 1,500–2,300 บาทต่อเดือน ซึ่งสูงกว่าอัตราเฉลี่ยของภาคครัวเรือนเกือบสองเท่า ความแตกต่างนี้เกิดจากหลายปัจจัย โดยเฉพาะโครงสร้างอัตราค่าไฟแบบอัตราก้าวหน้า (Progressive Rate) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ไม่เหมาะสมกับลักษณะการใช้ไฟฟ้าแบบต่อเนื่องของผู้ประกอบการรายย่อย

อีกทั้งค่าไฟฟ้าภาพรวมของประเทศยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยได้รับแรงกดดันจากต้นทุนเชื้อเพลิงนำเข้า ค่า Ft (Fuel Adjustment Charge) ที่ปรับขึ้นสูงถึง 0.9343 บาทต่อหน่วยในปี 2566 เป็นหลักฐานสะท้อนความผันผวนของต้นทุนพลังงานที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของผู้ประกอบการ [1], [2]

จากการศึกษาภาคสนามในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี พบว่าสาเหตุเชิงโครงสร้างของต้นทุนพลังงานที่สูงในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ได้แก่

1. การใช้พลังงานในช่วงเวลากลางวันอย่างหนาแน่น ซึ่งตรงกับช่วง peak time
2. ขาดระบบบริหารจัดการพลังงานอย่างเป็นระบบ (Energy Management System)
3. ไม่มีการเข้าถึงเทคโนโลยีพลังงานหมุนเวียนในระดับท้องถิ่น

ผลกระทบของต้นทุนพลังงานที่สูงนำไปสู่ภาวะต้นทุนการผลิตรวมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ราคาสินค้าขาด

ความสามารถในการแข่งขันในตลาด ทั้งในระดับภูมิภาคและระดับประเทศ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับผู้ประกอบการขนาดใหญ่ที่สามารถลดต้นทุนเฉลี่ยผ่านกลไก Economy of Scale และการเข้าถึงแหล่งพลังงานต้นทุนต่ำกว่าจากภาครัฐหรือภาคเอกชน [8]

*1.4 ช่องว่างเชิงนโยบายและความจำเป็นในการออกแบบโมเดลพลังงานชุมชน*

การส่งเสริมพลังงานสะอาดในระดับชุมชนยังคงเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ ทั้งในด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสถาบัน งานวิจัยหลายชิ้นสะท้อนว่าการขาดความรู้ด้านเทคโนโลยี การขาดเครื่องมือเชิงวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน และการขาดกลไกสนับสนุนจากรัฐที่ยืดหยุ่นพอ ล้วนเป็นปัจจัยที่ขัดขวางการพัฒนาโครงการพลังงานชุมชนอย่างยั่งยืน [9], [10], [11]

ในบริบทดังกล่าว การพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานที่สอดคล้องกับบริบทของวิสาหกิจชุมชน โดยเฉพาะในพื้นที่ศักยภาพสูงอย่างจังหวัดจันทบุรี ถือเป็นแนวทางที่มีความสำคัญยิ่ง โมเดลดังกล่าวควรครอบคลุมมิติทางเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม โดยเฉพาะการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าแบบการวัดพลังงานสุทธิ ที่มีการจัดการร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในชุมชน และยึดหลักการพลังงานประชาธิปไตย (Energy Democracy) ซึ่งเน้นการกระจายอำนาจในการผลิตและควบคุมพลังงานให้เกิดความยุติธรรม โปร่งใส และยั่งยืนในระยะยาว [10]

## 2. กระบวนการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชน

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนที่ตอบสนองต่อพลวัตของวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี โดยประยุกต์ใช้แนวทางการวิจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative Research) ภายใต้กรอบการวิจัยเชิงกรณีศึกษา (Case Study Research) ซึ่งมีศักยภาพในการเปิดเผยบริบทเชิงลึกของปรากฏการณ์ทางสังคม เศรษฐกิจ และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพลังงานระดับชุมชน [12], [13] เพื่อประมวลและตีความข้อมูลที่ซับซ้อน ผู้วิจัยอ้างอิงแนวคิด Business Model Canvas (BMC) ของ Osterwalder และ Pigneur [14] เป็นกรอบในการออกแบบและวิเคราะห์องค์ประกอบของโมเดลธุรกิจ โดยเน้นการบูรณาการระหว่างคุณค่าที่มอบให้ลูกค้า กลยุทธ์ทางรายได้ และโครงสร้างต้นทุนภายใต้ข้อจำกัดเชิงทรัพยากรของชุมชน

*2.1 กรอบแนวคิด (Conceptual Framework)*

1. การศึกษาปัญหาและสาเหตุของปัญหา ในขั้นตอนแรกของการวิจัย มุ่งวิเคราะห์สาเหตุของภาระค่าใช้จ่ายพลังงานที่สูงในวิสาหกิจชุมชน ผ่าน 3 กิจกรรมหลัก ได้แก่

- การระบุสภาพปัญหา เริ่มจากการกำหนดกลุ่มเป้าหมายที่หลากหลายทั้งในเขตเมืองและชนบท โดยดำเนินการสำรวจข้อมูลการใช้พลังงานย้อนหลัง 12 เดือน รวมถึงการรวบรวมใบแจ้งค่าไฟฟ้า และข้อมูลการดำเนินงานในมิติต่าง ๆ เช่น ปริมาณการผลิต ต้นทุนต่อหน่วย และโครงสร้างกระบวนการผลิต จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีผสมผสานระหว่างการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (statistical trend analysis) และเชิงคุณภาพ (content and theme analysis) เพื่อตีความถึงปัจจัยพื้นฐานที่ก่อให้เกิดต้นทุนพลังงานสูง เช่น ความล้าสมัยของเทคโนโลยี โครงสร้างพื้นฐานไฟฟ้าที่ไม่เหมาะสม หรือการออกแบบธุรกิจที่ไม่สอดรับกับการจัดการพลังงาน [12]

- การระดมสมองเชิงกลุ่ม (Community Storming Workshops) ดำเนินการจัดเวทีแลกเปลี่ยนเชิงลึกกับกลุ่มผู้แทนวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ อาทิ กลุ่มแปรรูปผลไม้ กลุ่มผลิตภัณฑ์ชุมชน รวมถึงผู้นำท้องถิ่นและเจ้าหน้าที่ภาครัฐ เพื่อร่วมกันสะท้อนปัญหา โครงสร้างการใช้พลังงาน และแนวทางการปรับตัว ทั้งในระดับปัจเจก (individual adaptation) และระดับระบบ (systemic constraints) โดยอาศัยเครื่องมือ เช่น แผนผังเหตุและผล (Fishbone Diagram) และ SWOT Analysis เพื่อวิเคราะห์จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรคของแต่ละกลุ่ม [15]

- หาแนวทางการแก้ไขปัญหาเบื้องต้น การวิเคราะห์เชิงอนุมานจากข้อมูลและข้อเสนอแนะที่ได้จากเวทีระดมสมองจะนำไปสู่การออกแบบสมมติฐานเชิงกลยุทธ์ เช่น

การลดโหลดพลังงานในช่วง peak, การใช้ระบบสำรองพลังงาน หรือการเปลี่ยนรูปแบบธุรกิจให้เหมาะสมกับต้นทุนพลังงาน [14]

2. การออกแบบและสร้างโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานทดแทน ขั้นตอนถัดไปของการวิจัย มุ่งสร้างต้นแบบโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนที่เชื่อมโยงกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ โดยแบ่งออกเป็น 5 กิจกรรมที่มีลักษณะเป็นวงจรปฏิบัติการดังรูปที่ 3 ดังนี้

- การสังเคราะห์แนวคิดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทบทวนและวิเคราะห์แนวทางการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจากกรณีศึกษาทั้งในและต่างประเทศ โดยเฉพาะแนวทางการประหยัดพลังงาน การลดโหลด (load shifting) และการใช้เทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ร่วมกับระบบการวัดพลังงานสุทธิ เพื่อใช้เป็นฐานในการออกแบบโมเดล [2], [11]

- การถอดบทเรียนกรณีศึกษาที่ประสบความสำเร็จ รวบรวมกรณีศึกษาของวิสาหกิจชุมชนที่สามารถดำเนินการลดค่าใช้จ่ายพลังงานหรือเปลี่ยนผ่านไปสู่พลังงานหมุนเวียนได้อย่างยั่งยืน เช่น กลุ่มในจังหวัดอุบลราชธานี เชียงใหม่ และจากต่างประเทศ เช่น สวีเดน เยอรมนี และญี่ปุ่น [10], [16], [17], [18]

- การประชุมและสัมมนาเพื่อหลอมรวมแนวความคิด จัดเวทีสัมมนาเพื่อเชิญภาคีเครือข่าย เช่น หน่วยงานรัฐ อบต. นักวิชาการ และกลุ่มชุมชนร่วมกันวิเคราะห์ตัวแปรที่สำคัญ (Key Variables) ในการสร้างโมเดล เช่น ขนาดกำลังการผลิต, รูปแบบการลงทุนร่วม, กลไกรับซื้อไฟฟ้า และแนวทางการจัดการภาษี/เงินอุดหนุน

- การยกร่างโมเดลเบื้องต้น ออกแบบต้นแบบโมเดลธุรกิจโดยใช้เครื่องมือ Business Model Canvas (BMC) ที่ประกอบด้วย 9 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ กลุ่มลูกค้า, ข้อเสนอคุณค่า, ช่องทาง, ความสัมพันธ์, รายได้, ทรัพยากร, กิจกรรม, หุ้นส่วน และโครงสร้างต้นทุน [14]

- การตรวจสอบและปรับปรุงโมเดล นำเสนอร่างโมเดลต่อผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่านในด้านพลังงาน เศรษฐศาสตร์ และการพัฒนาชุมชน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ ความยั่งยืน และการนำไปใช้จริง พร้อมข้อเสนอแนะในการปรับปรุง

- การทดลองภาคสนาม ดำเนินการติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ต้นแบบในกลุ่มวิสาหกิจชุมชน 1–2 แห่ง เพื่อทดสอบความเหมาะสมในบริบทจริง พร้อมติดตามผลกระทบด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคมอย่างเป็นระบบ

รูปที่ 3 แผนภาพกรอบแนวคิดการวิจัย (Conceptual Framework)

*2.2 กลยุทธ์และเทคนิคการเก็บรวบรวมข้อมูล*

- การวิจัยเชิงมิติ (Dimensional Qualitative Inquiry) วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างวิสาหกิจชุมชนที่ตั้งอยู่ในบริบททางภูมิศาสตร์ที่หลากหลาย เช่น พื้นที่เมืองกับชนบท โดยพิจารณาความแตกต่างด้านระดับเทคโนโลยี ค่าใช้จ่ายพลังงาน และความซับซ้อนของกระบวนการผลิต เพื่อสร้างฐานข้อมูลเปรียบเทียบเชิงลึก [19]

- การสำรวจข้อมูลเชิงปริมาณจากค่าใช้จ่ายพลังงานย้อนหลัง รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลใบแจ้งค่าไฟฟ้าของวิสาหกิจชุมชนย้อนหลัง 12 เดือน เพื่อประเมินระดับการใช้พลังงาน ต้นทุนต่อหน่วย และแนวโน้มค่าใช้จ่ายโดยรวม ซึ่งจะนำไปสู่การตั้งสมมติฐานเบื้องต้นต่อกลยุทธ์การลดต้นทุน [13]

*2.3 เครื่องมือวิจัย*

การเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือที่ออกแบบอย่างมีความเฉพาะเจาะจงเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มี

ความน่าเชื่อถือและสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ ประกอบด้วย

- แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured Interview Guides) ซึ่งผ่านการตรวจสอบความเที่ยงและความตรงจากผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานและเศรษฐศาสตร์ชุมชน
- แบบฟอร์มบันทึกเชิงพฤติกรรมและประเด็นในการสตอร์มมิงกลุ่ม (Focus Group Protocols)
- แบบบันทึกข้อมูลค่าใช้จ่ายพลังงานย้อนหลัง (Utility Cost Log Sheets)
- แบบฟอร์มประเมินองค์ประกอบตาม BMC (BMC Assessment Matrix)
- แนวทางการวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (Content Analysis Framework)

การดำเนินงานตามระเบียบวิธีที่กล่าวมาข้างต้นได้รับการออกแบบเพื่อเสริมความเข้มแข็งทางแนวคิดและเชิงปฏิบัติในการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนที่มีความเหมาะสม ยืดหยุ่น และยั่งยืนต่อสภาพแวดล้อมของจังหวัดจันทบุรีและสามารถปรับประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นที่มีบริบทใกล้เคียงได้ในอนาคต

## 3. ระเบียบวิธีการวิจัย

*3.1 กำหนดกลุ่มตัวอย่าง*

การดำเนินงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในพื้นที่จังหวัดจันทบุรี โดยใช้ระบบการวัดพลังงานสุทธิเป็นกลไกสำคัญ ในการนี้จึงจำเป็นต้องเลือกกลุ่มตัวอย่างที่สามารถสะท้อนภาพรวมของศักยภาพและข้อจำกัดของวิสาหกิจชุมชนในภูมิภาคได้อย่างเหมาะสม ผู้วิจัยจึงใช้กระบวนการคัดเลือกแบบมีวัตถุประสงค์ (Purposive Sampling) จากวิสาหกิจชุมชนที่ขึ้นทะเบียนในจังหวัดจันทบุรีจำนวนทั้งสิ้น 542 แห่ง โดยใช้เกณฑ์คัดกรองเบื้องต้น ได้แก่ (1) มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 500 หน่วยต่อเดือน (2) ดำเนินกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตหรือแปรรูปสินค้าเกษตรที่มีความเข้มข้นด้านพลังงาน และ (3) ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยมากกว่า 5.2 kWh/m²/day เช่น อำเภอเขาคิชฌกูฏ มะขาม นายายอาม ขลุง สอยดาว และท่าใหม่ [5]

จากกระบวนการกลั่นกรองรอบแรก ผู้วิจัยได้รายชื่อวิสาหกิจชุมชนที่เข้าเกณฑ์จำนวน 34 แห่ง และดำเนินการสำรวจเชิงลึกเพิ่มเติมด้านพฤติกรรมการใช้พลังงาน ลักษณะกิจกรรมการผลิต และความพร้อมด้านความร่วมมือ สุดท้ายคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจำนวน 15 แห่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมและยินยอมเข้าร่วมกิจกรรมวิจัยอย่างต่อเนื่อง โดยถือเป็นตัวแทนที่มีความหลากหลายด้านภูมิศาสตร์ ขนาดกิจการ และความซับซ้อนของระบบพลังงาน [20]

แนวทางการพัฒนาโมเดลในครั้งนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า โครงสร้างธุรกิจของวิสาหกิจชุมชนสามารถปรับเปลี่ยนให้มีความยืดหยุ่นในการรองรับการเปลี่ยนผ่านพลังงานได้ หากมีข้อมูลเชิงประจักษ์ที่เพียงพอในการตัดสินใจ [11] ด้วยเหตุนี้ การออกแบบโมเดลภายใต้กรอบ Business Model Canvas (BMC) จึงต้องอาศัยข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งในมิติเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสังคม [14]

*3.2 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ*

ข้อมูลเชิงปริมาณถูกรวบรวมจากแบบสอบถามซึ่งครอบคลุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ปริมาณการใช้ไฟฟ้ารายจ่ายเฉลี่ยต่อเดือน ความถี่ของการซ่อมบำรุง และทัศนคติต่อระบบการวัดพลังงานสุทธิ ข้อมูลเหล่านี้ได้รับการวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และการแจกแจงความถี่ [12] ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าวิสาหกิจชุมชนส่วนใหญ่มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงฤดูการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 900–2,500 หน่วย/เดือน โดยเฉลี่ย 1,750 หน่วย/เดือน ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยของครัวเรือนทั่วไปถึง 3.5 เท่า ซึ่งสะท้อนถึงภาระต้นทุนที่มีนัยสำคัญในโครงสร้างทางการเงินของกิจการ [13]

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้

สมการที่ 1 Levelized Cost of Electricity (LCOE) [4] ดังนี้

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{Z1+r)^t}} \quad (1)$$

โดยที่

$I_t$ คือ การลงทุนในปีที่ t

$M_t$ คือ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง

$F_t$ ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ (ค่าจ้าง, บริหาร)

$E_t$ คือไฟฟ้าที่ผลิตได้ในปีที่ t

$r$ คือ อัตราคิดลด (discount rate)

ผลจากการวิเคราะห์แสดงว่า LCOE ของระบบโซลาร์เซลล์ขนาด 10 kWp มีค่าอยู่ในช่วง 2.50–2.90 บาทต่อหน่วย ซึ่งต่ำกว่าราคาค่าไฟฟ้าปลีกเฉลี่ยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่อยู่ที่ 3.70 บาทต่อหน่วย [21]

*3.2 กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ*

*3.2.1 การระดมสมองเชิงกลุ่ม (Community Storming Workshops)* เป็นเครื่องมือสำคัญในกระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research: PAR) ที่มุ่งเน้นการมีส่วนร่วมของชุมชนในการวิเคราะห์ปัญหาและพัฒนาแนวทางแก้ไขที่เหมาะสมกับบริบทท้องถิ่น . ในกรณีศึกษานี้ การจัดเวิร์กช็อปในจังหวัดจันทบุรีมีวัตถุประสงค์เพื่อเข้าใจปัญหาค่าไฟฟ้าสูงของวิสาหกิจชุมชนและร่วมกันพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานที่ยั่งยืน พบว่า

- การระบุปัญหา ผู้เข้าร่วมสามารถระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าไฟฟ้าสูง เช่น การใช้เครื่องจักรที่ไม่มีประสิทธิภาพ การขาดความรู้ด้านการจัดการพลังงาน และการพึ่งพาแหล่งพลังงานภายนอก.

- การพัฒนาแนวทางแก้ไข มีการเสนอแนวทางต่าง ๆ เช่น การใช้พลังงานทดแทน การปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และการจัดตั้งกลุ่มความร่วมมือเพื่อแบ่งปันทรัพยากร.

- การสร้างความร่วมมือ ลงมือร่วมกันช่วยเสริมสร้างความร่วมมือระหว่างวิสาหกิจชุมชนและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาโมเดลธุรกิจที่ยั่งยืน.

*3.2.2 การวิจัยเชิงมิติ (Dimensional Qualitative Inquiry)* ได้ถูกนำมาใช้ในเพื่อตรวจสอบและอธิบายความแตกต่างเชิงโครงสร้างของวิสาหกิจชุมชนที่ตั้งอยู่ในภูมิศาสตร์ที่หลากหลายของจังหวัดจันทบุรี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมิติของระดับเทคโนโลยีที่เข้าถึงได้ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และความซับซ้อนของกระบวนการผลิต ทั้งนี้เพื่อวางฐานข้อมูลเชิงเปรียบเทียบที่มีความลึกและแม่นยำสำหรับการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนในบริบทที่แตกต่างกัน

- ระดับเทคโนโลยีและโครงสร้างพื้นฐาน จากการลงพื้นที่และสัมภาษณ์เชิงลึกพบว่า วิสาหกิจชุมชนในเขตเมือง เช่น อำเภอเมืองจันทบุรี และอำเภอท่าใหม่ มีการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยกว่าในกระบวนการแปรรูป เช่น เครื่องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ ระบบแช่เย็น และระบบการจัดการพลังงานเบื้องต้น ในขณะที่วิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ห่างไกล เช่น อำเภอมะขาม และอำเภอสอยดาว ส่วนมากยังใช้เทคโนโลยีพื้นฐาน เช่น เตาถ่าน หรือเครื่องจักรมือสองที่ไม่มีระบบควบคุมอุณหภูมิ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน [15], [22]

- ค่าใช้จ่ายพลังงานได้ดำเนินการโดยการรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงาน (kWh) และค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องในช่วง 12 เดือนที่ผ่านมา การวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวใช้วิธีการทางสถิติเพื่อหาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และแนวโน้มของการใช้พลังงานและค่าใช้จ่าย

การคำนวณต้นทุนต่อหน่วย (Cost per Unit) เป็นการวิเคราะห์ที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของวิสาหกิจชุมชน โดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{ต้นทุนต่อหน่วย} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายรวม}}{\text{พลังงานที่ใช้ } (kWh)} \quad (2)$$

ผลการวิเคราะห์พบว่า วิสาหกิจชุมชนในพื้นที่เมืองมีต้นทุนต่อหน่วยเฉลี่ยที่ 4.50 บาท/หน่วย ขณะที่ในพื้นที่ชนบทมีต้นทุนเฉลี่ยที่ 5.20 บาท/หน่วย ความแตกต่างนี้สะท้อนถึงความแตกต่างในประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

และโครงสร้างค่าใช้จ่ายระหว่างพื้นที่เมืองและชนบท ความแตกต่างของระดับเทคโนโลยีสะท้อนชัดเจนในค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน วิสาหกิจในเมืองมีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่า 3,500 บาทต่อเดือนต่อกลุ่ม ขณะที่ในชนบทมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยอยู่ที่ 2,100 บาท แต่ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยผลผลิตของชนบทกลับสูงกว่า เนื่องจากประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่ำ [23]

- ความซับซ้อนของกระบวนการผลิต อีกหนึ่งมิติสำคัญคือความซับซ้อนของกระบวนการผลิต วิสาหกิจในเมืองมักมีสายการผลิตที่ประกอบด้วยขั้นตอนมากกว่า 5 ขั้นตอน มีการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ มีระบบจัดเก็บและบรรจุภัณฑ์ที่ได้มาตรฐาน ในทางกลับกัน วิสาหกิจในชนบทยังอิงกับกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม การวิเคราะห์เชิงเนื้อหา (content analysis) พบว่า ความซับซ้อนของกระบวนการผลิตมีความสัมพันธ์กับการตัดสินใจในการลงทุนด้านพลังงาน เช่น การติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์หรือระบบประหยัดพลังงานอื่น ๆ [24]

การใช้วิธีวิจัยแบบ Dimensional Qualitative Inquiry ทำให้สามารถจำแนกองค์ประกอบเชิงปริบทของแต่ละกลุ่มเป้าหมายได้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะเมื่อจับคู่กับการออกแบบโมเดลธุรกิจด้วย Business Model Canvas [14] ทำให้สามารถเชื่อมโยงมิติต่าง ๆ เข้ากับองค์ประกอบของโมเดล เช่น กลุ่มลูกค้า ทรัพยากรหลัก และโครงสร้างต้นทุนได้อย่างมีนัยสำคัญ [25], [26]

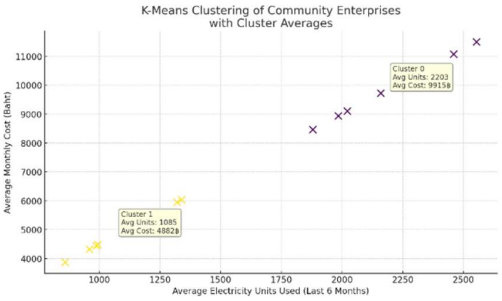
- การตั้งสมมติฐานเบื้องต้นต่อกลยุทธ์การลดต้นทุนพลังงานของวิสาหกิจชุมชนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานของวิสาหกิจชุมชน โดยการใช้ข้อมูลดังกล่าวในการวางแผนและตัดสินใจเกี่ยวกับการลงทุนในเทคโนโลยี การจัดการพลังงาน และการใช้พลังงานทดแทน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนโดยรวม

## 4. ผลการวิจัย

*4.1 การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานย้อนหลัง*

การรวบรวมข้อมูลใบแจ้งค่าไฟฟ้าย้อนหลัง 12 เดือน จากวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ต่าง ๆ พบว่ากลุ่มวิสาหกิจชุมชนในเขตเมืองมีแนวโน้ม ค่าไฟเฉลี่ยต่อเดือนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่นอกเมือง มีความแตกต่างของค่าใช้จ่ายพลังงานระหว่างพื้นที่เมืองและชนบท โดยพื้นที่ชนบทมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยสูงกว่า เนื่องจากการใช้เทคโนโลยีที่ล้าสมัยและโครงสร้างพื้นฐานที่ไม่เหมาะสม [27] กลุ่มในชนบทมีค่าไฟฟ้าเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่มในเมืองในทุกเดือน ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการปรับปรุงโครงสร้างพลังงานหรือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทน เช่น ระบบการวัดพลังงานสุทธิเพื่อช่วยลดภาระต้นทุน

จากการวิเคราะห์เชิงลึกด้วยเทคนิค K-Means Clustering ได้ทำการจัดกลุ่มวิสาหกิจชุมชนตามพฤติกรรมการใช้พลังงาน 2 ตัวแปรหลัก ได้แก่ หน่วยไฟฟ้าเฉลี่ยย้อนหลัง 12 เดือน และค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อเดือน โดยผลลัพธ์การจัดกลุ่มดังรูปที่ 4 มีดังนี้




รูปที่ 4 การจัดกลุ่มวิสาหกิจชุมชนตามพฤติกรรมการใช้พลังงาน ด้วยเทคนิค K-Means Clustering

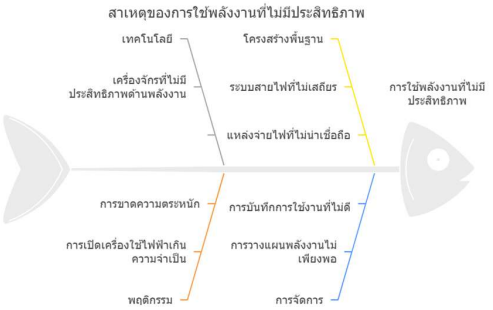
- Cluster 0 กลุ่มที่มีการใช้พลังงานและค่าไฟฟ้าต่อเดือนค่อนข้างต่ำ น่าจะเป็นกลุ่มในพื้นที่ชนบท ใช้เทคโนโลยีพื้นฐาน และกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ควรเป็นเป้าหมายหลักในการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ เพื่อลดต้นทุน

- Cluster 1 กลุ่มที่ใช้พลังงานและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า มีแนวโน้มว่าอยู่ในเขตเมืองหรือมีกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ที่ต้องใช้พลังงานมาก (เช่น ระบบแช่เย็น การอบแห้ง) อาจเริ่มด้วยกลยุทธ์การประหยัดพลังงาน (Energy Saving) ก่อนที่จะลงทุนในระบบพลังงานทดแทน

*4.2 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพผ่านเวทีระดมสมอง*

การจัดเวทีระดมสมองกับผู้แทนวิสาหกิจชุมชน ผู้นำท้องถิ่น และผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ช่วยให้เข้าใจถึงปัญหาเชิงโครงสร้างและความต้องการในการพัฒนา โดยใช้เครื่องมือ เช่น แผนผังเหตุและผล (Fishbone Diagram) ดังรูปที่ 5 [28]

ผลการวิเคราะห์พบว่าปัญหาหลักที่ส่งผลต่อค่าใช้จ่ายพลังงานสูง ได้แก่ การขาดความรู้ด้านการจัดการพลังงาน การใช้เทคโนโลยีที่ล้าสมัย และการขาดการสนับสนุนจากภาครัฐในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน




รูปที่ 5 แผนผังเหตุและผล (Fishbone Diagram) สาเหตุของการใช้พลังงานที่ไม่มีประสิทธิภาพ

*4.3 การออกแบบแนวทางการแก้ไขปัญหา*

จากข้อมูลที่ได้ การออกแบบแนวทางการแก้ไขปัญหาเบื้องต้นเน้นที่การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เช่น การเปลี่ยนมาใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพสูง การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ และการใช้ระบบการวัดพลังงานสุทธิเพื่อขายไฟฟ้าส่วนเกินกลับเข้าสู่ระบบ [29] นอกจากนี้ การส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในการวางแผนและดำเนินการโครงการพลังงานทดแทน เป็นแนวทางที่สำคัญในการสร้างความยั่งยืนและลดภาระค่าใช้จ่ายพลังงานในระยะยาว [11]

การศึกษากรณีของวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดอุบลราชธานีและเชียงใหม่ที่นำระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ พบว่ามีการลดค่าใช้จ่ายพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การศึกษาเปรียบเทียบโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ระดับชุมชนระหว่างประเทศไทยและญี่ปุ่นโดย Yamashita [30] ชี้ให้เห็นว่า การมีส่วนร่วมของชุมชนและการสนับสนุนจากภาครัฐเป็นปัจจัยสำคัญในการประสบความสำเร็จของโครงการ

*4.4 การออกแบบโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานทดแทน*

การใช้เครื่องมือ Business Model Canvas (BMC) ในการออกแบบโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนช่วยให้สามารถระบุองค์ประกอบสำคัญ 9 ประการ โดยขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชน คือการนำเสนอร่าง Business Model Canvas (BMC) ต่อผู้เชี่ยวชาญอย่างน้อย 3 คน จากสาขาวิศวกรรมพลังงาน เศรษฐศาสตร์พลังงาน และการพัฒนาชุมชน เพื่อให้เกิดการประเมินที่ครอบคลุมทั้งด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงในบริบทของวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดจันทบุรีดังรูปที่ 6

การประเมินดำเนินการผ่านเวที Focus Group Discussion (FGD) และการให้แบบสอบถามที่ออกแบบมาเฉพาะเพื่อประเมิน 9 องค์ประกอบหลักของ BMC โดยเน้นใน 3 มิติหลัก ได้แก่

(1) ความเหมาะสมด้านเทคโนโลยี (Technical Feasibility) เช่น ประสิทธิภาพของระบบการวัดพลังงานสุทธิการเลือกขนาดระบบผลิตที่สอดคล้องกับรูปแบบการใช้ไฟฟ้าในแต่ละวิสาหกิจ

(2) ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Viability) เช่น โครงสร้างต้นทุน-รายได้ ระยะเวลาคืนทุน และแรงจูงใจด้านการเงิน

(3) ความเหมาะสมเชิงสังคม (Social Acceptability) เช่น รูปแบบการมีส่วนร่วมของชุมชน ความเข้าใจของกลุ่มเป้าหมาย และการสร้างแรงจูงใจอย่างยั่งยืน

ผลจากการทวนสอบช่วยเสริมรายละเอียดในประเด็นที่อาจขาดความสมบูรณ์ เช่น การเพิ่มกลไกจูงใจด้านภาษีหรือเงินอุดหนุนในช่อง "Revenue Streams", การระบุพาร์ทเนอร์ที่สำคัญในระดับท้องถิ่นในช่อง "Key Partnerships", และการวางระบบฝึกอบรมต่อเนื่องใน

"Customer Relationships" รวมถึงเสนอให้มีระบบเก็บข้อมูลการผลิต-ใช้ไฟแบบ real-time เพื่อสนับสนุน “Key Resources” ให้มีความชัดเจนและนำไปสู่การติดตามผลแบบ Data-Driven ในระยะยาว

ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญเหล่านี้ได้ถูกรวบรวมวิเคราะห์ และนำมาปรับปรุงร่าง BMC ให้มีความครอบคลุม ยืดหยุ่น และสามารถนำไปใช้ได้จริงในหลากหลายบริบทของชุมชน ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ยกระดับความน่าเชื่อถือและคุณภาพของโมเดลธุรกิจนี้ให้พร้อมสำหรับการนำไปปฏิบัติจริงในระดับพื้นที่

รูปที่ 6 โมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิในจังหวัดจันทบุรี

*4.5 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน*

การประเมินค่า LCOE ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับ 10 kWp พบว่าค่าใช้จ่ายรวมตลอดอายุโครงการ 25 ปีอยู่ที่ประมาณ 450,000 บาท โดยมีต้นทุนหน่วยต่อไฟฟ้า (LCOE) เท่ากับ 2.21 บาท/หน่วย เมื่อเทียบกับราคาขายไฟฟ้าเฉลี่ยของการไฟฟ้าภูมิภาคที่ 4.10 บาท/หน่วย แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจอย่างชัดเจน [1], [2]

นอกจากนี้ กลุ่มตัวอย่างที่ติดตั้งระบบแล้ว 2 รายรายงานว่าค่าไฟฟ้าลดลงเฉลี่ย 42% ต่อเดือน และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 6.8 ปี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phuangpornpitak & Tia [9] ที่ระบุว่าระบบขนาดเล็กในครัวเรือนและกิจการชุมชนสามารถคืนทุนได้ภายใน 6–8 ปี

การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับชุมชนมีศักยภาพสูงในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยระบบขนาด 10 kWp สามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้ประมาณ 6,500 กิโลกรัม $CO_2$ ต่อปี เทียบเท่ากับการปลูกต้นไม้ 150 ต้นต่อปี [4,10]

ซึ่งนอกจากช่วยลดภาระต้นทุนพลังงานแล้ว ยังสอดคล้องกับเป้าหมายการลดคาร์บอนสุทธิ (Net Zero Emissions) ของประเทศไทยในระยะยาว อีกทั้งยังส่งเสริมความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมในระดับฐานรากอย่างมีนัยสำคัญ

**5. สรุปผลงานวิจัย**

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการวัดพลังงานสุทธิเพื่อแก้ไขปัญหาต้นทุนค่าไฟฟ้าที่สูงในวิสาหกิจชุมชนในจังหวัดจันทบุรี โดยเน้นการออกแบบโมเดลที่สอดคล้องกับบริบทภูมิศาสตร์ เศรษฐกิจ และสังคมของท้องถิ่น โดยใช้ Business Model Canvas (BMC) เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์

จากการเก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายไฟฟ้าย้อนหลัง 12 เดือน และจัดกระบวนการวิจัยแบบ Dimensional Qualitative และ Quantitative พบว่า ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ชนบทอยู่ที่ 5.20 บาท/หน่วย ขณะที่ในเขตเมืองอยู่ที่ 4.50 บาท/หน่วย ทั้งนี้กลุ่มในชนบทมีค่าใช้จ่ายรายเดือนเฉลี่ยสูงถึง 3,500 บาท/เดือน เทียบกับ 2,100 บาท/เดือนในเขตเมือง โดยมีสาเหตุหลักจากการใช้เทคโนโลยีที่ล้าสมัย โครงสร้างพื้นฐานไฟฟ้าที่ไม่มีเสถียรภาพ และขาดการวางแผนจัดการพลังงาน ระบบการวัดพลังงานสุทธิเป็นกลไกสำคัญในการส่งเสริมให้วิสาหกิจสามารถผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้เอง และขายส่วนเกินกลับเข้าสู่ระบบ โดยสามารถลดภาระต้นทุนพลังงานได้สูงถึง 30–50% ภายในระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 5–7 ปี ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (3)

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Initial Investment (THB)}}{\text{Annual Savings } (THB/year)} \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ภายใต้สมมติฐานต้นทุนติดตั้ง 30,000 บาท/กิโลวัตต์ ระบบขนาด 5 กิโลวัตต์ จะมี IRR อยู่ที่ประมาณ 13.5% และ NPV เป็นบวกเมื่อพิจารณาระยะเวลา 10 ปีที่อัตราคิดลด 7%

**6. อภิปรายผลการวิจัย**

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นความไม่เท่าเทียมกันด้านโครงสร้างพื้นฐานระหว่างเขตเมืองกับชนบท ทั้งในแง่ของเทคโนโลยีและศักยภาพการบริหารจัดการพลังงาน โดยเฉพาะในกลุ่มวิสาหกิจที่มีกระบวนการผลิตซับซ้อน เช่น การแช่เย็นและแปรรูปผลไม้ ซึ่งใช้พลังงานสูงและมีรูปแบบการใช้ไฟฟ้าแบบ peak load

การออกแบบโมเดล BMC ที่ตอบโจทย์เชิงเศรษฐกิจและสังคม ทำให้เกิดแนวทางใหม่ที่สามารถปรับใช้ได้กับชุมชนในบริบทที่หลากหลาย โดยโมเดลที่ดีต้องมีองค์ประกอบดังนี้

- Value Proposition ที่เน้นการลดต้นทุนพลังงานและสร้างรายได้จากไฟฟ้าส่วนเกิน
- Customer Segments ที่เฉพาะเจาะจง เช่น กลุ่มเกษตรแปรรูปในพื้นที่ห่างไกล
- Key Partnerships กับหน่วยงานท้องถิ่น มหาวิทยาลัย และธนาคารรัฐ
- Revenue Streams ที่ครอบคลุมทั้งการประหยัดและรายได้จากการขายไฟ

**7. ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการวิจัยต่อเนื่อง**

- การสร้างระบบสนับสนุนด้านเงินทุน ภาครัฐควรจัดตั้งกองทุนพลังงานชุมชนเพื่อสนับสนุนการติดตั้งระบบการวัดพลังงานสุทธิพร้อมให้สินเชื่อดอกเบี้ยต่ำ โดยเฉพาะในกลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่มีศักยภาพแต่ขาดเงินทุนเริ่มต้น
- การพัฒนาทักษะและการฝึกอบรม ควรมีการจัดอบรมเชิงปฏิบัติการแก่ผู้นำชุมชนและสมาชิกวิสาหกิจเรื่องการดูแลระบบพลังงานและการวางแผนจัดการพลังงาน เพื่อให้สามารถพึ่งพาตนเองได้ในระยะยาว
- การพัฒนา BMC ให้มีความยืดหยุ่น โมเดลควรสามารถปรับใช้กับรูปแบบธุรกิจที่หลากหลาย เช่น แบบรวมกลุ่ม แบบผู้ลงทุนภายนอก หรือแบบบริหารร่วม ซึ่งจะทำให้ชุมชนมีทางเลือกมากขึ้นและไม่ยึดติดกับรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง
- การวิจัยเชิงเปรียบเทียบ ควรมีการศึกษาข้ามภูมิภาค เช่น เปรียบเทียบกับวิสาหกิจชุมชนในภาคเหนือและภาคใต้ เพื่อนำไปสู่การพัฒนานโยบายที่ครอบคลุมระดับประเทศ

- การติดตามและประเมินผลระยะยาว ควรมีระบบติดตามผลกระทบของโมเดลทั้งด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และสังคมอย่างเป็นระบบอย่างน้อย 3–5 ปี เพื่อยืนยันความยั่งยืน จะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของโมเดลนี้เพิ่มขึ้น

- ความเสี่ยงสำคัญของการพัฒนาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิ คือ ความไม่แน่นอนด้านนโยบายพลังงานในระยะยาว เนื่องจากอัตรารับซื้อไฟฟ้า เงื่อนไขการเชื่อมต่อ และโควต้ารับซื้ออาจมีการปรับเปลี่ยนตามบริบทเศรษฐกิจและทิศทางของภาครัฐ นอกจากนี้ ความท้าทายทางเทคนิค เช่น การควบคุมแรงดันในระบบสายส่ง การจัดการโหลดที่ไม่สมดุล และการบูรณาการกับระบบโครงข่ายหลัก ยังคงเป็นอุปสรรคต่อการขยายระบบในระดับชุมชน จึงจำเป็นต้องมีแนวทางบริหารจัดการความเสี่ยงเชิงระบบควบคู่

- การนำโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างด้านภูมิศาสตร์ นโยบายพลังงานท้องถิ่น และศักยภาพการมีส่วนร่วมของชุมชน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีโครงสร้างโครงข่ายไฟฟ้าไม่เสถียร หรือยังไม่มีมาตรการสนับสนุนระบบการวัดพลังงานสุทธิอย่างชัดเจน ซึ่งอาจส่งผลต่อความคุ้มค่าการลงทุนและความยั่งยืนของระบบในระยะยาว

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี ที่ให้งบประมาณสนับสนุนในการตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัย กราบขอบพระคุณ ผู้เชี่ยวชาญทุกท่านและอาจารย์อาทิตย์ คำต่าย ที่ให้คำแนะนำอย่างมีคุณค่าในการพัฒนางานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงผู้เชี่ยวชาญด้าน วิสาหกิจชุมชน และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในจังหวัดจันทบุรี ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและสละเวลาเข้าร่วมการสัมภาษณ์และกิจกรรมภาคสนาม ตลอดจนครอบครัว ภรรยาที่รักที่คอยแบ่งเบาภาระอื่นๆ แทนและเพื่อนร่วมงานที่ให้กำลังใจอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จะไม่สำเร็จหากปราศจากการสนับสนุนจากทุกฝ่ายดังกล่าวด้วยความจริงใจ

## 9. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of Energy Policy and Planning, Thailand Power Development Plan 2018–2037 (PDP2018 Rev.1), Bangkok, Thailand, Oct. 2020.

[2] International Energy Agency (IEA), Thailand's Clean Electricity Transition – Analysis 2023, Paris, France: IEA Publications, 2023.

[3] S. Tongsopit, Solar PV Business Models and Key Policy Considerations. Singapore: NUS Energy Studies Institute, 2015.

[4] International Renewable Energy Agency (IRENA), Renewable Power Generation Costs in 2020. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2021.

[5] Global Solar Atlas. (2024). Thailand Solar Resource Map [Online]. Available: https://globalsolaratlas.info/map.

[6] Department of Agricultural Extension. (2024). Community Enterprise Information System [Online]. Available: https://smce2023.doae.go.th.

[7] National Statistical Office of Thailand. (2024). Ministry of Digital Economy and Society, Household Energy Expenditure [Online]. Available: https://www.nso.go.th/.

[8] A. Kamtai, K. Ruttanawijit, and L. Nakharintr, "The study of thermal efficiency of hot-pot," *Sci. Eng. J. (SEJ)*, vol. 19, no. 2, pp. 49–55, 2024.

[9] International Energy Agency (IEA), Renewables 2023: Solar PV Outlook. Paris, France: IEA Publications, 2023.

[10] M. Wahlund and J. Palm, "The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A

comprehensive review," *Energy Res. Social Sci.*, vol. 87, p. 102482, May 2022.

[11] L. L. Delina, "A rural energy collaboratory: Co-production in Thailand's community energy experiments," *J. Environ. Stud. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 83–90, 2020.

[12] J. W. Creswell and C. N. Poth, *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches*, 4th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2023.

[13] R. K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, 6th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018.

[14] N. Bocken, "Business Models for Sustainability," Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science, 2023.

[15] S. White and M. Corbett, *Doing Educational Research in Rural Settings: Methodological Issues, International Perspectives and Practical Solutions*. London, U.K.: Routledge, 2014.

[16] A.-L. Vernay, C. Sebi and F. Arroyo, "Energy community business models and their impact on the energy transition: Lessons learnt from France," *Energy Policy*, vol. 175, p. 113473, 2023.

[17] N. Luangchosiri, T. Ogawa, H. Okumura and K. N. Ishihara, "Success factors for the implementation of community renewable energy in Thailand," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4203, 2021.

[18] Y. Rungcharoennan and W. Phoochinda, "Sustainability indicators for community enterprises producing renewable energy in Thailand," *Int. J. Sustainable Dev. Planning*, vol. 16, no. 5, pp. 915–923, 2021.

[19] M. Q. Patton, *Qualitative Research & Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice*, 4th ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2014.

[20] J. W. Creswell and V. L. Plano Clark, *Designing and Conducting Mixed Methods Research*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2017.

[21] Energy Policy and Planning Office (EPPO), Monthly Average Electricity Rates, 2024.

[22] P. Boros, "Applying a Total Quality Framework to Qualitative Research Design: A Review," *Qualitative Report*, vol. 23, no. 5, pp. 1169–1180, 2018.

[23] GlobalPetrolPrices.com. (2025, May 31). Thailand Electricity Prices [Online]. Available: https://www.globalpetrolprices.com/Thailand/electricity_prices/.

[24] K. L. Olofsson, J. B. Fitzgerald and M. B. Hossain, "Assessing multi-dimensional complexity through sustainability modeling: A whole community approach," *Environ. Sci. Policy*, vol. 164, p. 104002, 2025.

[25] H. Shabbir, "Dimensional qualitative research as a paradigmatic shift in qualitative inquiry: An introduction to the special issue," *Psychol. Marketing*, vol. 28, no. 10, pp. 977–979, 2011.

[26] L. S. Nowell, J. M. Norris, D. E. White and N. J. Moules, "Thematic Analysis: Striving to Meet the Trustworthiness Criteria," *Int. J.*

*Qualitative Methods*, vol. 16, no. 1, pp. 1–13, 2017.

[27] A. Yoshida, P. Manomivibool, T. Tasaki and P. Unroj, "Qualitative study on electricity consumption of urban and rural households in Chiang Rai, Thailand, with a focus on ownership and use of air conditioners," *Sustainability*, vol. 12, no. 14, p. 5796, 2020.

[28] H. J. M. Cavite, C. Kerdsriserm and S. Suwanmaneepong, "Strategic guidelines for community enterprise development: A case in rural Thailand," *J. Entrepreneurship Emerging Econ.*, vol. 17, no. 2, pp. 284–304, 2023.

[29] P. Payakkamas, A. Bangviwat, C. Menke and P. Trinuruk, "Price determination of electricity supply in Thailand based on externalities, wheeling charges, and losses," *Sci. Technol. Asia*, vol. 22, no. 3, pp. 49–64, 2017.

[30] M. Yamashita, "Comparative analysis of community solar projects between Thailand and Japan," M.S. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2018.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 87-97 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# การพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนโดยวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส

# Development of Domestic Cooking Burner using Stainless Wire - Mesh Porous Media

ไพลิน หาญขุนทด[1] จัตุพล ป้องกัน[1] สุรเดช สินจะโปะ[2] บัณฑิต กฤตาคม[2] นิวัฒน์ เกตุชาติ[3]*
[1]ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (DiTo-Lab)
สาขาวิศวกรรมระบบราง คณะระบบรางและการขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000
[2]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
นครราชสีมา 30000
[3]สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000
Pilin Hankhuntod[1] Jattupon Pongkun[1] Suradech Sinjapo[2] Bundit Krittacom[2] Niwat Ketchat[3]*
[1]Development in Technology of Porous Medias Research Laboratory (DiTo-Lab)
Department of Railway Systems Engineering, Faculty of Railway Systems and Transportation,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000
[2]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000
[3]Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, 30000
*Corresponding author Email: niwat.ke@rmuti.ac.th
(Received: July 16, 2025; Revised: August 6, 2025; Accepted: October 16, 2025)

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ที่มีปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจีสูงสุดไม่เกิน 5.78 kW ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 โดยตาข่ายสแตนเลสจะถูกนำมาเรียงซ้อนกันเป็นหัวเตาและเรียกเตาแก๊สแบบใหม่นี้ว่า เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส (SWB) จำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้วของตาข่ายสแตนเลส (PPI) ที่ทำการศึกษามี 3 ค่า ได้แก่ 8, 12 และ 16 อัตราการจ่ายเชื้อเพลิง ($Q_F$) มี 2 ค่า คือ 2 และ 3 kW และความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส (H) มี 2 ขนาด คือ 1 และ 2 cm ผลการทดลองที่ได้จากหัวเตา SWB ทั้ง 6 รูปแบบ จะนำไปเปรียบเทียบกับหัวเตาแก๊สเชิงพาณิชย์ที่มีวางขายในท้องตลาด 2 ชนิด ได้แก่ เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบเซรามิกส์รังผึ้ง (PB) และแบบหัวฟู่ (RB) จากการทดลองพบว่าเตาแก๊สแบบ SWB สามารถต้มน้ำเดือดได้เร็วกว่าและมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ($\eta_{th}$) สูงกว่าเตาแก๊สแบบ PB และ RB ทุกเงื่อนไขการทดลอง หากเปรียบเทียบเฉพาะเตาแก๊สแบบ SWB พบว่าที่มี H = 1 cm จะมี $\eta_{th}$ ใกล้เคียงกันกับกรณี H = 2 cm โดยที่เตาแก๊สแบบ

SWB08-01 (PPI=8) มีค่า $\eta_{th}$ สูงที่สุดคือ 52.16 % ที่ $Q_F$ =2 kW นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ CO และ $NO_X$ ของเตาแก๊สแบบ SWB ทั้ง 6 รูปแบบ จะมีค่าที่ต่ำคือไม่เกิน 220 และ 45 ppm ตามลำดับ

**คำสำคัญ:** ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน, ตาข่ายสแตนเลส, คาร์บอนมอนอกไซด์, ไนโตรเจนออกไซด์

**ABSTRACT**

This research aims to improve the thermal efficiency of domestic cooking burner, of which the highest amount of Liquefied Petroleum Gas (LPG) consumes not excess 5.78 kW, in accordance with Thailand Industrial Standard (TIS 2312-2549). Many plates of stainless wire - mesh were packed as the new cooking burner and was called stainless wire - mesh porous of domestic cooking burner (SWB). In the experiment, three pores per inch (PPI) of wire-mesh consisting of 8, 12 and 16 were conducted. Two fuel rates ($Q_F$) of 2 and 3 kW were conducted. Two thicknesses of stainless wire - mesh (H = 1 and 2 cm) were examined. The experimental results of six SWBs were compared with two conventional gas cooking burners, i.e., radial slotted gas burner (RB) and honeycomb porous ceramic burner (PB). From the experiment, it was found that the boiling time of water was faster than the level of thermal efficiency ($\eta_{th}$) in SWB was also higher than PB and RB in all experimental conditions. In comparison for SWB, the $\eta_{th}$ of SWB at H = 1 cm had a similar to the case of H = 2 cm. The SWB constructed by the SWB08-01 (PPI=8), yielded the maximum level at 52.16 % at $Q_F$ = 2 kW. In addition, remarkably, the levels of CO and $NO_X$ of the six SWB were relatively low. The values will be low, not exceeding 220 and 45 ppm, respectively.

**Keyword:** Thermal efficiency, Domestic cooking burner, Stainless wire – mesh, Carbon monoxide, Nitrogen oxide.

## 1. บทนำ

เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนมีบทบาทสำคัญต่อความเป็นอยู่ในชีวิตประจำวันของคนไทยและนิยมใช้หุงต้มในครัวเรือนมากที่สุดเมื่อเทียบกับเตาแบบอื่น ๆ เช่น เตาถ่านหรือเตาไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะมีลักษณะเด่น คือ โครงสร้างเรียบง่าย ราคาถูก ใช้ง่าย สะดวก เร่งไฟได้เร็วและมีช่วงการทำงานที่กว้างพอสมควร ทนทาน มีความปลอดภัยสูง [1] ซึ่งเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในประเทศไทยจะต้องเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 โดยเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน คือ แก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือ แอลพีจี (Liquefied petroleum gas, LPG) ที่เป็นส่วนผสมของโปรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) หรือเป็นอย่างหนึ่งอย่างใดก็ได้ จากความนิยมใช้อย่างแพร่หลายของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน จึงส่งผลให้มีการใช้แอลพีจีเพิ่มมากขึ้นทุกปี [2] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มสนใจที่จะลดปริมาณการใช้แอลพีจีในภาคครัวเรือนโดยการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้ม เช่น การเผาไหม้โดยการหมุนเวียนความร้อน (Heat - Recirculating combustions) [3]-[7] การปรับปรุงเปลวไฟแบบเจ็ท (Flame Jets) [8]-[11]

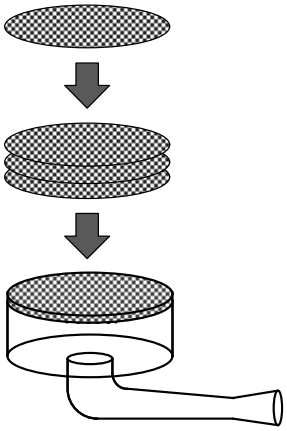
การทำให้เกิดการหมุนวนของเปลวไฟ (Swirling flame) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดการปล่อยมลพิษ [12]-[14] นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ประยุกต์ใช้วัสดุพรุนมาประกอบเป็นหัวเตา เช่น Pantangi และคณะ [15] ศึกษาคุณสมบัติของการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุน (ลูกบอลโลหะและเศษโลหะ) มาประกอบเป็นชุดหัวเผาทำการทดสอบตามมาตรฐาน IS 4246 : 2002 พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเตาแก๊สวัสดุพรุนเป็น 73% ต่อมา Pantangi และคณะ [16] ศึกษาเตาวัสดุพรุน (Porous radiant burner, PRB) ประกอบด้วยวัสดุพรุนสองชั้น ชั้นแรกเป็นโซนการเผาไหม้ที่สร้างขึ้นจากซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) และชั้นที่สองเป็นรูปแบบโซนการอุ่นความร้อนที่สร้างจากอลูมินาเม็ดกลม ($Al_2O_3$) ทดสอบโดยการต้มน้ำตามที่กำหนดใน BIS 4246: 2002 พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเตา PRB เป็น 68% ซึ่งสูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มแบบเดิม 3% ต่อมา Muthukumar และ Shyamkumar [17] ได้นำแนวทางของ .Pantangi และคณะ [16] มาพัฒนาต่อโดยทำการเปลี่ยนวัสดุพรุนชั้นที่สองในโซนการอุ่นความร้อนจากอลูมินาเม็ดกลมมาใช้เซรามิก (ความพรุน 40%) ความหนา 10 mm โซนการเผาไหม้ใช้ SiC ที่มีความพรุน 80%, 85% และ 90% ทดสอบโดยใช้วิธีต้มน้ำที่อธิบายไว้ใน BIS: 4246:2002 พบว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดประมาณ 75% ซึ่งสูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบเดิม (โลหะ) ที่มีใช้ในท้องตลาดอินเดีย 10% Conepo และคณะ [18] ได้ประยุกต์ใช้วัสดุพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สในครัวเรือนโดยการออกแบบและสร้างเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด ที่ทำมาจากเซรามิกส์ชนิดคอร์ดิไรท์ ทดสอบโดย Boiling test ตามมาตรฐาน มอก. 2312-2549 พบว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดประมาณ 55.12% ในปีต่อมา Phetsaen และคณะ [19] ได้นำแนวทางของ Conepo และคณะ [18] มาสร้างเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบใหม่เพื่อหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยทำการออกแบบและสร้างหัวเตาแก๊สแบบวัสดุพรุนชนิดโลหะเซลลูลาร์เปิด (Metal open-cellular Porous Media burner, MOB) ที่ทำมาจากนิเกิล-โครม (Ni-Cr) พบว่าเตาแก๊สแบบ MOB มีค่า $\eta_{th}$ สูงสุดเท่ากับ 60% ต่อมา Makmool และคณะ [20] ได้พัฒนาหัวเผาให้ความร้อนแบบแผ่รังสีโดยใช้วัสดุพรุนชนิดโฟมเซรามิคที่ทำมาจากอะลูมิเนียมออกไซด์ ($Al_2O_3$) พบว่าสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรองรับการใช้เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซหุงต้ม ไบโอเอทานอล และ E85 อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่า 750 ถึง 900°C และการปลดปล่อย CO ต่ำกว่า 2,000 ppm Makalingam และคณะ [21] ได้ออกแบบหัวเผาวัสดุพรุน PRB-PSM ที่มีโครงสร้างสองชั้นเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และลดการปล่อย CO และ $NO_X$ ได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเตาเผาทั่วไป

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง แต่ก็ยังมีข้อเสีย คือ วัสดุพรุนที่นำมาทำเป็นหัวเตา (ลูกบอลโลหะ และ เศษโลหะ) มีการจัดเรียงตัวของวัสดุพรุนยังมีรูปแบบไม่แน่นอน [13] วัสดุพรุนที่นำมาสร้างเป็นหัวเตามีความเปราะแตกหักง่ายในการใช้งานจริงจึงยากต่อการดูแลรักษา [14], [15] วัสดุพรุนที่นำมาทำเป็นหัวเตาเปราะแตกหักง่ายและไม่มีขายในประเทศจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศจึงมีที่ราคาแพง [18]-[21] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบใหม่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน ซึ่งจะทำการออกแบบและสร้างหัวเตาให้มีการจ่ายเชื้อเพลิงเข้าตรงกลางหัวเตาจะทำให้อุณหภูมิกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งเตา และใช้ตาข่ายสแตนเลสมาเรียงซ้อนกันเป็นหัวเตา เนื่องจากคุณสมบัติการทนอุณหภูมิ และทนการกัดกร่อนได้ดี โดยนิยามเตาแก๊สแบบนี้ว่าเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส (Stainless wire - mesh porous of domestic cooking burner, SWB)

## 2. วิธีการดำเนินงาน

*2.1 การออกแบบหัวเตา SWB*

แนวคิดในการออกแบบหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลสแสดงในรูปที่ 1 โดยมีหลักการคือ หากนำตาข่ายสแตนเลสมาวางซ้อนกันหลาย ๆ แผ่น จะเกิดเป็นวัสดุพรุน (Porous media) ซึ่งมีลักษณะเด่นเช่นเดียวกับวัสดุพรุนทั่ว ๆ ไป คือ สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับความร้อน (Absorber) และตัวเปล่งรังสีความร้อน (Emitter) จึงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 1 แนวคิดในการออกแบบหัวเตา SWB

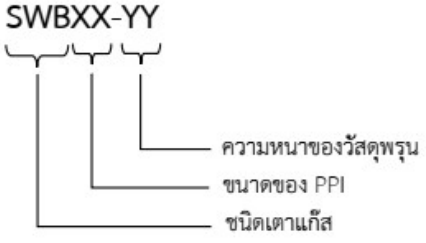
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบเตาแก๊สในครัวเรือน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบหัวฟู่ (Radial slotted ports cooking burner, RB) เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในครัวเรือน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) 2) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบเซรามิกส์รังผึ้ง (Porous ceramic cooking burner, PB) ซึ่งเหมาะกับการใช้ในกรณี ปิ้ง ย่าง ทำงานโดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) และ 3) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส (Stainless wire - mesh porous of domestic cooking burner, SWB) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค) ซึ่งเป็นเตาแก๊สที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยนิยามชื่อเรียกและคำย่อของเตาแก๊สและการกำหนดชื่อเรียกของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส แสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1 ตามลำดับ

(ก) RB

(ข) PB

(ค) SWB

รูปที่ 2 ลักษณะเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในการทดลอง




รูปที่ 3 นิยามชื่อเรียกและคำย่อของเตาแก๊ส

ตารางที่ 1 การกำหนดชื่อเรียกของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส

| แบบที่ | ชื่อเรียก | PPI | ความหนา (cm) |
|---|---|---|---|
| 1 | SWB08-01 | 8 | 01 |
| 2 | SWB12-01 | 12 | 01 |
| 3 | SWB16-01 | 16 | 01 |
| 4 | SWB08-02 | 8 | 02 |
| 5 | SWB12-02 | 12 | 02 |
| 6 | SWB16-02 | 16 | 02 |

การเลือกใช้ขนาดของตาข่ายสแตนเลสในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากเลขเพคเลท (Peclet number, Pe) ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่เป็นอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนกับการนำความร้อนของของไหลนั้นมีการคำนวณออกแบบตามสมการที่ 1 นอกจากนี้ในการใช้งานเลขเพคเลทกับการเผาไหม้ของวัสดุพรุนพบว่า หาก Pe > 65 เปลวไฟจะสามารถเกิดการเสถียรได้ภายในตัวของวัสดุพรุน แต่ถ้า Pe < 65 เปลวไฟจะไม่สามารถเสถียรหรือจุดติดได้ อย่างไรก็ตามในกรณี Pe < 65 กลับทำหน้าที่เป็นตัวอุ่นไอดี (Preheat) ที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการเลือกใช้ขนาดของตาข่ายสแตนเลสในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาจาก Pe ดังแสดงในตารางที่ 2

$$Pe = \frac{S_L d_m C_p \rho_m}{k} \quad (1)$$

เมื่อ

Pe คือ Peclet number [-]

Cp คือ ค่าความร้อนจำเพาะ [kJ $kg^{-1}$ $K^{-1}$]

$d_m$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล [-]

k คือ ค่าการนำความร้อน [$W.m^{-1}K^{-1}$]

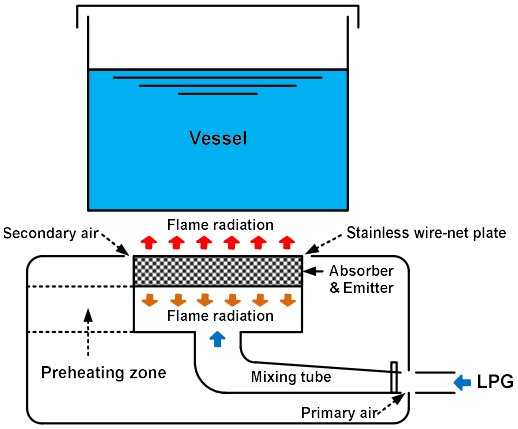
$S_L$ คือ ความเร็วของเปลวไฟที่เป็นการไหลแบบราบเรียบ [m/s]

$\rho_m$ คือ ค่าความหนาแน่นของผสมระหว่างแก๊สกับอากาศ [$kg.m^{-3}$]

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของตาข่ายสแตนเลส เกรด SUS304

| Pores per inch (PPI) | Wire-mesh diameter (mm) | Pitch (mm) | Peclet number (Pe) |
|---|---|---|---|
| 8 | 0.61 | 2.57 | 230 |
| 12 | 0.61 | 1.51 | 135 |
| 16 | 0.61 | 0.98 | 88 |

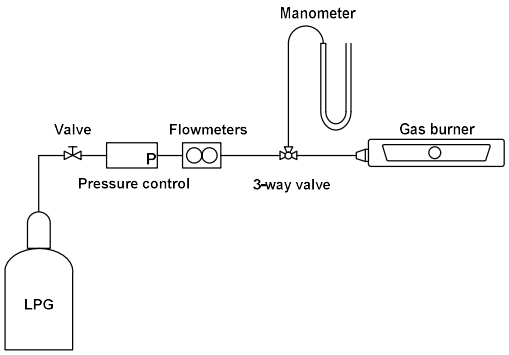
รูปที่ 4 แสดงหลักการทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี (Emitter) ตาข่ายสแตนเลสได้รับความร้อนจากเปลวไฟ (Flame) การแผ่รังสีจะแผ่ออกไปทุกทิศทุกทาง โดยเฉพาะสองด้านที่สำคัญ คือการแผ่รังสีไปด้านบน ซึ่งหมายถึงจะส่งความร้อนไปยังก้นภาชนะและอีกด้านหนึ่งจะแผ่รังสีลงด้านล่างมายังส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิง (LPG) และอากาศส่วนแรก (Primary air) ดังนั้นส่วนผสมนี้เมื่อไหลเข้ามาก่อนถึงวัสดุพรุนจะเกิดการอุ่นหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ก่อนเข้าสู่การเผาไหม้ เรียกบริเวณนี้ว่า ช่วงการอุ่นความร้อน (Preheating zone) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างเตาแก๊สหุงต้มแบบใหม่ที่มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น โดยนิยามเรียกว่า เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส (SWB)




รูปที่ 4 แผนผังเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส

*2.2 การหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน*

การหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, $\eta_{th}$) ของเตาแก๊สหุงต้มตามมาตรฐาน DIN EN 203-2, EN 203-1: 1992 หรือ EN 203-2: 1995 ต่างก็ใช้หลักการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Boiling test) ทั้งสิ้น โดยในประเทศไทยได้กำหนดวิธีการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.2312-2549 ซึ่งใช้หลักการ Boiling test เช่นกัน แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การทดสอบตามมาตรฐานของเยอรมัน คือ DIN EN 203-2 ซึ่งแผนผังการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5




รูปที่ 5 การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ทำการทดสอบง่าย แต่มีความน่าเชื่อถือสูงและ มีรายละเอียดการทดสอบ คือก่อนการทดสอบต้องติดตั้งแหล่งจ่ายแก๊สเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส มาตรวัดปริมาณแก๊ส มาตรวัดความดันแก๊ส และเตาแก๊สให้เรียบร้อย ขั้นแรกจุดไฟที่เตาโดยเปิดเตาในอัตราการใช้แก๊สสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที จึงปิดเตา หลังจากนั้นวางหม้ออะลูมิเนียมซึ่งใส่น้ำพร้อมฝาเทอร์โมคัปเปิลบนเตาแก๊สติดเตาในอัตราการใช้แก๊สสูงสุด ต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 30°C ต้มจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 90°C ให้ปิดแก๊สและวัดค่าการใช้แก๊สระหว่างการทดสอบ และค่าต่าง ๆ พร้อมทั้งบันทึกผลนำค่าที่ได้จากการทดสอบ แทนลงในสูตรการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนดังสมการที่ 2

$$\eta_{th} = \frac{m_{water} C_{p,water} \left(363 - T_{water,i}\right)}{v \times LHV \times t} \quad (2)$$

เมื่อ

$\eta_{th}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน [%]
$C_{p,\,water}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ [kJ $kg^{-1}K^{-1}$]
LHV คือ ค่าความร้อนทางต่ำของแก๊ส [kJ.$m^{-3}$]
$m_{water,\,i}$ คือ มวลของน้ำเข้า [kg]
$T_{water}$ คือ อุณหภูมิน้ำ [K]
t คือ เวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ [s]
v คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร [$m^3.s^{-1}$]

*2.3 วิธีการทดลอง*

ขั้นตอนที่ 1 ติดตั้งอุปกรณ์ทดลองโดยทำการต่อแหล่งจ่ายแก๊สเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส มาตรวัดปริมาณแก๊ส มาตรวัดความดันแก๊ส และเตาแก๊สที่ใช้ทดลองให้เรียบร้อย

ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยการถอดสายจากแหล่งจ่ายแก๊สเพื่อไปต่อกับแหล่งจ่ายลมโดยปรับความดันที่ 1-2 บาร์ จากนั้นใช้แปลงทาสีจุ่มน้ำฟองสบู่ ทาบริเวณสายแก๊สและจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ แล้วสังเกตจากฟองที่เกิดขึ้น ทำการทดสอบอีกครั้ง หรือจนมั่นใจว่าไม่มี การรั่ว แล้วย้ายสายจากแหล่งจ่ายลมมาต่อที่แหล่งจ่ายแก๊ส

ขั้นตอนที่ 3 ปรับอัตราการใช้แก๊สตามที่ต้องการและจุดเตาให้ติดไฟเพื่อทำการอุ่นหัวเตาแก๊สด้วยการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยที่ไม่มีภาระทางความร้อน ใช้เวลาประมาณ 15 นาที

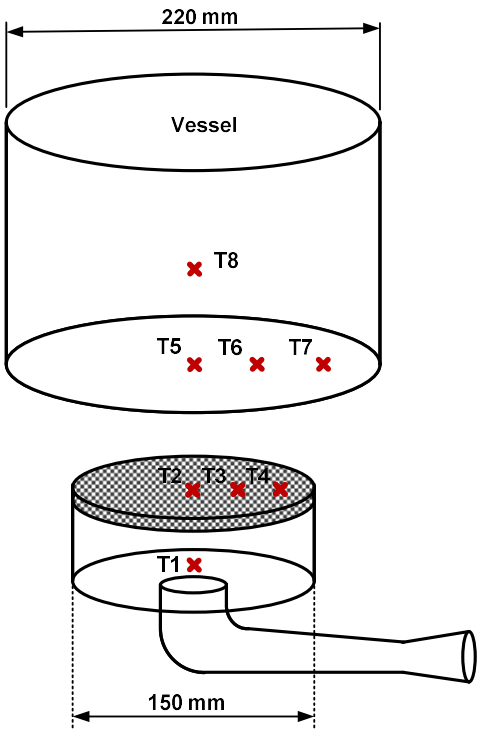
ขั้นตอนที่ 4 นำถังเชื้อเพลิงมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักก่อนการทดสอบ และติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลตามจุดที่ต้องการวัดดังนี้ (T1) คือ อุณหภูมิส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ (T2) คือ อุณหภูมิหัวเตาตำแหน่งกึ่งกลาง (T3) คือ อุณหภูมิหัวเตาตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลาง 3 cm และ (T4) คือ อุณหภูมิหัวเตาตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลาง 6 cm (T5) คือ อุณหภูมิก้นภาชนะตำแหน่งจุดกึ่งกลาง (T6) คือ อุณหภูมิก้นภาชนะตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลาง 3 cm

(T7) คือ อุณหภูมิก้นภาชนะตำแหน่งห่างจากจุดกึ่งกลาง 6 cm และ (T8) คือ อุณหภูมิน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 6

ขั้นตอนที่ 5 เติมน้ำ 2.70 kg ลงในหม้อทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 220 mm. แล้วปิดฝาพร้อมกับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิน้ำก่อนนำไปต้ม

ขั้นตอนที่ 6 เริ่มทำการทดสอบจุดไฟที่เตาโดยมีอัตราการใช้แก๊สสูงสุดพร้อมกับจับเวลา ทำการต้มน้ำจากอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C จนน้ำมีอุณหภูมิใกล้จุดเดือด (ประมาณ 90°C) แล้วปิดเตาพร้อมหยุดเวลา นำถังแก๊สชั่งอีกครั้งเพื่อหาปริมาณการใช้แก๊ส บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางการทดลอง

ขั้นตอนที่ 7 ขณะทำการทดลองจะวัดแก๊สไอเสียโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย (Exhaust gas analyzer) ยี่ห้อ Testo รุ่น M350 วัดแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้




รูปที่ 6 ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

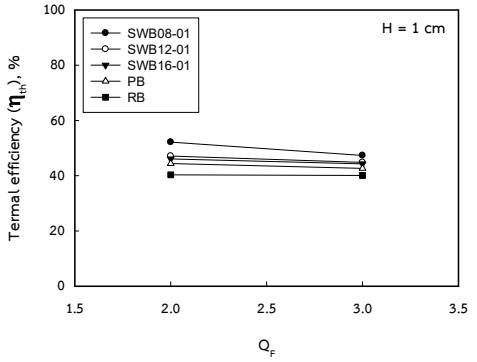
## 3. ผลการทดลอง

*3.1 อิทธิพลของจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI)*

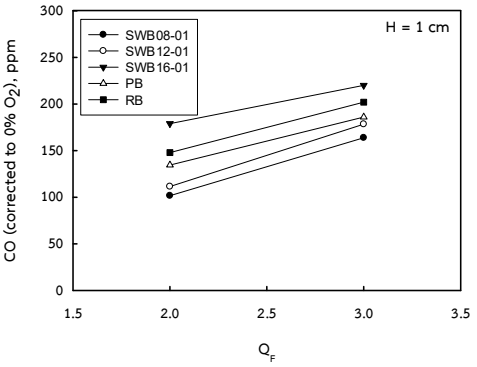
อิทธิพลของจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ($\eta_{th}$) ที่ความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส (H) เท่ากับ 1 cm และอัตราการจ่ายเชื้อเพลิง ($Q_F$) เท่ากับ 2 และ 3 kW ของเตาแก๊ส 3 แบบ คือ SWB08-01 (PPI=8), SWB12-01 (PPI=12) และ SWB16-01 (PPI=16) ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า $\eta_{th}$ จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่า $Q_F$ เพิ่มขึ้น อาจกล่าวได้ว่าระดับ $Q_F$ ที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การเผาไหม้ที่มีความรุนแรงขึ้น สามารถต้มน้ำเดือดได้เร็วขึ้น แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีการสูญเสียความร้อนไปกับสภาวะแวดล้อมที่เพิ่มสูงขึ้น (Heat loss) ซึ่งเป็นเรื่องปกติสำหรับเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนทั่วไป จึงทำให้ค่า $\eta_{th}$ ที่สภาวะ $Q_F$ = 3 kW มีค่าลดลง นอกจากนี้หากพิจารณาที่ $Q_F$ คงที่ใด ๆ พบว่า $\eta_{th}$ มีแนวเพิ่มขึ้นลดลง เมื่อ PPI มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PPI เท่ากับ 8 เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาสร้างเป็นหัวเตา SWB และจะเห็นว่าเตาแก๊สแบบ SWB จะมีค่า $\eta_{th}$ สูงกว่าเตาแก๊สแบบ PB และ RB เหตุผลนี้สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการแผ่รังสีความร้อนที่ออกมาจากแผ่นตาข่ายสแตนเลส ซึ่งไปช่วยอุ่นอุณหภูมิส่วนผสมในช่วงการอุ่นความร้อน ทำให้เตาแก๊สแบบ SWB สามารถต้มน้ำเดือดได้เร็วกว่าเตาแก๊สแบบ PB และ RB จึงส่งผลให้ค่า $\eta_{th}$ ของเตาแก๊สแบบ SWB มีค่าสูงกว่าเตาแก๊สแบบ PB และ RB โดยที่เตาแก๊ส SWB08-01 จะมีค่า $\eta_{th}$ สูงสุด คือ 52.12% ส่วนเตาแก๊สแบบ PB และ RB มีค่า $\eta_{th}$ อยู่ที่ 44.41% และ 40.32% ตามลำดับ

อิทธิพลของจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) ต่อปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าปริมาณ CO ของเตาแก๊ส PB และ RB มีค่าใกล้เคียงกับเตาแก๊ส SWB (PPI = 8, 12 และ 16) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ CO จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม PPI ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเผาไหม้ของเตาแก๊ส SWB มีความสมบูรณ์ไม่แตกต่างกัน และอยู่ในระดับที่ต่ำ คือ ไม่เกิน 220 ppm

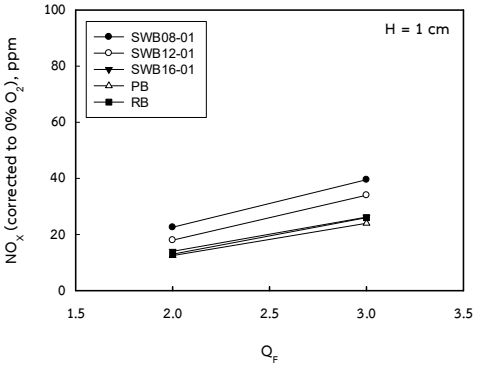
ทุกกรณี สำหรับปริมาณ $NO_X$ พบว่าจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก โดยมีค่าไม่เกิน 45 ppm ทุกสภาวะและมีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณีดังแสดงในรูปที่ 9




รูปที่ 7 อิทธิพลของ PPI ต่อ $\eta_{th}$ ที่ $Q_F$ = 2 และ 3 kW




รูปที่ 8 อิทธิพลของ PPI ต่อ CO ที่ $Q_F$ = 2 และ 3 kW



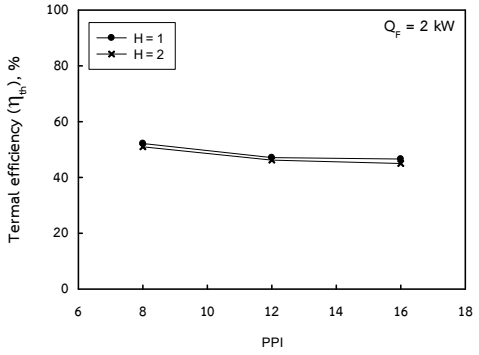

รูปที่ 9 อิทธิพลของ PPI ต่อ $NO_X$ ที่ $Q_F$ = 2 และ 3 kW

*3.2 อิทธิพลของความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส*

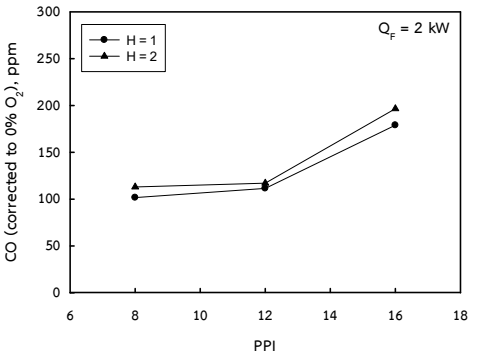
อิทธิพลของความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส (H) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อน ($\eta_{th}$) ที่อัตราการจ่ายเชื้อเพลิง ($Q_F$) เท่ากับ 2 kW และจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 8, 12 และ 16 ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่า $\eta_{th}$ จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่า PPI เพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาที่ความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส (H) เท่ากับ 1 และ 2 cm ที่ PPI คงที่ใด ๆ พบว่า $\eta_{th}$ จะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อ H เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า $\eta_{th}$ ของเตาแก๊ส SWB08-01 (H = 1 cm) และ SWB08-02 (H = 2 cm) คือ 52.12 % และ 51.22% ตามลำดับ เนื่องจากความหนาของชั้นวัสดุพรุนที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถดูดซับและแผ่รังสีความร้อนไปยังบริเวณอุ่นไอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งอาจเกิดการกักเก็บความร้อน (Heat trapped) ภายในวัสดุพรุนมากเกินไป แสดงให้เห็นว่าหัวเตาแบบ SWB นั้นไม่จำเป็นต้องมีความหนาของหัวเตาที่มากก็สามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะแตกต่างจากหัวเตาประเภทวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด (เอกสารอ้างอิง 18-21) ที่จะต้องมีความหนาเฉลี่ยของหัวเตาที่ 3–5 cm จึงจะสามารถเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อิทธิพลของความหนาของชั้นตาข่ายสแตนเลส (H) ต่อปริมาณ CO ดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าเตาแก๊ส SWB08-01 (H = 1 cm) และ SWB08-02 (H = 2 cm) จะมีปริมาณ CO ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการเผาไหม้ของหัวเตาที่ทำการศึกษาล้วนมีความสมบูรณ์ไม่แตกต่างกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ามลพิษ CO กับหัวเตาประเภทวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด (เอกสารอ้างอิง 18-21) จะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่หัวเตาแบบ SWB ไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างที่หนาหรือหลายชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ $NO_X$ กลับพบสิ่งที่น่าสนใจ นั้นคือปริมาณ $NO_X$ แทบจะไม่มีหรือเกิดขึ้นน้อยมากและอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับปริมาณ $NO_X$ ในหัวเตาประเภทวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด (เอกสารอ้างอิง 18-21) โดยมีค่าสูงสุดไม่เกิน 25 ppm ทุกสภาวะและมีค่าใกล้เคียงกัน

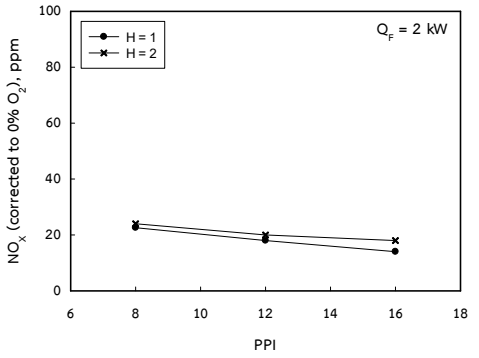
ทุกกรณี เนื่องจากกลไกการกระจายของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอของเตาแก๊สแบบ SWB ดังแสดงในรูปที่ 12




รูปที่ 10 อิทธิพลของ H ต่อ $\eta_{th}$ ที่ PPI =8, 12 และ 16



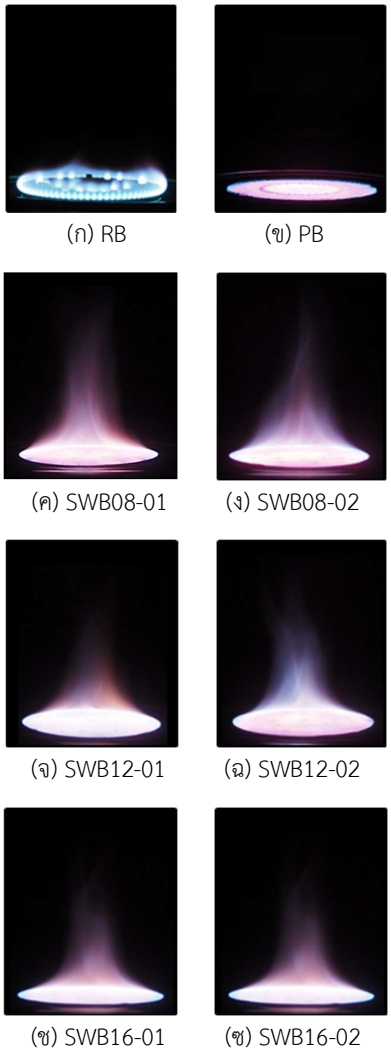

รูปที่ 11 อิทธิพลของ H ต่อ CO ที่ PPI =8, 12 และ 16




รูปที่ 12 อิทธิพลของ H ต่อ $NO_X$ ที่ PPI =8, 12 และ 16

*3.3 ลักษณะเปลวไฟ*

ลักษณะเปลวไฟที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 13




รูปที่ 13 ลักษณะเปลวไฟ

จากการสังเกตพบว่าลักษณะเปลวไฟของเตาแก๊สแบบ RB (รูปที่ 13 (ก)) จะมีลักษณะเปลวไฟสีฟ้าอย่างเด่นชัดและมีเปลวไฟพุ่งขึ้นเล็กน้อย ส่วนเปลวไฟของเตาแก๊สแบบ PB (รูปที่ 13 (ข)) จะมีลักษณะแบบไร้เปลวไฟ (Flameless) และไม่มีเปลวไฟพุ่งเป็นลำขึ้นไป สำหรับเปลวไฟของเตาแก๊สแบบ SWB ทั้ง 6 รูปแบบ (รูปที่ 13

(ค) - (ช)) มีรูปร่างเปลวไฟเป็น 2 ส่วน กล่าวคือส่วนแรกที่ผิวของวัสดุพรุนจะเป็นลักษณะไร้ เปลวไฟ (Flameless) เช่นเดียวกับเตาแก๊สแบบ PB และมีลักษณะเป็นสีแดงกระจายทั่วทั้งแผ่นวัสดุพรุน ขณะเดียวกันก็มีเปลวไฟอีกส่วนอยู่ด้านบนซึ่งมีลักษณะเป็นลำพุ่งขึ้นไป ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าลักษณะเปลวไฟของเตาแก๊สแบบ SWB เสมือนเป็นการรวมเอาเปลวไฟของเตาแก๊สแบบ RB และ PB เข้าด้วยกัน

## 4. สรุป

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส (SWB) สามารถสรุปได้ดังนี้

เตาแก๊ส SWB ทั้ง 6 รูปแบบ มีการกระจายเปลวไฟโดยมีรูปร่างแบ่งเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนแรกที่ผิวของวัสดุพรุนจะเป็นลักษณะไม่มีเปลวไฟ (Flameless) เช่นเดียวกับเตาแก๊สแบบ PB และมีลักษณะเป็นสีแดงกระจายทั่วทั้งแผ่นวัสดุพรุน นอกจากนี้ยังพบว่ามีเปลวไฟอีกส่วนอยู่ด้านบนซึ่งมีลักษณะเป็นลำพุ่งขึ้นไปคล้ายกับเตาแก๊สแบบ RB ด้วยเหตุนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าลักษณะเปลวไฟที่สังเกตได้จากเตาแก๊ส SWB นั้น เสมือนเป็นการรวมเอาเปลวไฟเตาแก๊ส แบบ PB และ RB เข้าด้วยกัน เตาแก๊ส SWB มีค่า $\eta_{th}$ สูงกว่าเตาแก๊สแบบ PB และ RB ทุกเงื่อนไขการทดลอง สำหรับ $\eta_{th}$ จะมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ $Q_F$ = 2 และ 3 kW และ H = 1 (SWBXX-01) และ 2 cm (SWBXX-02) ทุกกรณี โดยที่เตาแก๊สแบบ SWB08-01 (PPI = 8) จะมี $\eta_{th}$ สูงกว่า SWB12-01 (PPI=12) และ (SWB16-01) (PPI=16) ที่ 52.12%, 47.12% และ 46.07% ตามลำดับ ปริมาณ CO และ$NO_X$ ของเตาแก๊ส SWB ทั้ง 6 รูปแบบ มีจะมีค่าที่ต่ำคือไม่เกิน 220 และ 45 ppm ตามลำดับ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (Development in Technology of Porous Media Research Laboratory, DiTo-Lab) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เกี่ยวกับเครื่องมือวัด และสถานที่ในการทดลอง

## 6. เอกสารอ้างอิง

[1] Ministry of Industry. (2024, July 1). Industrial product standards for domestic cooking burners using liquefied petroleum gas. [Online]. Available: http://www.ratchakitcha.soc.go.th.

[2] Ministry of energy. (2024, July 1). Energy consumption data in Thailand [Online]. Available: http://www.energy.go.th.

[3] F. Weinberg, “Heat-recirculating burners: Principles and some recent developments,” *Combust. Sci. Technol.*, vol. 121, pp. 3–22, 1996.

[4] S. Jugjai and N. Rungsimuntuchart, “High efficiency heat-recirculating domestic gas burners,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 26, pp. 581–592, 2002.

[5] A. J. Barra and J. L. Ellzey, “Heat recirculation and heat transfer in porous burners,” *Combust. Flame*, vol. 137, pp. 230–241, 2004.

[6] J. Sunrui, D. Zhou, L. Jinsheng, M. Mingming and M. Xiaozhong, “Self-sustained stable combustion of off-gas from solid oxide fuel cell in a cone-shaped porous burner with preheaters,” *Energy*, vol. 312, p. 133566, 2024.

[7] E. F. Montoya, P. A. Masset, T. Schuller and L. Selle, “Speed-up drivers for enriched

flames in porous media burners," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 40, p. 105666, 2024.

[8] L. L. Dong, C. S. Cheung and C. W. Leung, "Heat transfer characteristics of a pair of impinging rectangular flame jets," *J. Heat Mass Transfer*, vol. 125, pp. 1140–1146, 2003.

[9] L. L. Dong, C. S. Cheung and C. W. Leung, "Heat transfer of three butane/air flame jets impinging on a flat plate," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46, pp. 113–125, 2003.

[10] L. L. Dong, C. S. Cheung and C. W. Leung, "Heat transfer and wall pressure characteristics of twin premixed butane/air flame jets," *J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp. 489–500, 2004.

[11] X. Q. Huang and C. W. Leung, "Thermal characteristics of premixed impinging circular laminar-flame jet with induced swirl," *Appl. Energy*, vol. 83, pp. 401–411, 2006.

[12] S. S. Hou, C. Y. Lee and T. H. Lin, "Efficiency and emissions of a new domestic gas burner with a swirling flame," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, pp. 1401–1410, 2007.

[13] H. S. Zhen, C. W. Leung and T. T. Wong, "Improvement of domestic cooking flames by utilizing swirling flows," *Fuel*, vol. 119, pp. 153–156, 2014.

[14] W. Yoksenakul, "Gas burner with heat circulation and swirling flow," M.Eng. thesis, Dept. Mech. Eng., King Mongkut's Univ. of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2005.

[15] V. K. Pantangi, A. S. S. R. Karuna Kumar, S. C. Mishra and N. Sahoo, "Performance analysis of domestic LPG cooking stoves with porous media," *Int. Energy J.*, vol. 8, pp. 139–144, 2007.

[16] V. K. Pantangi, S. C. Mishra, P. Muthukumar and R. Reddy, "Studies on porous radiant burners for LPG (liquefied petroleum gas) cooking applications," *Energy*, vol. 36, pp. 6074–6080, 2011.

[17] P. Muthukumar and P. I. Shyamkumar, "Development of novel porous radiant burners for LPG cooking applications," *Int. J. Fuel*, vol. 112, pp. 562–566, 2013.

[18] J. Conepo, S. Chotikorn and W. Cokhuntad, "Domestic cooking burner of open cellular porous media," B.Eng. thesis, Dept. Mech. Eng., Rajamangala Univ. of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2010.

[19] N. Phetsaen and M. Mingsaeng, "Open cellular metal porous media household gas stove domestic cooking burner," B.Eng. thesis, Dept. Mech. Eng., Rajamangala Univ. of Technology Isan, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2011.

[20] U. Makmool and N. Wongyao, "Design and development of an atmospheric radiant burner for hydrogen production fueled by ethanol," in *Proc. 36th Conf. Mech. Eng. Network Thailand (ME-NETT)*, Nakhon Pathom, Thailand, 2021, pp. 92–99.

[21] A. K. Makalingam, L. K. Kaushik and P. Muthukumar, "Experimental and numerical study of lean combustion of propane in divergent porous media burners," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 67, p. 103822, 2024.

Srinakharinwirot University Engineering Journal (2025) 21(2), 98-109 วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

# ปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอเมืองจังหวัดเพชรบูรณ์: การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

# Success Factors in Construction Management of Local Administrative Organizations in Mueang District, Phetchabun Province: an Exploratory Factor Analysis

พัฒน สุวรรณสัมฤทธิ์* จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Pattana Suwansumrit* Jakrapong Pongpeng
Department of Civil Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
*Corresponding author Email: 64601098@KMITL.AC.TH
(Received: July 3, 2025; Revised: September 29, 2025 ; Accepted: October 16, 2025)

**บทคัดย่อ**

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ กับกลุ่มตัวอย่างที่เกี่ยวข้องทั้งภาครัฐและภาคเอกชนจำนวน 240 คน เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือแบบสอบถาม และใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ และการทดสอบ Mann-Whitney U เพื่อเปรียบเทียบความเห็นระหว่างกลุ่ม ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยความสำเร็จสามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) การบริหารภาพรวม 2) การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง 3) การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก และ 4) การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ รวมทั้งสิ้น 12 ปัจจัยย่อย นอกจากนี้ยังพบว่ามีความแตกต่างทางความคิดเห็นระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนในหลายปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้อค้นพบนี้สะท้อนให้เห็นถึงแนวทางการออกแบบระบบบริหารโครงการก่อสร้างที่ควรคำนึงถึงลักษณะเฉพาะของแต่ละภาคส่วน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของโครงการในระดับท้องถิ่น

**คำสำคัญ:** การบริหารงานก่อสร้าง องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

**ABSTRACT**

This study aims to examine the success factors in construction project management of local administrative organizations in Mueang District, Phetchabun Province, using Exploratory Factor Analysis (EFA). The sample consisted of 240 respondents from both public and private sectors. A questionnaire was employed as the research instrument, and data were analyzed using descriptive statistics, EFA, and the Mann-Whitney U test for comparing group perceptions. The findings revealed four major groups of

success factors: (1) overall project management, (2) scope and risk management, (3) core objective management, and (4) supportive management functions, comprising a total of 12 sub-factors. Additionally, significant differences in perspectives between the public and private sectors were identified in several aspects. These findings highlight the importance of designing construction management systems that account for sector-specific characteristics to enhance the efficiency and sustainability of local projects.

**Keyword:** Construction Management, Local Administrative Organization, Exploratory Factor Analysis

## 1. บทนำ

องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและบริการสาธารณะ เช่น ถนน สะพาน ระบบระบายน้ำ และอาคารสาธารณะ เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนโดยตรง อย่างไรก็ตาม การบริหารโครงการก่อสร้างในภาคราชการยังเผชิญปัญหา เช่น งบประมาณจำกัด บุคลากรขาดความเชี่ยวชาญ ขั้นตอนจัดซื้อจัดจ้างที่ซับซ้อน และการควบคุมคุณภาพที่ไม่ทั่วถึง ส่งผลให้โครงการบางส่วนล่าช้า หรือไม่เป็นไปตามมาตรฐาน การบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพและโปร่งใสจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จของโครงการก่อสร้างในระดับท้องถิ่น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายด้าน ทั้งเชิงยุทธศาสตร์ การปฏิบัติงาน และปัจจัยสนับสนุน โดยเฉพาะความสามารถในการวางแผนที่เหมาะสม การกำหนดขอบเขตงานอย่างชัดเจน การควบคุมต้นทุนและเวลา การจัดการความเสี่ยงที่อาจส่งผลต่อการดำเนินงาน รวมถึงการสื่อสารและประสานงานระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่องและโปร่งใส งานวิจัยหลายฉบับยังชี้ว่า ระดับความสำคัญของปัจจัยเหล่านี้อาจแตกต่างกันระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน เนื่องจากลักษณะการบริหารจัดการ ทรัพยากร และกฎระเบียบที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้น การทำความเข้าใจปัจจัยความสำเร็จของโครงการก่อสร้างอย่างเป็นระบบจึงมีความจำเป็น เพื่อให้สามารถนำไปพัฒนาระบบการบริหารจัดการโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับบริบทขององค์กร และเพิ่มโอกาสในการบรรลุผลลัพธ์ตามเป้าหมาย [3], [4], [5]

การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ เพื่อจำแนกกลุ่มปัจจัยความสำเร็จของโครงการ รวมถึงเปรียบเทียบมุมมองของภาครัฐและภาคเอกชนต่อปัจจัยเหล่านั้น ผลการวิจัยจะช่วยเสนอแนะแนวทางในการวางระบบการบริหารงานก่อสร้างที่ตอบสนองบริบทเฉพาะของท้องถิ่น และสร้างความยั่งยืนในการดำเนินโครงการสาธารณะต่อไป

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การบริหารงานก่อสร้าง (Construction Management) คือกระบวนการที่ประกอบด้วยการวางแผน การดำเนินการ การควบคุม และการประเมินโครงการอย่างเป็นระบบ เพื่อให้โครงการบรรลุตามวัตถุประสงค์ภายในกรอบเวลา งบประมาณ และคุณภาพตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ [1], [3] โดยเฉพาะในบริบทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ซึ่งต้องดำเนินการภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากร บุคลากร และนโยบายภาครัฐ จึงจำเป็นต้องบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสำเร็จของการบริหารโครงการ เช่น โมเดล SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) และการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

(AHP) ถูกนำมาใช้ในการประเมินความสำเร็จของโครงการก่อสร้าง โดยเน้นการวิเคราะห์กระบวนการและผลลัพธ์อย่างเป็นระบบ ซึ่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมและติดตามโครงการ [4] และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสำเร็จของโครงการ ได้แก่ การบริหารทรัพยากรบุคคล การจัดองค์กร และประสบการณ์ของทีมงาน [5]

งานวิจัยในประเทศไทย [6] ระบุว่า การบริหารงานก่อสร้างขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่นต้องเผชิญปัญหาด้านบุคลากร งบประมาณ และความซับซ้อนของโครงการ จึงเสนอให้พัฒนาศักยภาพบุคลากรอย่างต่อเนื่องและใช้เทคโนโลยีเพื่อสนับสนุนการวางแผนและควบคุมโครงการ นอกจากนี้ ความสำเร็จของโครงการยังขึ้นอยู่กับการวางแผนทางการเงิน สภาพคล่องของผู้รับเหมา การควบคุมคุณภาพ และความร่วมมือของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง เช่น เจ้าของงาน ผู้ออกแบบ และผู้จัดการโครงการ [6], [7]

ปัจจัยสำคัญที่มักถูกเน้นในงานวิจัย ได้แก่ การวางแผน (Planning), การจัดการความเสี่ยง (Risk Management), การสื่อสาร (Communication), การควบคุมต้นทุน และการบริหารทรัพยากรมนุษย์ ซึ่งล้วนเป็นองค์ประกอบหลักของการบริหารโครงการที่มีประสิทธิภาพในภาครัฐและเอกชน [7], [8]

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการบริหารงานก่อสร้างในระดับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นถือเป็นภารกิจที่ต้องใช้ความสามารถในการบริหารโครงการเชิงบูรณาการ โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ ซึ่งในงานวิจัยนี้จำแนกออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก ดังนี้

1) การบริหารภาพรวม (Integration Management)

แนวคิดด้านการบริหารภาพรวมสอดคล้องกับหลักการของ Kerzner [3] ที่เสนอว่าการบริหารโครงการที่มีประสิทธิภาพต้องประกอบด้วยการวางแผน การดำเนินงาน และการควบคุมอย่างบูรณาการ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของกระบวนการบริหารจัดการ ทั้งนี้ การวางแผนเป็นกลไกเริ่มต้นในการกำหนดเป้าหมาย กลยุทธ์ และทรัพยากรของโครงการ ในขณะที่การดำเนินงานเกี่ยวข้องกับการจัดองค์กร การสื่อสาร และการติดตามความก้าวหน้า ส่วนการควบคุมเน้นที่การประเมินผล ปรับปรุง และบริหารความเสี่ยงเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ

2) การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง (Scope and Risk Management)

การกำหนดขอบเขตงานที่ชัดเจนถือเป็นรากฐานสำคัญของการบริหารโครงการ ตามแนวคิดของ Turner [5] และสันติ ชินานุวัติวงศ์ [6] ซึ่งระบุว่า การควบคุมขอบเขตและการจัดการความเสี่ยงเป็นกลยุทธ์สำคัญที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากแผนงานที่วางไว้ การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินโครงการควรได้รับการประเมินผลกระทบ และมีการวางแผนรับมืออย่างเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดต้นทุนแฝงและปัญหาทางเทคนิคที่ตามมา

3) การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก (Core Objective Management)

การบริหารเวลา ต้นทุน และคุณภาพ เป็นกรอบแนวคิดพื้นฐานที่เรียกว่า Project Management Triangle ซึ่งเสนอโดย Project Management Institute (PMI) [4] โดยเน้นว่าความสำเร็จของโครงการขึ้นอยู่กับการควบคุมสมดุลของทั้งสามปัจจัยนี้ หากปรับเปลี่ยนปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง จะส่งผลกระทบต่ออีกสองด้านโดยอัตโนมัติ ตัวอย่างเช่น การเร่งระยะเวลาการดำเนินโครงการอาจทำให้ต้นทุนสูงขึ้นหรือคุณภาพลดลง ดังนั้นผู้บริหารโครงการต้องสามารถวางแผนและตัดสินใจอย่างรอบคอบเพื่อรักษาสมดุลนี้ให้ได้

4) การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ (Supportive Management)

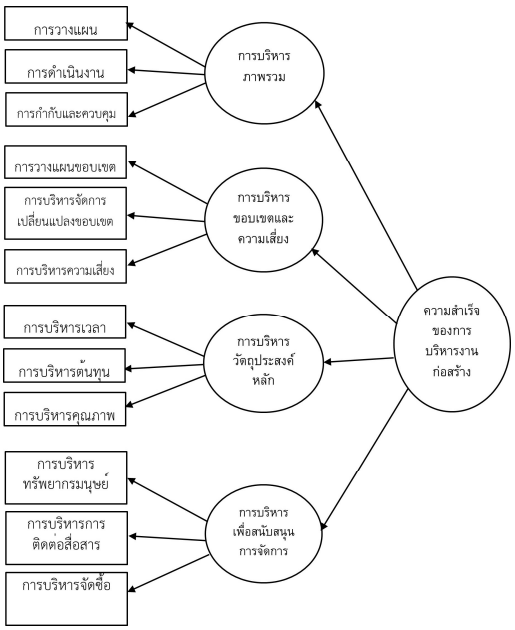
Cleland & Ireland [7] ได้ชี้ว่าองค์ประกอบสนับสนุน เช่น การบริหารทรัพยากรมนุษย์ การสื่อสารภายในทีม และกระบวนการจัดซื้อจัดจ้าง เป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความสำเร็จของโครงการ โดยเฉพาะในบริบทขององค์กรราชการที่มี

โครงสร้างซับซ้อน การมีระบบการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและการพัฒนาศักยภาพบุคลากรอย่างต่อเนื่อง เป็นสิ่งจำเป็นในการสร้างความร่วมมือและประสิทธิผลในการดำเนินงาน

งานวิจัยที่สนับสนุนกรอบแนวคิดในการวิเคราะห์ปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างในบริบทขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ซึ่งภายใต้บริบทเฉพาะของอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่มีลักษณะโครงสร้างอำนาจหน้าที่ และข้อจำกัดทางทรัพยากรที่แตกต่าง การทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจึงมีนำไปสู่การสร้างกรอบแนวคิดวิจัยที่สามารถประเมินปัจจัยความสำเร็จได้อย่างเหมาะสม

## 3. กรอบแนวคิดและสมมติฐานการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถจำแนกปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยของความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้าง ผู้วิจัยกำหนดกรอบแนวคิดการวิจัยปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1




รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากกรอบแนวคิดการวิจัย ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์จำแนกกลุ่มปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และมีวัตถุประสงค์ต้องการเปรียบเทียบความคิดเห็นของเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนต่อปัจจัยความสำเร็จที่สำคัญของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ดังนั้นงานวิจัยนี้กำหนดสมมติฐานการวิจัยไว้ดังนี้:

สมมติฐานที่ 1: ปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มปัจจัยที่ชัดเจนโดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ

สมมติฐานที่ 2: มุมมองของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องจากภาครัฐและภาคเอกชนต่อปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## 4. ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) โดยใช้วิธีการเชิงสำรวจ (Survey Method) เพื่อศึกษาปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทั้งนี้มีการพัฒนาแบบสอบถามที่ครอบคลุม 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ การบริหารภาพรวม การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก และการบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ โดยใช้มาตรวัดแบบลิเคิร์ท 5 ระดับ

*4.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง*

ประชากรของการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย 2 กลุ่มหลัก ได้แก่

1) บุคลากรภาครัฐที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการบริหารโครงการก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ได้แก่ ผู้บริหาร อปท. ปลัด อปท. ผู้อำนวยการกองช่าง ผู้อำนวยการกองคลัง ช่างโยธา และเจ้าหน้าที่พัสดุ

2) ผู้รับจ้างภาคเอกชนที่มีสัญญาก่อสร้างกับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในพื้นที่ดังกล่าวในช่วงปีงบประมาณที่ศึกษา ได้แก่ ผู้บริหารบริษัทรับเหมา ช่างโยธา วิศวกรโครงการ สถาปนิก ผู้จัดการโครงการ และวิศวกรสนาม

เนื่องจากไม่มีข้อมูลจำนวนประชากรที่เปิดเผยอย่างเป็นทางการ การวิจัยนี้จึงใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ร่วมกับวิธีการกำหนดโควตา (Quota Sampling) โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่มในสัดส่วนที่เท่ากัน ได้แก่

1) ภาครัฐ จำนวน 120 คน โดยกำหนดโควตาพื้นฐาน 10 คนต่อ 1 องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น สำหรับทั้ง 19 แห่ง ในพื้นที่ศึกษา เพื่อให้ครอบคลุมบทบาทหน้าที่ที่หลากหลายในการบริหารโครงการก่อสร้าง

2) ภาคเอกชน จำนวน 120 คน โดยคัดเลือกผู้รับจ้างก่อสร้างตาม ประเภทของงาน และมูลค่าสัญญาในปีงบประมาณที่ศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนมุมมองของทุกกลุ่มผู้ประกอบการอย่างหลากหลาย

รวมกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดทั้งสิ้น 240 คน ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ และเป็นไปตามข้อเสนอของ Hair et al. [2] ที่แนะนำให้มีจำนวนกลุ่มตัวอย่างไม่น้อยกว่า 5 - 10 เท่าของตัวแปรที่ศึกษา และไม่น้อยกว่า 100 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีความเชื่อถือได้และเสถียร

*4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย*

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือ แบบสอบถาม (Questionnaire) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1: ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม (เพศ อายุ ระดับการศึกษา ตำแหน่ง ประสบการณ์ และมูลค่าการดำเนินงานขององค์กร)

ส่วนที่ 2: ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้าง แบ่งออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก และมีปัจจัยย่อยรวม 36 รายการ โดยใช้มาตรวัดอัตราส่วน 5 ระดับของลิเคิร์ท

*4.3 การตรวจสอบความเชื่อถือได้ของเครื่องมือ*

แบบสอบถามได้รับการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่านที่มีประสบการณ์ในด้านการบริหารงานก่อสร้าง ประกอบด้วย (1) ข้าราชการระดับชำนาญการพิเศษที่มีประสบการณ์ด้านบริหารโครงการก่อสร้างกว่า 20 ปี (2) ผู้บริหารบริษัทรับเหมาก่อสร้างเอกชนที่มีประสบการณ์มากกว่า 15 ปี และ (3) อาจารย์มหาวิทยาลัยผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการโครงการ ซึ่งทั้งหมดมีคุณวุฒิระดับปริญญาโทขึ้นไปในสาขาวิศวกรรมโยธาหรือการบริหารโครงการ และได้ทดสอบความเชื่อมั่น (Reliability Test) โดยใช้ Cronbach's Alpha จากกลุ่มตัวอย่างนำร่อง 30 ชุด ผลการทดสอบพบว่าค่าความเชื่อมั่นของแบบสอบถามในส่วนของภาครัฐมีค่าเท่ากับ 0.953 และภาคเอกชนเท่ากับ 0.972 แสดงว่าเครื่องมือมีความเชื่อถือได้ในระดับสูง

*4.4 การรวบรวมข้อมูล*

การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการภายในระยะเวลา 2 เดือน โดยใช้การแจกแบบสอบถามด้วยตนเอง (self-administered questionnaire) ให้กับกลุ่มตัวอย่างจากทั้งสองภาคส่วนในเขตอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ รวมจำนวน 240 ชุด ได้รับคืนครบ 100% (120 ชุดจากภาครัฐ และ 120 ชุดจากภาคเอกชน)

*4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล*

การวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น (Descriptive Statistics) โดยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อแสดงแนวโน้มความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างในแต่ละประเด็นเกี่ยวกับปัจจัยความสำเร็จในการบริหารงานก่อสร้าง

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis: EFA) โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) ร่วมกับการหมุนแกนออร์โธโกนัลแบบ

Varimax เพื่อจำแนกกลุ่มของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กัน และจัดกลุ่มเป็นปัจจัยหลักที่สะท้อนความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้าง โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกองค์ประกอบที่มีค่า Eigenvalue มากกว่า 1 และพิจารณาน้ำหนักองค์ประกอบ (Factor Loading) ที่มากกว่า 0.50 เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกตัวแปรในแต่ละองค์ประกอบ

ทั้งนี้ในการตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลจะทำโดยใช้ค่า KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) ซึ่งควรมีค่าไม่น้อยกว่า 0.60 และ Bartlett's Test ซึ่งต้องมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เพื่อยืนยันความเหมาะสมของข้อมูลในการวิเคราะห์องค์ประกอบ

3) การเปรียบเทียบความคิดเห็นระหว่างกลุ่ม (Inferential Statistics) ใช้สถิติ Mann-Whitney U Test ในการเปรียบเทียบความคิดเห็นระหว่างกลุ่มตัวอย่างภาครัฐและภาคเอกชนในแต่ละประเด็น เพื่อทดสอบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05

## 5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง ทั้งกลุ่มเจ้าของโครงการภาครัฐและกลุ่มผู้รับจ้างภาคเอกชน โดยผลการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) คุณลักษณะเฉพาะของกลุ่มตัวอย่าง (2) การจำแนกกลุ่มปัจจัยความสำเร็จในการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และ (3) การเปรียบเทียบความคิดเห็นระหว่างทั้งสองกลุ่มตัวอย่าง

*5.1 คุณลักษณะเฉพาะของกลุ่มตัวอย่าง*

กลุ่มตัวอย่างภาครัฐส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (61.7%) และมีอายุระหว่าง 51 - 60 ปี (49.2%) ขณะที่ภาคเอกชนส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (95.8%) และมีอายุระหว่าง 41 - 50 ปี (43.3%) ในด้านระดับการศึกษา ภาครัฐส่วนใหญ่จบปริญญาตรี (56.7%) ส่วนภาคเอกชนมีสัดส่วนสูงสุดในระดับปริญญาโท (55.0%) ด้านตำแหน่งงาน กลุ่มตัวอย่างภาครัฐส่วนใหญ่มีตำแหน่งเป็นผู้บริหาร ปลัด ผู้อำนวยการกองช่าง ผู้อำนวยการกองคลัง ช่างโยธา และเจ้าหน้าที่พัสดุ (16.7%) ในขณะที่ภาคเอกชน มีตำแหน่งเป็นผู้บริหารบริษัทรับเหมา ช่างโยธา วิศวกรโครงการ สถาปนิก ผู้จัดการโครงการ และวิศวกรสนาม (16.7%)

นอกจากนี้กลุ่มตัวอย่างภาครัฐส่วนใหญ่มีประสบการณ์ทำงานมากกว่า 20 ปี (42.5%) ในขณะที่ภาคเอกชนมีช่วงประสบการณ์ระหว่าง 11 - 15 ปี มากที่สุด (48.3%) ส่วนด้านมูลค่าการดำเนินการต่อปี พบว่าภาครัฐส่วนใหญ่มีมูลค่าโดยประมาณที่ดำเนินการต่อปีต่ำกว่า 50 ล้านบาท (66.7%) ในขณะที่ภาคเอกชนส่วนใหญ่มีมูลค่าการดำเนินงานต่อปีอยู่ระหว่าง 100.1 - 150 ล้านบาท (73.3%)

*5.2 การจำแนกกลุ่มปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น*

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (EFA) เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น พบว่าข้อมูลมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ โดยค่า KMO มีค่าเท่ากับ 0.951 และผลการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity มีค่า Sig. = 0.000 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความสัมพันธ์กันเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ โดยปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มปัจจัยที่ชัดเจน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยข้อ 1

ผลการวิเคราะห์สามารถจำแนกปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก รวมทั้งหมด 12 ตัวแปรย่อย ได้แก่

ปัจจัยหลักที่ 1 การบริหารภาพรวม ประกอบด้วย 3 ปัจจัยย่อย ได้แก่ การวางแผน การดำเนินงาน และการกำกับและควบคุม ซึ่งองค์ประกอบนี้สะท้อนถึงความสามารถในการวางกรอบการดำเนินงาน การจัดองค์กร และการควบคุมคุณภาพของงานก่อสร้าง

ปัจจัยหลักที่ 2 การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง ประกอบด้วย 3 ปัจจัยย่อย ได้แก่ การวางแผนขอบเขตงาน การบริหารการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน และการบริหารความเสี่ยง โดยองค์ประกอบนี้จะแสดงให้เห็นถึง

ความสามารถในการควบคุมเนื้องานของโครงการ และการเตรียมพร้อมรับมือกับความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้น

ปัจจัยหลักที่ 3 การบริหารด้านวัตถุประสงค์หลัก ประกอบด้วย 3 ปัจจัยย่อย ได้แก่ การบริหารเวลา การบริหารต้นทุน และการบริหารคุณภาพ ซึ่งองค์ประกอบนี้จะสะท้อนถึงการควบคุมปัจจัยพื้นฐานของความสำเร็จของโครงการ คือ งบประมาณ เวลา และคุณภาพ

ปัจจัยหลักที่ 4 การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ ประกอบด้วย 3 ปัจจัยย่อย ได้แก่ การบริหารทรัพยากรมนุษย์ การบริหารการติดต่อสื่อสาร และการบริหารการจัดซื้อจัดจ้าง ทั้งนี้องค์ประกอบนี้แสดงให้เห็นถึงระบบสนับสนุนที่ช่วยให้การดำเนินงานของโครงการเป็นไปได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ

จากตารางที่ 1 พบว่าปัจจัยย่อยของปัจจัยหลักการบริหารภาพรวม มีน้ำหนักองค์ประกอบมากกว่า 0.60 ทุกตัวแปร และมีค่า KMO เข้าใกล้ 1 (KMO = 0.814) และจากการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่ามีนัยสำคัญ (Chi-Square = 1483.478, df = 36, P-Value < 0.05) แสดงว่าตัวแปรของปัจจัยย่อยมีความสัมพันธ์กันมากพอ มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ สามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยย่อยได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 การวางแผน ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การวางแผนเวลาและปริมาณงาน การวางแผนทรัพยากร และการวางแผนงบประมาณ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.815 - 0.861

กลุ่มที่ 2 การดำเนินงาน ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การจัดองค์กรและทรัพยากร การประสานงานและสื่อสาร และการติดตามความก้าวหน้าและประเมินผล มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.852 - 0.895

กลุ่มที่ 3 การกำกับและควบคุม ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การติดตามความก้าวหน้าและประเมินผล การจัดการความเสี่ยง และการปรับปรุงกระบวนการ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.836 - 0.926

ตารางที่ 1 ค่าน้ำหนักปัจจัยของปัจจัยหลักการบริหารภาพรวม

| ปัจจัยหลัก | ปัจจัยย่อย | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| การบริหารภาพรวม | การวางแผน | การดำเนินงาน | การกำกับและควบคุม |
| การวางแผนเวลาและปริมาณงาน | .861 | | |
| การวางแผนทรัพยากร | .844 | | |
| การวางแผนงบประมาณ | .815 | | |
| การจัดองค์กรและทรัพยากร | | .895 | |
| การประสานงานและสื่อสาร | | .858 | |
| การติดตามความก้าวหน้าและประเมินผล | | .852 | |
| การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ | | | .844 |
| การจัดการความเสี่ยง | | | .926 |
| การปรับปรุงกระบวนการ | | | .836 |

จากตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยย่อยของปัจจัยหลักการบริหารขอบเขตและความเสี่ยง มีน้ำหนักองค์ประกอบมากกว่า 0.70 ทุกตัวแปร และมีค่า KMO เข้าใกล้ 1 (KMO = 0.816) และจากการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่ามีนัยสำคัญ (Chi-Square = 2213.294, df = 36, P-Value < 0.05) แสดงว่าตัวแปรของปัจจัยย่อยมีความสัมพันธ์กันมากพอ มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ สามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยย่อยได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 การวางแผนขอบเขตงาน ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะ การพิจารณาโครงการในระยะยาว และการกำหนดขอบเขตงานโครงการ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.848 - 0.889

กลุ่มที่ 2 การบริหารการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การรับรู้คำขอเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน การประเมินผลกระทบการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน และการใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงการ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.862 - 0.905

กลุ่มที่ 3 การกำกับและควบคุม ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การประเมินความเสี่ยง การหลีกเลี่ยงความเสี่ยง และการติดตามและประเมินผล มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.747 - 0.894

จากตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยย่อยของปัจจัยหลักการบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก มีน้ำหนักองค์ประกอบมากกว่า 0.70 ทุกตัวแปร และมีค่า KMO เข้าใกล้ 1 (KMO = 0.817) และจากการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่ามีนัยสำคัญ (Chi-Square = 1491.928, df = 36, P-Value < 0.05) แสดงว่าตัวแปรของปัจจัยย่อยมีความสัมพันธ์กันดีมาก มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ สามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยย่อยได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 การบริหารเวลา ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การกำหนดเป้าหมายการดำเนินงาน การจัดลำดับความสำคัญของงาน และการกำหนดเวลาในการทำงาน มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.807 - 0.904

กลุ่มที่ 2 การบริหารต้นทุน ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การวางแผนงบประมาณ การประเมินค่าใช้จ่ายโครงการ และการควบคุมต้นทุน มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.793 - 0.893

กลุ่มที่ 3 การบริหารคุณภาพ ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การกำหนดมาตรฐานคุณภาพ การติดตามและตรวจสอบ และการประเมินผลและปรับปรุงคุณภาพ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.807-0.917

ตารางที่ 2 ค่าน้ำหนักปัจจัยของปัจจัยหลักการบริหารขอบเขตและความเสี่ยง

| ปัจจัยหลัก | ปัจจัยย่อย | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง | การวางแผนขอบเขตงาน | การบริหารการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน | การบริหารความเสี่ยง |
| การกำหนดวัตถุประสงค์เฉพาะ | .878 | | |
| การพิจารณาโครงการระยะยาว | .889 | | |
| การกำหนดขอบเขตงานโครงการ | .848 | | |
| การรับรู้คำขอเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน | | .862 | |
| การประเมินผลการเปลี่ยนแปลงขอบเขตงาน | | .903 | |
| การใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงการ | | .905 | |
| การประเมินความเสี่ยง | | | .747 |
| การหลีกเลี่ยงความเสี่ยง | | | .894 |
| การติดตามและประเมินผล | | | .846 |

จากตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยย่อยของปัจจัยหลักการบริหารเพื่อสนับสนุนการจัดการมีน้ำหนักองค์ประกอบมากกว่า 0.70 ทุกตัวแปร และมีค่า KMO เข้าใกล้ 1 (KMO = 0.794) และจากการทดสอบ Bartlett's Test of Sphericity พบว่ามีนัยสำคัญ (Chi-Square = 1778.751, df = 36, P-Value < 0.05) แสดงว่าตัวแปรของปัจจัยย่อยมีความสัมพันธ์กันดีมาก มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ สามารถแบ่งกลุ่มปัจจัยย่อยได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 การบริหารทรัพยากรมนุษย์ ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การพัฒนาบุคลากรอย่างต่อเนื่อง

การประเมินผลการปฏิบัติงาน และการสร้างแรงจูงใจ มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.869 - 0.949

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักปัจจัยของปัจจัยหลักการบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก

| ปัจจัยหลัก | ปัจจัยย่อย | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก | การบริหารเวลา | การบริหารต้นทุน | การบริหารคุณภาพ |
| การกำหนดเป้าหมายการดำเนินงาน | .861 | | |
| การจัดลำดับความสำคัญของงาน | .904 | | |
| การกำหนดเวลาในการทำงาน | .807 | | |
| การวางแผนงบประมาณ | | .853 | |
| การประเมินค่าใช้จ่ายโครงการ | | .893 | |
| การควบคุมต้นทุน | | .793 | |
| การกำหนดมาตรฐานคุณภาพ | | | .807 |
| การติดตามและตรวจสอบ | | | .917 |
| การประเมินผลและปรับปรุงคุณภาพ | | | .855 |

กลุ่มที่ 2 การบริหารการติดต่อสื่อสาร ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การสื่อสารที่เปิดเผยและโปร่งใส การรับฟังความคิดเห็นของทีม และการใช้เทคโนโลยีในการสื่อสาร มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.853 - 0.915

กลุ่มที่ 3 การบริหารจัดซื้อจัดจ้าง ประกอบด้วย 3 ตัวแปร จัดกลุ่มได้เป็น การวางแผนการจัดซื้อจัดจ้าง การควบคุมงบประมาณ และการประเมินและคัดเลือกผู้รับจ้าง มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบระหว่าง 0.906 - 0.922

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักปัจจัยของปัจจัยหลักการบริหารเพื่อสนับสนุนการจัดการ

| ปัจจัยหลัก | ปัจจัยย่อย | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| การบริหารเพื่อสนับสนุนการจัดการ | การบริหารทรัพยากรมนุษย์ | การบริหารการติดต่อสื่อสาร | การบริหารจัดซื้อจัดจ้าง |
| การพัฒนาบุคลากรอย่างต่อเนื่อง | .941 | | |
| การประเมินผลการปฏิบัติงาน | .949 | | |
| การสร้างแรงจูงใจ | .869 | | |
| การสื่อสารที่เปิดเผยและโปร่งใส | | .896 | |
| การรับฟังความคิดเห็นของทีม | | .915 | |
| การใช้เทคโนโลยีในการสื่อสาร | | .853 | |
| การวางแผนการจัดซื้อจัดจ้าง | | | .922 |
| การควบคุมงบประมาณ | | | .913 |
| การประเมินและคัดเลือกผู้รับจ้าง | | | .906 |

*5.3 การเปรียบเทียบความคิดเห็นระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน*

การทดสอบความแตกต่างของความคิดเห็นระหว่างเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนในแต่ละปัจจัยหลัก ได้ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Mann–Whitney U Test ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปัจจัยหลักที่แตกต่างกันระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน (ค่าเฉลี่ย และ Mann–Whitney U Test)

| ปัจจัยหลัก | ค่าเฉลี่ย (ภาครัฐ) | ค่าเฉลี่ย (เอกชน) | Sig. (p-value) |
|---|---|---|---|
| 1. การบริหารภาพรวม | 4.56 | 4.45 | .012* |
| 2. การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง | 4.33 | 4.43 | .035* |
| 3. การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก | 4.50 | 4.76 | .000** |
| 4. การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ | 4.27 | 4.61 | .000** |

**หมายเหตุ** **มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01
*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

จากตารางที่ 5 พบว่า ทั้ง 4 ปัจจัยหลักมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างภาครัฐและภาคเอกชน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานการวิจัยข้อ 2 พบว่า มุมมองของเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนต่อปัจจัยหลักด้านการบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าคะแนนเฉลี่ยต่างกันมากที่สุด อย่างมีนัยสำคัญระดับ .01 (ภาครัฐ = 4.27, เอกชน = 4.61, p = .000) ซึ่งแสดงถึงความตระหนักที่แตกต่างกันในเรื่องการจัดซื้อจัดจ้าง การสื่อสาร และการบริหารทรัพยากรมนุษย์ ส่วนมุมมองของเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนต่อปัจจัยหลักการบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 (ภาครัฐ = 4.50, เอกชน = 4.76, p = .000) และมุมมองของเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนต่อปัจจัยหลักการบริหารขอบเขตและความเสี่ยง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 (ภาครัฐ = 4.33, เอกชน = 4.43, p = .035) ซึ่งทั้งสองภาคส่วนมีความเห็นแตกต่างกันชัดเจน โดยภาคเอกชนให้ความสำคัญมากกว่า และในขณะที่มุมมองของเจ้าของโครงการภาครัฐและผู้รับจ้างภาคเอกชนต่อปัจจัยหลักการบริหารภาพรวม แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 (ภาครัฐ = 4.56, เอกชน = 4.45, p = .012) ซึ่งแม้ว่าภาครัฐจะให้คะแนนเฉลี่ยสูงกว่าภาคเอกชนในปัจจัยด้านนี้ แต่ผลวิเคราะห์ก็ยังชี้ว่ามีความเห็นแตกต่างกันระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนอย่างชัดเจน

## 6. สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยในครั้งนี้สามารถจำแนกปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ออกเป็น 4 ปัจจัยหลัก ได้แก่ (1) การบริหารภาพรวม (2) การบริหารขอบเขตและความเสี่ยง (3) การบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก และ (4) การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ ซึ่งครอบคลุมถึง 12 ตัวแปรย่อย สอดคล้องกับแนวคิดของ Kerzner [3] และ PMI [4] ที่ระบุว่าการบริหารโครงการที่มีประสิทธิภาพต้องบูรณาการระหว่างการวางแผน การดำเนินงาน และการควบคุม เพื่อรักษาความสมดุลระหว่างเวลา งบประมาณ และคุณภาพของโครงการ

ในด้านการบริหารภาพรวม ภาครัฐให้ความสำคัญมากกว่าภาคเอกชน ซึ่งอาจสะท้อนถึงลักษณะการบริหารที่ยึดตามระเบียบแบบแผนของภาคราชการ การวางแผนทรัพยากรและการควบคุมคุณภาพเป็นประเด็นที่มีน้ำหนักองค์ประกอบสูง แสดงถึงความสำคัญในการสร้างกรอบแนวทางที่ชัดเจนสำหรับการดำเนินโครงการ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการวางแผนและการจัดองค์กรอย่างมีระบบในบริบทของหน่วยงานภาครัฐ [1]

สำหรับการบริหารขอบเขตและความเสี่ยง ภาคเอกชนให้คะแนนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถตีความได้ว่าองค์กรเอกชนมีแนวโน้มที่จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงและความไม่แน่นอนได้ดีขึ้น โดยเฉพาะในมิติของการประเมินผลกระทบและการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ความเสี่ยง แนวโน้มนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ

Turner [5] และสันติ ชินานุวัติวงศ์ [6] ที่เน้นถึงความสำคัญของการควบคุมขอบเขตงานและการบริหารความเสี่ยงเพื่อหลีกเลี่ยงต้นทุนแฝงและปัญหาการบริหารที่ไม่คาดคิด

ในด้านการบริหารตามวัตถุประสงค์หลัก ทั้งสองภาคส่วนให้ความสำคัญสูง สะท้อนถึงความเข้าใจร่วมกันเกี่ยวกับบทบาทสำคัญของการควบคุมเวลา งบประมาณ และคุณภาพ ซึ่งเป็นสามปัจจัยหลักของ Project Management Triangle (PMI) [4] อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์พบว่าภาคเอกชนมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าภาครัฐอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงถึงการให้ความสำคัญกับประสิทธิผลของผลลัพธ์มากกว่ากระบวนการ

ปัจจัยที่มีความแตกต่างชัดเจนที่สุดคือ การบริหารเพื่อการสนับสนุนการจัดการ ซึ่งภาคเอกชนให้ความสำคัญสูงกว่าภาครัฐอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกมิติ โดยเฉพาะด้านการบริหารทรัพยากรมนุษย์ การสื่อสาร และการจัดซื้อจัดจ้าง ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ Cleland & Ireland [7] ระบุว่าเป็นกลไกสนับสนุนหลักในการขับเคลื่อนโครงการให้บรรลุเป้าหมาย ความตระหนักของภาคเอกชนในประเด็นเหล่านี้สะท้อนถึงความจำเป็นในการบริหารจัดการแบบยืดหยุ่น โปร่งใส และมุ่งเน้นผลลัพธ์ รวมถึงเน้นความร่วมมือระหว่างผู้เกี่ยวข้องในทุกระดับของโครงการ [8]

โดยสรุป ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่า ความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างในองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนั้น ไม่เพียงขึ้นอยู่กับการมีระบบบริหารที่ดีเท่านั้น แต่ยังต้องอาศัยความเข้าใจร่วมกันระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนต่อบริบทและข้อจำกัดของแต่ละฝ่าย การออกแบบระบบบริหารที่มีความยืดหยุ่น มีส่วนร่วม และสามารถปรับตัวต่อสถานการณ์ได้ จะเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเสริมสร้างประสิทธิภาพและความยั่งยืนของโครงการพัฒนาในระดับท้องถิ่นต่อไป

ในส่วนท้ายนี้ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางการบริหารโครงการก่อสร้างให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเป็นข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นควรพิจารณาตั้งคณะทำงานร่วมกับภาคเอกชนตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนทรัพยากรสำคัญของโครงการอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ควรกำหนดกลไกการประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐาน เช่น การรื้อย้ายสาธารณูปโภค เพื่อป้องกันความล่าช้า และควรพัฒนาระบบบริหารความเสี่ยงที่สอดคล้องกับระเบียบราชการ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและลดอุปสรรคในการดำเนินงานโครงการ

2. องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นควรพัฒนาและเสริมสร้างศักยภาพของบุคลากรในด้านการบริหารโครงการ โดยเฉพาะในด้านการวางแผน การบริหารความเสี่ยง และการประเมินผลโครงการ เพื่อให้สามารถรับมือกับความซับซ้อนและข้อจำกัดของโครงการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ควรนำแนวทางการบริหารสมัยใหม่ เช่น การบริหารโครงการแบบ Agile และแนวทาง TQM (Total Quality Management) มาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มความคล่องตัว ความยืดหยุ่น และคุณภาพในการบริหารโครงการขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ดังนี้

1. ควรขยายพื้นที่การศึกษาไปยังองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในภูมิภาคอื่นของประเทศ เพื่อเปรียบเทียบความเหมือนหรือแตกต่างกันของปัจจัยความสำเร็จในบริบทที่หลากหลาย

2. ควรดำเนินการวิจัยเชิงลึกเพิ่มเติม โดยใช้การวิจัยแบบผสมผสานวิธี (Mixed Methods) เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพ เช่น ความโปร่งใส ความเป็นผู้นำ และรูปแบบความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้าง

3. ควรศึกษาผลกระทบของปัจจัยภายนอก เช่น การเปลี่ยนแปลงนโยบายของรัฐ หรือวิกฤตเศรษฐกิจ ที่อาจส่งผลต่อความสามารถในการบริหารโครงการขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในระยะยาว

## 7. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Lamliangphon, *Construction Management*. Bangkok, Thailand: Ramkhamhaeng University Press, 2008.

[2] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 8th ed. Andover, U.K.: Cengage Learning, 2019.

[3] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.

[4] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 6th ed. Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, 2017.

[5] J. R. Turner, *The Handbook of Project-Based Management: Improving the Processes for Achieving Strategic Objectives*, 2nd ed. London, U.K.: McGraw-Hill, 1993.

[6] S. Chinanuwatwong, *Construction Project Management*. Bangkok, Thailand: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2006.

[7] D. I. Cleland and L. R. Ireland, *Project Management: Strategic Design and Implementation*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.

[8] K. Srikahabodeesopak, "Project success and effective project management in construction project," *Veridian E-Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1556–1569, 2016.

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

**ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568 ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้**

| ลำดับ | รายนามผู้ทรง | สังกัด |
|---|---|---|
| 1. | อาจารย์ธิติพร ประมวน | ภาควิชาวิศวกรรมตอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. | รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาธน์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยนุช ใจแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิงแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุฒิ สิริเกษมสุข | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล - ระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา |
| 5. | รองศาสตราจารย์ ดร.กอปร ศรีนาวิน | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 6. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรียาพร โกษา | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 7. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพงศ์ บริรักษ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย |
| 8. | รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎางค์ ศุกระมูล | สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ |
| 9. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย เหมหิรัญ | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| 10. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ |
| 11. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพงศ์ เมืองน้อย | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 12. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา บำรุงกุล | สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ |
| 13. | อาจารย์ ดร.ศริษฐา แจ้งสามสี | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด) |
| 14. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

**ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568 ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้**

| ลำดับ | รายนามผู้ทรง | สังกัด |
|---|---|---|
| 15. | อาจารย์ ดร.กรวิศิษฏ์ ศิลารมย์ | สาขาวิชาวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช |
| 16. | ดร.เกียรติศักดิ์ ใจโต | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ |
| 17. | อาจารย์ ดร.อภิสิกธิ์ ภักดีแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 18. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูวดล โพธิ์แดง | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ (พื้นที่ศาลายา) |
| 19. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์ จิระชีวะนันท์ | สาขาวิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 20. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวุฒิ ยะนิล | ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 21. | รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติภูมิ รอดสิน | ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 22. | รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิสุทธิ์เสรีวงศ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 23. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทรพงษ์ อาสนจินดา | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 24. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรินทร์ แหงมงาม | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 25. | รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ มาลัยกฤษณะชลี | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (วิทยาเขตบางเขน) |

## คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
## วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วมศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ต้นฉบับทุกบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 3 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review วารสารตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี ในเดือน มีนาคม และ กันยายน เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online)

**1. การเตรียมต้นฉบับ**

1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
    6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
    6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
    6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
    6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
    6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
    6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

**รูปแบบการเขียนบทความ** ควรมีหัวข้อเรื่องเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

**ชื่อเรื่อง** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

**ชื่อผู้เขียน** ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

**บทคัดย่อ** บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**คำสำคัญ (Keyword)** คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

**บทนำ** กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

**ตัวเนื้อหา** อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

**สรุป** บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

**กิตติกรรมประกาศ** ขอบคุณทุนสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

**เอกสารอ้างอิง** ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ http://eng.swu.ac.th/re.html

**2. วิธีการส่งบทความ**

1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่ https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login
3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ http://eng.swu.ac.th/re.html

**3. ขั้นตอนการประเมินบทความ**

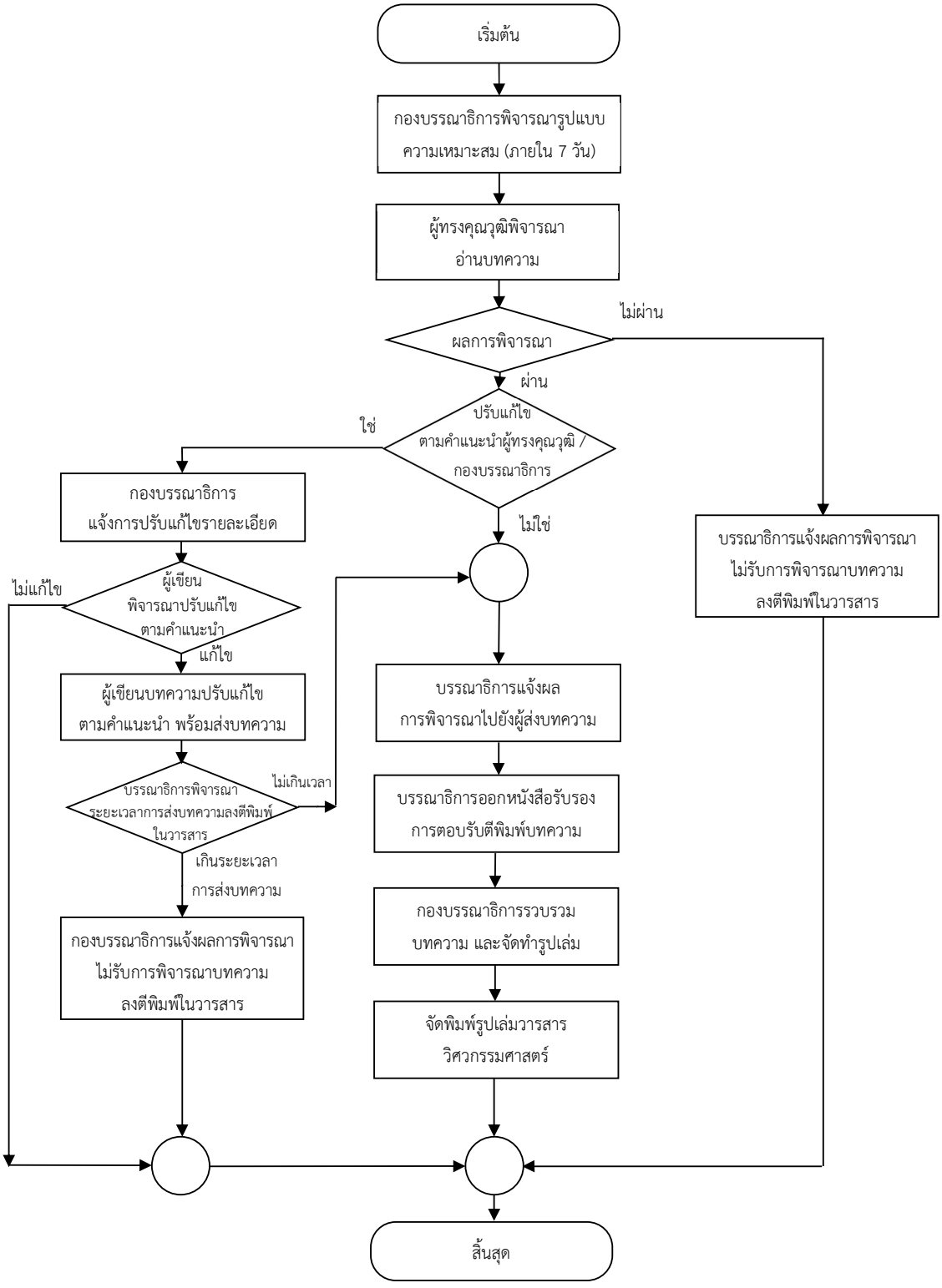
การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิโดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

**4. การเก็บค่าธรรมเนียม**

ไม่มีค่าธรรมเนียม

# ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

# Srinakharinwirot University Engineering Journal

## Vol. 21 No.2 (July - December 2025)

**ISSN : 2774 - 0269 (Online)**

## บทความวิจัย


- การประเมินน้ำหลากล้นตลิ่งจากแม่น้ำมูลและแนวทางการผันน้ำเพื่อบรรเทาอุทกภัยในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี
  Assessment of Mun River Overbank and Diversion Strategies for Flood Mitigation in Ubon Ratchathani Province
  สุภาพร ทองเต็ม ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์

- พฤติกรรมการอบแห้งของข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเตียงลมร้อนแบบพวยพุ่งเสริมด้วยไมโครเวฟ
  Drying Behavior of Khao Dawk Mali 105 Jasmine Paddy in a Spouted Bed Dryer Assisted by Microwave
  ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน กระวี ตรีอำนรรค เทวรัตน์ ตรีอำนรรค จิรวัฒน์ กรุณา

- การออกแบบตัวถังรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยเลียนแบบรูปร่างของนกเหยี่ยวเพเรกริน เพื่อลดแรงต้านอากาศ
  Solar Electric Vehicle Body Design Inspired by the Peregrine Falcon for Aerodynamic Drag Reduction
  จิรวัตน์ กรุณา ธรรมรัตน์ แยบสูงเนิน

- การศึกษาประสิทธิภาพของการบูรณะพื้นสะพานกลับรถ : กรณีศึกษาบนถนนทางหลวงหมายเลข 35
  Performance Evaluation of U-Turn Bridge Deck Rehabilitation: A Case Study on Highway No. 35 Thailand
  กฤตเมธ มีปัญโญ วันชัย ยอดสุดใจ สุกิจ ยินดีสุข

- การออกแบบและสร้างชุดจำลองการศึกษาการทำงานโดย MediaPipe Holistic
  Design and Make a Work Study Simulation Model Using MediaPipe Holistic
  กันยารัตน์ พูลเพียร

- การพัฒนาโมเดลธุรกิจพลังงานชุมชนจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบการวัดพลังงานสุทธิกรณีศึกษาวิสาหกิจชุมชน จังหวัดจันทบุรี
  Development of a Community-Based Business Model Utilizing Solar Energy and Net Metering
  : A Case Study of Community Enterprises in Chanthaburi Province, Thailand
  กรณ์ปภพ รัตนวิจิตร อาทิตย์ คำต่าย กฤษณะ จันทสิทธิ์

- การพัฒนาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนโดยวัสดุพรุนแบบลวดตาข่ายสแตนเลส
  Development of Domestic Cooking Burner using Stainless Wire - Mesh Porous Media
  ไพลิน หาญขุนทด จัตุพล ป้องกัน สุรเดช สินจะโป๊ะ บัณฑิต กฤตาคม นิวัฒน์ เกตุชาติ

- ปัจจัยความสำเร็จของการบริหารงานก่อสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในเขตอำเภอเมืองจังหวัดเพชรบูรณ์: การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ
  Success Factors in Construction Management of Local Administrative Organizations in Mueang District,
  Phetchabun Province: an Exploratory Factor Analysis
  พัฒน สุวรรณสัมฤทธิ์ จักรพงษ์ พงษ์เพ็ง


**คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**
เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560
http://eng.swu.ac.th