

Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University



<https://ph05.tci-thaijo.org/index.php/bru-idtech-journal>





เจ้าของ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริภาณี จุฑาปะมา อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
บรรณาธิการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร วัชรภัทรกุล

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภวัฒน์	ลาวัณย์วิสุทธิ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงวุฒิ	เอกวุฒินงศา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์ชัย	ตันติวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ	เลิศคอนสาร	วิทยาลัยพิษณุพนิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์คันสนีย์	อาจนฉาย	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอกบดินทร์	กลั่นเกสร	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัษฎาภรณ์	บุญศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

ผู้ประสานงานและจัดทำ

นางสาวขวัญ สมยินดี
นางสาวพิมพ์ณัฐธยา ทะยานรัมย์

จัดรูปเล่มและออกแบบปก

นางสาวขวัญ สมยินดี

วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่และประชาสัมพันธ์ผลงานทางวิชาการ ด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสหวิทยาการด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของนักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการและบุคคลทั่วไป

กำหนดการออกวารสาร

ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม

ที่อยู่

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
เลขที่ 439 ถนนจรเข้ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองบุรีรัมย์ จังหวัดบุรีรัมย์ 31000
โทรศัพท์: 0 4461 1221 อีเมล: idtechjr@bru.ac.th
เว็บไซต์: <https://ph05.tci-thaijo.org/index.php/bru-idtech-journal>

บทความที่ลงพิมพ์เป็นข้อคิดเห็นของผู้เขียนเท่านั้น
ผู้เขียนจะต้องเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความนั้น

บทบรรณาธิการ

Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University (ชื่อเดิม วารสารวิชาการ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ เริ่มจัดทำวารสารตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562 เลข ISSN 2697-5882 (print) เพื่อให้การสืบค้นข้อมูลเลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร ได้เปลี่ยนชื่อวารสารและเลข (ISSN) เป็น ISSN: 3088-1749 (Online) โดยมีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ (มกราคม-มิถุนายน และ กรกฎาคม-ธันวาคม) มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานทางวิชาการด้วยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม ครุศาสตร์ อุตสาหกรรม วิศวกรรมศาสตร์ นวัตกรรมและเทคโนโลยี สถาปัตยกรรมและการออกแบบ และสหวิทยาการ ของนักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการและบุคคลทั่วไป

Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University ได้นำระบบ DOI (Digital Object Identifier) ที่ช่วยให้สืบค้นและเข้าถึงบทความวิจัยได้อย่างแม่นยำ ส่งเสริมการอ้างอิงและการเชื่อมโยงข้อมูลซึ่งจะทำให้บทความวิจัยของวารสารมีความน่าเชื่อถือและถูกค้นพบได้ง่ายในโลกออนไลน์ สำหรับการตีพิมพ์เผยแพร่ในปีที่ 8 ฉบับที่ 1 (เดือน มกราคม-มิถุนายน 2569) มีบทความวิจัยในฉบับนี้ จำนวน 4 บทความ โดยทุกบทความที่ตีพิมพ์ได้ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 ท่าน (double-blind review) และผ่านกองบรรณาธิการเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งบทความทั้ง 4 เรื่องสะท้อนการประยุกต์ใช้องค์ความรู้ด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม ด้านการจัดการพลังงานความร้อน การเพิ่มประสิทธิภาพ กระบวนการผลิต และการพัฒนาเครื่องมืออุตสาหกรรมและเพิ่มขีดความสามารถของภาคอุตสาหกรรม ผู้ที่สนใจสามารถติดตามอ่านบทความวิจัยของวารสารวิชาการฯ ผ่านระบบ ThaiJo ในรูปแบบฉบับออนไลน์ได้

กองบรรณาธิการ ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer reviewers) ที่ได้ประเมินบทความวิจัยในฉบับนี้ และขอขอบคุณผู้สนับสนุนบทความ (Authors) ทุกท่านที่ให้ความสนใจส่งบทความเพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ ซึ่งทางกองบรรณาธิการมีความตั้งใจและทุ่มเทเพื่อเป็นที่ยอมรับด้านคุณภาพวารสารในระดับสากล และกองบรรณาธิการยินดีรับข้อเสนอแนะเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงวารสารฯ ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้นไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วัชร วัชรภัทรกุล

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
บทความวิจัย	
การเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยใช้นวัตกรรมเทคนิคการผลิตแบบลีน	1
กรณีศึกษา : กระบวนการเย็บกางเกง	
ชินวัฒน์ ชะสนรัมย์, ปณชัย นามไพร, กฤษดา ลักษร, พูนธนะ ศรีสระคู	
การพัฒนาออกแบบและสร้างชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก	13
เกียรติศักดิ์ ทาน้อย, วิชญภาส นาคสูงเนิน, พีระพงศ์ บัวพา, กิตติพล ขาวงาม	
การศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายใต้มุมเอียง	29
และอัตราการเติมสารทำงานที่แตกต่างกันโดยวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ	
กิตติพล ขาวงาม, พันธุ์เทพ คำพอง	
การพัฒนาต้นแบบรถไฟฟ้าและระบบอัดประจุไฟฟ้าแบบผสม	57
อนุชา ตันเสียดี, ชลากร สติภา	

Research Article

การเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยใช้นวัตกรรมเทคนิคการผลิตแบบลีน

กรณีศึกษา : กระบวนการเย็บกางเกง

Increasing Efficiency of Production Line By Innovation Lean Production

Techniques : A Case Study of Sewing Trousers Process

ชินวัฒน์ ชะสนรัมย์¹ ปณชัย นามไพร¹ กฤษดา ลักขร¹ และ พูนธนะ ศรีสระคู^{1*}

Sinnawat Chachonram¹ Pranachai Namprai¹ Kridsada Luksorn¹ and Poonthana Sresracoo^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

¹ Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Buriram Rajabhat University

*Corresponding author. E-mail: poonthana.ss@bru.ac.th

Received: May 22, 2026

Revised: June 17, 2026

Accepted: June 25, 2026

Available online: June 28, 2026

APA Citation:

Chachonram, S., Namprai, P., Luksorn, K., & Sresracoo, P. (2026). Increasing Efficiency of Production Line By Innovation Lean Production Techniques : A Case Study of Sewing Trousers Process. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 1–12.
<https://doi.org/10.14456/brujit.2026.1>

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัญหากระบวนการเย็บกางเกง ซึ่งพบความสูญเสียเปลืองเวลาเกินความจำเป็น และมีขั้นตอนซ้ำซ้อน ส่งผลให้ต้นทุนสูงและประสิทธิภาพต่ำ การวิจัยดำเนินการโดยเก็บข้อมูลขั้นตอนการทำงาน ระยะทาง และเวลา วิเคราะห์สาเหตุด้วยแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) และหลัก 5W1H จากนั้นประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ร่วมกับแผนภูมิการไหล (Flow Process Chart: FPC) เพื่อปรับปรุงและเปรียบเทียบก่อน-หลัง ผลการวิจัยพบว่าขั้นตอนการผลิตลดลงจาก 20 เหลือ 16 ขั้นตอน (20%) ระยะทางลดลงจาก 56 เหลือ 43 เมตร (23.21%) และเวลาในการผลิตลดลงจาก 2,804 เหลือ 2,491 วินาที (11.17%) สะท้อนถึงการเพิ่มประสิทธิภาพได้อย่างชัดเจน โดยสรุปการใช้ Fishbone Diagram, 5W1H และ ECRS ร่วมกับ FPC สามารถลดความสูญเสียและยกระดับประสิทธิภาพการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอื่นได้ในอนาคต

คำสำคัญ: การปรับปรุงกระบวนการผลิต ความสูญเสีย แผนภูมิการไหล

Abstract

This study aimed to examine the production process of A Case Study of Sewing Trousers Process at where waste, excessive processing time, and redundant operations were identified, leading to high costs and low efficiency. Data on work procedures, distances, and processing times were collected, with root causes analyzed using a Fishbone Diagram and the 5W1H technique. The ECRS principles combined with a Flow Process Chart FPC were then applied to improve and compare the process before and after implementation. The results showed reductions from 20 to 16 steps 20%, from 56 to 43 meters in movement distance 23.21%, and from 2,804 to 2,491 seconds in processing time 11.17%. These findings highlight a clear improvement in production efficiency. In conclusion, the integration of Fishbone Diagram, 5W1H, and ECRS with FPC effectively minimized waste and enhanced efficiency, offering a practical approach applicable to other manufacturing industries in the future.

Keywords: Production process improvement, ECRS, FPC

1. บทนำ

ในปัจจุบันการดำเนินธุรกิจมีการแข่งขันที่มีความซับซ้อนและทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยแวดล้อมอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วในอดีตประกอบกับเศรษฐกิจในปัจจุบันมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ตกต่ำลง ส่งผลให้การแข่งขันด้านการค้ารุนแรงมากขึ้น ด้วยสาเหตุนี้องค์กรต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องตอบสนองต่อปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นให้ได้อย่างเหมาะสมและทันทั่วทั้งการบริหารงาน หรือการจัดการองค์กรนั้นจึงมีความสำคัญต่อการดำเนินธุรกิจให้ประสบความสำเร็จในปัจจุบันเป็นอย่างยิ่ง ผู้ประกอบการจึงต้องให้ความสำคัญต่อการแก้ไขปัญหา และพัฒนาองค์กรอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่เปลี่ยนแปลง [1] และเพื่อความอยู่รอดของธุรกิจในสภาพการแข่งขันที่สูงขึ้น โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาของระบบการโรงงานผลิตเสื้อผ้าส่งออก กรณีศึกษา แผนกเย็บกางเกง ยังประสบปัญหาประสิทธิภาพสายการผลิตไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ทางโรงงานตั้งไว้ เนื่องจากการจัดวางผังเครื่องจักรที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เป็นอุปสรรคในการไหลของชิ้นงาน ชิ้นงานไหลไม่ต่อเนื่องไปในทิศทางเดียวกันมีการแยกชิ้นส่วนการไหล มีขั้นตอนการทำงานที่มาก ทำให้เกิดจุดคอขวด และความสูญเสียในสายการผลิต จึงก่อให้เกิดการผลิตงานไม่ได้ตามเป้าต่อชั่วโมง ส่งผลให้จำนวนงานออกต่อวันไม่เป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการจัดวางผังเครื่องจักรใหม่เพื่อให้รองรับต่อการปรับปรุงสายการผลิต โดยใช้เทคนิคการผลิตแบบลีน การจัดสายการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ [2] ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตลง และยังส่งผลให้เกิดการทำงานที่สะดวกรวดเร็ว ลดเวลาการทำงานที่ไม่จำเป็น ทำให้มีการไหลของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องไม่เกิดจุดคอขวดรวมทั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิต ดังนั้น ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่ในการวิจัยครั้งนี้แบบกรณีศึกษาโรงงานผลิตเสื้อผ้าส่งออก แผนกเย็บ

ทางแก้ง อำเภอบริรักษ์ จังหวัดบุรีรัมย์ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้ 1) ศึกษากระบวนการเย็บแก้งเพื่อนำมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขของการจัดสมดุลสายการผลิต 2) ศึกษาแก้ไขปัญหกระบวนการผลิต โดยเทคนิคการผลิตแบบลีน กระบวนการเย็บแก้ง ให้การไหลของชิ้นงานต่อเนื่องไม่เกิดจุดคอขวด 3) ทำการปรับปรุงกระบวนการเย็บแก้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิต ตามหลักการการศึกษาการทำงานเทคนิคการปรับปรุงงาน เครื่องมือการผลิตแบบลีน การจัดสมดุลสายการผลิต เป็นต้น

ในสถานการณ์ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจมีบทบาทอย่างมากในการสร้างอาชีพ และรายได้ให้กับแรงงานไทย [3] นอกจากนี้อุตสาหกรรมเครื่องนุ่งห่มยังมีความต้องการของผลิตภัณฑ์จากลูกค้าที่เพิ่มมากขึ้น โดยโรงงานกรณีศึกษามีจำนวนการสั่งซื้อเข้ามาอย่างต่อเนื่อง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ประสบปัญหาเกี่ยวกับต้นทุนกระบวนการผลิตสูง และยอดการผลิตต่ำส่งผลให้ต้องเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเพื่อชดเชยกับต้นทุนที่เพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ธุรกิจต้องพร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มผลผลิต ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต เพื่อสร้างความได้เปรียบในการแข่งขันเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุนและสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน โดยการนำระบบการผลิตแบบลีนมาประยุกต์ใช้ อัตราการไหลของชิ้นงาน กระบวนการทำงานที่มีความยืดหยุ่น ลดเวลาในการทำงาน การพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [4] ปรับปรุงกระบวนการผลิตกำจัดความสูญเปล่าและเพิ่มประสิทธิภาพ การดำเนินงานซึ่งประสบปัญหาผลผลิตไม่เป็นไปตามเป้าหมาย จำเป็นต้องปรับกลยุทธ์การผลิตจึงได้ทดลองนำระบบการผลิตแบบลีน และนำเครื่องมือ 7 Waste มาวิเคราะห์และจำแนกความสูญเปล่าโดยใช้เครื่องมือการผลิตแบบลีนเพื่อปรับปรุง [5]

จากหลักการและเหตุผลข้างต้นแสดงถึงแนวคิดใหม่ จึงจำเป็นต้องมีการจัดวางผังเครื่องจักรใหม่เพื่อให้รองรับต่อการปรับปรุงสายการผลิต โดยใช้เทคนิคการผลิตแบบลีน การจัดสายการผลิตแบบเซลล์ลูลาร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถช่วยลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตลง และยังส่งผลให้เกิดการทำงานที่สะดวกรวดเร็ว ลดเวลาการทำงานที่ไม่จำเป็น ทำให้มีการไหลของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องไม่เกิดจุดคอขวดรวมทั้งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิต ผลที่คาดว่าจะได้รับในการทำวิจัยในครั้งนี้ผลการสามารถลดความสูญเปล่าในสายการผลิต กรณีศึกษา กระบวนการเย็บแก้งให้มีการไหลของชิ้นงานต่อเนื่อง ไม่เกิดจุดคอขวด และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิต กรณีศึกษากระบวนการเย็บแก้ง ให้เป็น 40 เปอร์เซนต์ตามเป้าหมายที่โรงงานตั้งไว้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 2.1 เพื่อลดความสูญเปล่ากระบวนการเย็บแก้งให้การไหลของชิ้นงานต่อเนื่องไม่เกิดจุดคอขวด
- 2.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสายกระบวนการเย็บแก้งให้ได้ตามเป้าหมายที่โรงงานตั้งไว้ (40 เปอร์เซนต์)

3. สมมติฐานของการวิจัย

- 3.1 ศึกษาปัญหาลำการผลิตไม่เพียงพอส่งผลให้ส่งสินค้าไม่ทันตามกำหนด

3.2 ทำการออกแบบเครื่องมือที่ในการรวบรวมข้อมูลการสังเกตและการสัมภาษณ์ (Observation and Interview)

3.3 ทำการใช้เครื่องมือในการแก้ปัญหาในขั้นตอนใช้เวลานาน มีความล่าช้าในการส่งงาน มีขั้นตอนที่ซับซ้อน ในการใช้เครื่องมือ ได้แก่ การลดความสูญเสียเปล่า แผนภูมิการไหล การตั้งคำถาม

3.4 เปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเพื่อลดความสูญเสียสายการผลิตของการทดลอง หลังจากการใช้เครื่องมือในการแก้ปัญหา ก่อนและหลังการปรับปรุง

4. ขอบเขตของการวิจัย

4.1 กลุ่มเป้าหมายกรณีศึกษาโรงงานผลิตเสื้อผ้าส่งออก แผนกเย็บกางเกง ตำบลประโคนชัย อำเภอบัวประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์

4.2 ขอบเขตด้านเวลา ช่วงเวลาที่ดำเนินการศึกษา 12 เดือน เริ่มทำการวิจัยเมื่อ (เดือน ปี) 1 ตุลาคม 2567 - 30 กันยายน 2568

4.3 พื้นที่ศึกษาแผนกเย็บกางเกง บ้านโคกมะขาม ตำบลโคกมะขาม อำเภอบัวประโคนชัย จังหวัดบุรีรัมย์

5. ทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยใช้วัฒนธรรมเทคนิคการผลิตแบบลีน กรณีศึกษา : กระบวนการเย็บกางเกง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตการเย็บกางเกง ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าแนวคิดจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีหัวข้อดังนี้ 1) การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการทำงาน 2) การวิเคราะห์และแก้ปัญหาโดยใช้หลักการ 5W1H 3) การปรับปรุงโดยใช้หลักการ ECRS และ 4) การศึกษาการวิเคราะห์กระบวนการผลิตโดยใช้แผนภูมิการไหล (FPC Diagram)

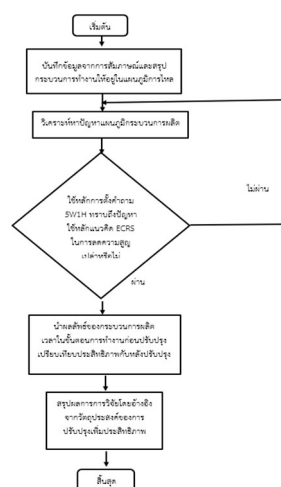
โดยหลักการ 5W1H มีเทคนิค 5W1H [6] ใช้เพื่อเข้าใจปัญหาก่อนคือเทคนิคการตั้งคำถามที่ขึ้นต้นหรือลงท้ายใคร 1) Who ใคร 2) What อะไร 3) When เมื่อไหร่ 4) Where ที่ไหน 5) Why ทำไม และ 6) How อย่างไรเป็นแนวคิดที่สามารถนำมาบริหารจัดการงานให้มีประสิทธิผลมากขึ้น โดยที่พนักงานทุกคนมีส่วนร่วมในการหาแนวคิดใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงการทำงาน และสภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น โดยต้องมีการปรับปรุงอย่างมีความสำคัญใน Kaizen คือ การนำความรู้หรือความสามารถของพนักงานมาช่วยในการปรับปรุงงาน การปรับปรุงโดยใช้หลักการ ECRS จากเครื่องมือการจัดการข้างต้น เครื่องมือที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการจัดการระบบตู้รับคืนหนังสืออัตโนมัติคือการดำเนินการแบบลีน และทฤษฎี ECRS เพราะการดำเนินการแบบลีนเป็นหลักดำเนินการเปลี่ยนแปลงที่ง่ายขึ้น อันจะช่วยให้องค์กรบรรลุถึงคุณภาพที่ดีต้นทุนต่ำ และเวลาในการทำงานสั้น ส่วนการเลือกทฤษฎี ECRS โดยการใช้หลักการสังเกตง่าย ๆ ว่าขั้นตอนกระบวนการใดที่เกี่ยวข้องกับเวลา ซึ่งทำแล้วก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่า ถือเป็นเวลาส่วนเกินที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า

หลักการ ECRS เป็นหลักที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาง่าย ๆ [7] ซึ่งสามารถใช้ในการเริ่มต้นลดความสูญเสียเปล่า หรือ MUDA ลงได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงสภาพปัจจุบันให้เข้าสู่สภาพที่ควรจะเป็นการสร้างงาน

ที่เป็นมาตรฐานเพื่อการพัฒนาได้อย่างต่อเนื่องซึ่งหลัก ECRS ประกอบด้วยกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) การทำให้ง่าย (Simplify) รูปแบบของกระบวนการหน่วยงานขององค์กรธุรกิจ ประกอบด้วยส่วนของงานโรงงานและส่วนของงานสนับสนุนที่สามารถก่อให้เกิดความสูญเปล่าได้ แผนภูมิกระบวนการ (Process Chart) เป็นเครื่องมือชิ้นสำคัญที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลได้อย่างละเอียด กระดาษประกอบด้วยสัญลักษณ์ คำบรรยายและลายเส้น เพื่อบอกรายละเอียดของขั้นตอนกระบวนการผลิต เพื่อช่วยให้วิศวกรสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการผลิตได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ต้น จนถึงจบ และนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการทำงานให้ดีขึ้น ซึ่งในแผนภูมิกระบวนการนั้นมีหลากหลายและ แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) [8] แผนภูมินี้ใช้วิเคราะห์ขั้นตอนการไหล (Flow) ของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน พนักงาน และอุปกรณ์ ที่เคลื่อนไปในกระบวนการพร้อม ๆ กับกิจกรรมต่าง ๆ โดยใช้สัญลักษณ์มาตรฐาน 5 ตัว ซึ่งกำหนดโดย ASME ในสหรัฐอเมริกา ดังนี้ คือ วงกลม (Operation) แทนการวางแผน ปฏิบัติงาน การคำนวณ การให้คำสั่ง การรับคำสั่ง สี่เหลี่ยม (Inspection) แทนการตรวจสอบคุณภาพ ปริมาณ คุณลักษณะของวัตถุ ลูกศร (Transportation) แทนการเคลื่อนที่ พนักงานกำลังเดินเคลื่อนย้าย เครื่องวงกลม (Delay) แทนการคอยเพื่อให้ชิ้นงานต่อไปเริ่มต้น เก็บวัสดุชั่วคราวระหว่างทำงานสามเหลี่ยม (Storage) [9] แทนการเก็บวัสดุที่เป็นเวลานาน และการเก็บถาวร

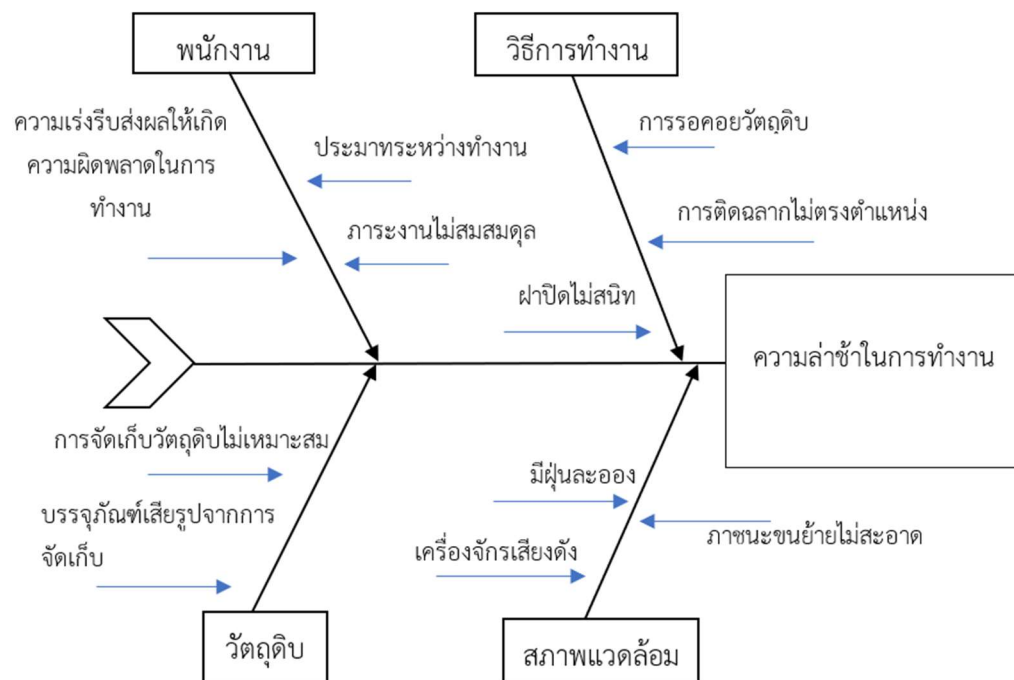
6. ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยใช้นวัตกรรมเทคนิคการผลิตกรณีศึกษา : กระบวนการเย็บกางเกง การศึกษาวิจัยได้นำแนวคิดแบบการตั้งคำถาม 5W1H โดยใช้หลักการ ECRC เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตสายการผลิตกระบวนการเย็บกางเกง โดยมุ่งเน้นปัญหาวิธีการทำงานล่าช้า และเพื่อศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงการจัดวางผังการผลิต โดยผู้วิจัยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย ดังนี้ 1) ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง 2) ขั้นตอนการศึกษา 3) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 4) การเก็บรวบรวมข้อมูล และ 5) การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล



ภาพที่ 1 ภาพรวมขั้นตอนการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิต

ขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาและหาแนวทางการแก้ไขปัญหา ทีมวิจัยและตัวแทนพนักงานของโรงงานได้ร่วมกันวิเคราะห์ปัญหาและหาแนวทางการแก้ไขปัญหา โดยนำข้อมูลที่ได้จากแผนภูมิกระบวนการไหล และแผนภาพการไหล มาวิเคราะห์กิจกรรมที่ก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่า ในกระบวนการผลิต พร้อมวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนผังก้างปลา นำแผนผังก้างปลา มาใช้หาสาเหตุของปัญหา และปัจจัยที่ก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่า 7 ประการ โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากการสังเกตการณ์ทำงานในกระบวนการทำงานจริง ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนผังก้างปลาแสดงเหตุและผลของความสูญเสียเปล่าในกระบวนการผลิต

7. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

ผู้วิจัยเห็นปัจจัยหลักในการผลิตที่มีผลต่อความสูญเสียเปล่า ของการผลิตได้ 4 ปัจจัยหลัก คือ ด้านคน ด้านวิธีการในการผลิต ด้านวัตถุดิบ และด้านเครื่องจักร ซึ่งปัจจัยด้านคน พบว่าพนักงานขาดความรู้ในเรื่องการจัดกระบวนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ด้านวัตถุดิบ พบว่ามีการส่งวัตถุดิบตามยอดคำสั่งซื้อ จึงทำให้เกิดการรอคอยและส่งผลกระทบต่อระยะเวลา ในการผลิต ด้านเครื่องจักร พบว่าเครื่องจักรที่ใช้งานได้ปกติมีจำนวนน้อยเกินไป บางส่วนชำรุด และไม่มีพนักงานแผนกซ่อมบำรุง และด้านวิธีการ พบว่ามีการจัดลำดับงานที่ไม่เหมาะสม และมีการจัดลำดับงานที่ซับซ้อนมากเกินไป และจากการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น สามารถสรุปความสูญเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตได้ดังภาพที่ 3 โดยผู้วิจัยและพนักงาน ของโรงงานเห็นว่าควรดำเนินการปรับปรุงในส่วนวิธีการดำเนินงาน เนื่องจากมีต้นทุนในการปรับปรุง ที่ต่ำแต่ส่งผลโดยตรงต่อการทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางในการปรับปรุง โดยใช้แนวคิดการผลิตแบบลีน และหลักการ ECRS เป็นกรอบในการหาแนวทางในการแก้ปัญหา และได้ใช้แผนภูมิการไหลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตได้ดังต่อไปนี้

หัวข้อ	คำถาม	คำตอบ
วัตถุประสงค์	What : ทำอะไร	การจัดวางถังน้ำดื่ม
	Why : ทำไมต้องทำ	เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายถังน้ำดื่มในขั้นตอนต่อไปได้อย่างสะดวก
สถานที่	Where : ทำที่ไหน	โรงงานน้ำดื่มทีดีไลท์
	Why : ทำไมต้องทำที่นั่น	ปรับปรุงแก้ไขให้เพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้น
ลำดับการทำ	When : ทำเมื่อไหร่	หลังจากยกถังน้ำดื่มลงจากรถบรรทุก
	Why : ทำไมต้องทำขณะนั้น	เพื่อให้สามารถเช็คและตรวจสอบถังน้ำดื่มได้หลังจากยกถังน้ำดื่มลงจากรถบรรทุก
วิธีการทำ	How : ทำอย่างไร	จัดให้มีการทำงานที่ไหลต่อเนื่องโดยการนำถังน้ำดื่มลงจากรถพร้อมกับจัดแจงถัง
	Why : ทำไมต้องทำ	เพื่อให้สามารถลดระยะเวลา และสะดวกต่อการเช็คตรวจสอบถังน้ำดื่มในขั้นตอนต่อไป

ภาพที่ 3 ตารางวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่า 7 ประการ ในกระบวนการผลิต ความสูญเสียเปล่า

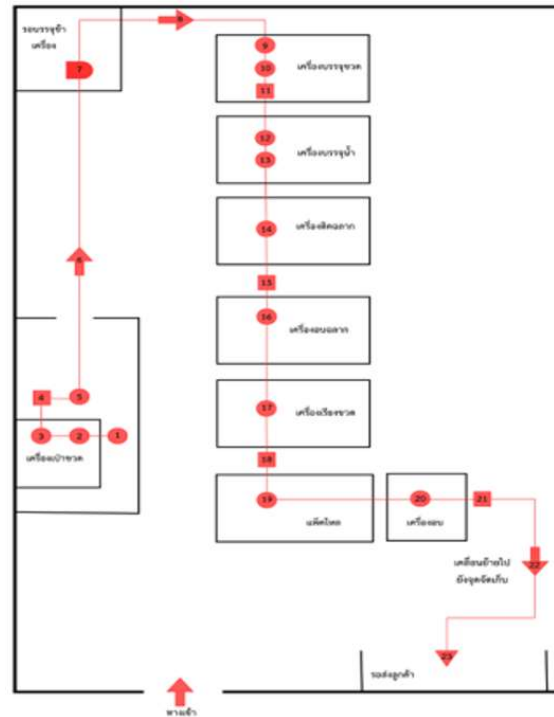
จากภาพที่ 3 การเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต สังเกตการทำงานของพนักงานกลุ่มตัวอย่างเพื่อศึกษาขั้นตอนในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าส่งออก ในปัจจุบันและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าส่งออก โดยบันทึกข้อมูลด้วยแผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Flow Process Diagram) และได้ระดม ประเมินกระบวนการผลิต ผลการบันทึกข้อมูลจากการสัมภาษณ์และสรุปกระบวนการทำงานให้อยู่ในแผนภูมิการไหล (ก่อนปรับปรุง)

แผนภูมิการไหลกระบวนการ				
ชื่อกระบวนการ : กระบวนการผลิตน้ำดื่ม	สัญลักษณ์	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ลดลง
วิธีการทำงาน : ปัจจุบัน ■ คน □ วัสดุ ■ เครื่องจักร	ปฏิบัติงาน	8		
	เคลื่อนย้าย	5		
	ตรวจสอบ	2		
	การรอคอย	3		
	จัดเก็บ	1		
	ระยะทาง (เมตร)	15 เมตร		
คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์	
1. พนักงานยกถังน้ำลงจากรถบรรทุกถึง	2	4	●	
2. พนักงานจัดวางถังน้ำดื่ม		6	●	
3. พนักงานตรวจสอบถังน้ำดื่มและผ้า		4	●	
4. ทำความสะอาดถังด้วยเครื่องล้าง		15	●	
5. พนักงานนำถังน้ำดื่มไปพักที่จุดพักถัง	5	20	●	
6. รอถังแห้งสนิท		120	●	
7. พนักงานนำผ้าส่งไปแขวน	1	5	●	
8. แขนงถังน้ำดื่มแล้ว		100	●	
9. พนักงานนำผ้าทำความสะอาด		10	●	
10. นำผ้าแห้งที่ล้างไปตาก	2	10	●	
11. รอผ้าแห้งที่แห้งสนิท		60	●	
12. นำถังน้ำดื่มมาบรรจุ	3	25	●	

คำอธิบาย	ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์				
			●	➡	□	■	▽
13. พนักงานบรรจุถังน้ำดื่ม		40	●				
14. ใช้ผ้าปิดถังหมักให้แน่น		3	●				
15. นำถังน้ำดื่มมาจัดเรียง	2	5	●				
16. ตรวจสอบถังเพื่อรอซิล		15	●				
17. ใช้ซิลที่เตรียมไว้ใส่คอถังน้ำ		3	●				
18. ใช้เครื่องความร้อนปิดซิลติดถังน้ำ		3	●				
19. เตรียมจัดส่งให้กับลูกค้า		20	●				
รวม	15 เมตร	468 วินาที					

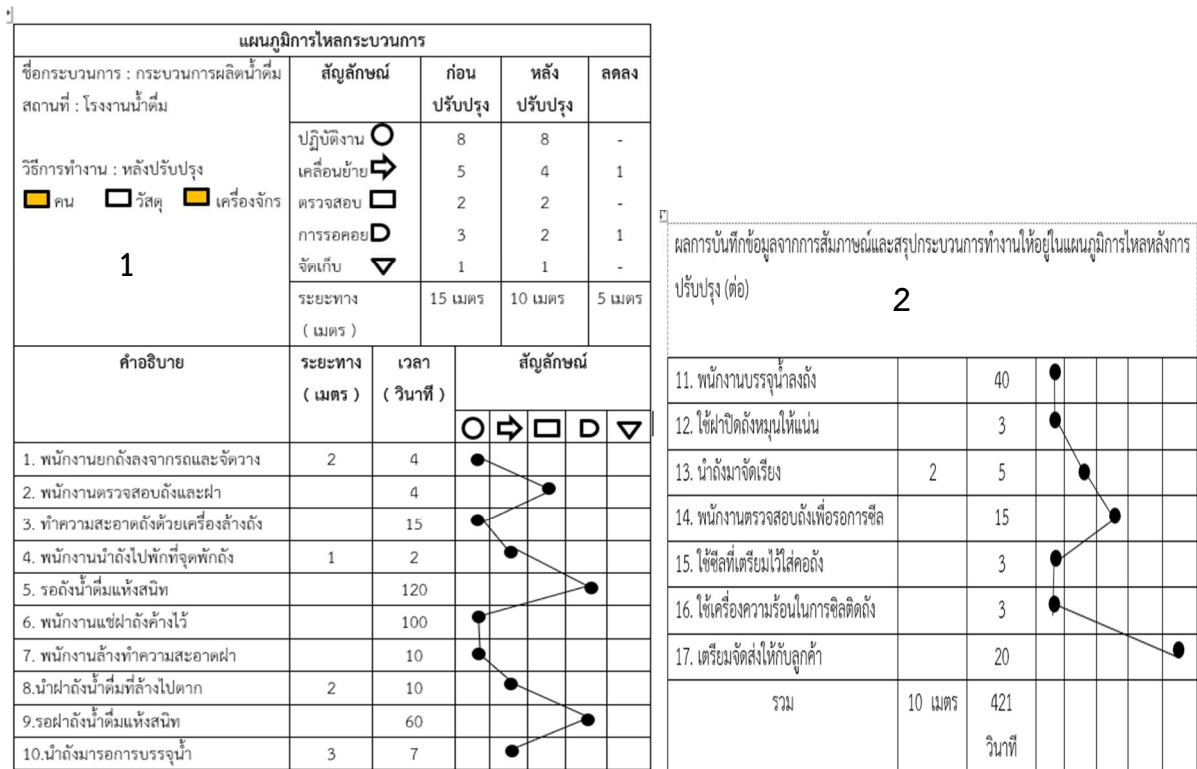
ภาพที่ 4 ผลการบันทึกข้อมูลจากการสัมภาษณ์และสรุปกระบวนการทำงานให้อยู่ในแผนภูมิการไหล (ก่อนปรับปรุง)

แผนภาพการไหลไดอะแกรม (Flow Process Diagram) ของกระบวนการผลิต (ก่อนปรับปรุง) การปรับปรุงของขั้นตอนกระบวนการผลิตเย็บกางเกงสำเร็จรูป และจากภาพที่ 4 สามารถวิเคราะห์คุณค่ากิจกรรมได้ดังนี้ 1) กิจกรรมที่มีความจำเป็น (VA) จำนวน 23 กิจกรรม 2) กิจกรรมที่ไม่จำเป็น (NVA) จำนวน 3 กิจกรรม 3) กิจกรรมที่ไม่จำเป็นแต่ต้องทำ (NNVA) จำนวน 13 แผนภาพการไหล (Flow diagram) ของกระบวนการผลิต (ก่อนปรับปรุง) ดังแสดงในภาพที่ 5



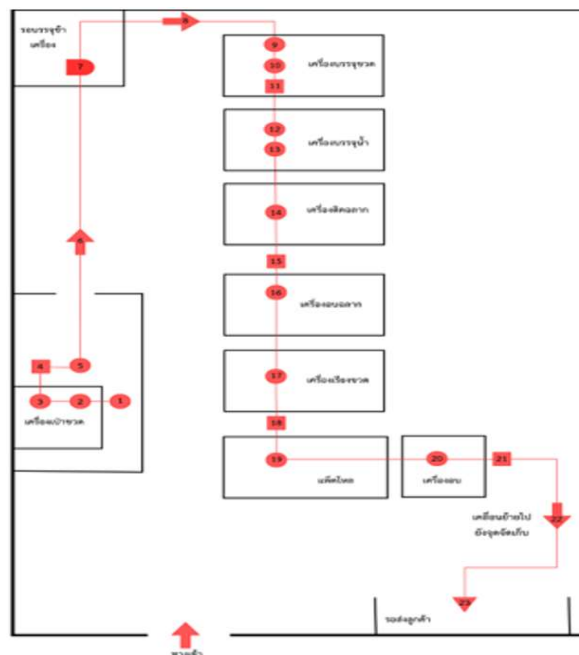
ภาพที่ 5 แผนภาพการไหล (Flow diagram) ของกระบวนการผลิต (ก่อนปรับปรุง)

เก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต สังเกตการทำงานของพนักงานกลุ่มตัวอย่างเพื่อศึกษาขั้นตอนในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าส่งออก ในปัจจุบันและทำการเก็บรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนในกระบวนการผลิตเสื้อผ้าส่งออก โดยบันทึกข้อมูลด้วยแผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Flow Process Diagram) และไดอะแกรม ปรับปรุงกระบวนการผลิต ผลการบันทึกข้อมูลจากการสัมภาษณ์และสรุปกระบวนการทำงานให้อยู่ในแผนภูมิการไหล (หลังปรับปรุง) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลการบันทึกข้อมูลจากการสัมภาษณ์และสรุปกระบวนการทำงานให้อยู่ในแผนภูมิการไหล (หลังปรับปรุง)

แผนภาพการไหลไดอะแกรม (Flow Process Diagram) ที่ผ่านการใช้นวัตกรรม ECRS ลดความสูญเปล่าจากการวิเคราะห์กระบวนการผลิตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของกระบวนการผลิต (หลังปรับปรุง) ของขั้นตอนกระบวนการผลิตเย็บกางเกงสำเร็จรูป ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนภาพการไหล (Flow diagram) ของกระบวนการผลิต (หลังปรับปรุง)

จากภาพที่ 4 และภาพที่ 5 พบว่าหลังปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยหลักการ ECRS ทำให้เวลาในการผลิตลดลงจาก 5 ชั่วโมง 46 นาที เหลือ 4 ชั่วโมง 48 นาที กระบวนการผลิต มีประสิทธิภาพดีขึ้นคิดเป็นร้อยละ 16.76 โดยสามารถกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นหรือไม่เกิดประโยชน์ในการผลิตออกไป 3 ขั้นตอน และทำการรวมขั้นตอนการผลิตจาก 39 ขั้นตอน เหลือ 31 ขั้นตอน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบผลการศึกษาก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง

หัวข้อ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลการเปรียบเทียบ
1. เวลาในการผลิต	5 ชั่วโมง 46 นาที	4 ชั่วโมง 48 นาที	58 นาที
2. ขั้นตอนการผลิต	39 ขั้นตอน	31 ขั้นตอน	ลดลง 8 ขั้นตอน

บทความวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตทางเกษตรสำเร็จรูปโดยใช้แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Diagram) และแนวคิดการผลิตแบบลีน โดยใช้หลักการ ECRS เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทางเกษตรสำเร็จรูปด้วย และปรับปรุงประสิทธิภาพ การผลิตทางเกษตรสำเร็จรูปให้ดีขึ้น

จากการศึกษา พบว่าเมื่อใช้แผนผังก้างปลาวิเคราะห์สาเหตุของกระบวนการผลิต และวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่า 7 ประการ ทำให้ทราบถึงสาเหตุความสูญเสียเปล่าที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิต โดยผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตจากแผนภูมิกระบวนการไหลและการวิเคราะห์คุณค่ากิจกรรมในกระบวนการผลิต พบว่ามีขั้นตอนการผลิตที่ซ้ำซ้อนซึ่งสามารถรวมขั้นตอนเพื่อให้ทำพร้อมกันได้ และมีบางขั้นตอนที่ไม่เกิดประโยชน์ในการผลิต ซึ่งสามารถตัดออก จากกระบวนการผลิตได้ เมื่อดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตสามารถลดเวลาในการผลิต จาก 5 ชั่วโมง 46 นาที เหลือ 4 ชั่วโมง 48 นาที ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดีขึ้น คิดเป็นร้อยละ 16.76 และสามารถกำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นหรือไม่เกิดประโยชน์ในการผลิตออกไป 3 ขั้นตอน ทำให้ขั้นตอนการผลิตจาก 39 ขั้นตอน เหลือ 31 ขั้นตอน

8. ข้อเสนอแนะ

- 8.1 การเก็บข้อมูลเป็นอุปสรรคในการแก้ปัญหาเนื่องจากเป็นความลับของทางบริษัท
- 8.2 การพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการผลิต มีข้อจำกัดทำให้การปรับปรุงในการวางแผนโรงงานไม่เป็นตามแผนงานที่วางไว้
- 8.3 กระบวนการผลิตเสื้อผ้าแต่ละประเภท จะมีความซับซ้อนในขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ประเภทเครื่องนุ่งห่ม ทำให้ยากต่อการปรับปรุงแบบขั้นสูงได้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตโดยใช้นวัตกรรมเทคนิคการผลิตแบบลีน กรณีศึกษา : กระบวนการเย็บกางเกง นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบริษัทกระบวนการเย็บกางเกงที่เอื้อต่อการเก็บข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงสถานที่เครื่องจักรเพื่อให้ได้ศึกษาเพื่อนำข้อมูลมาในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mingmueang, K., & Kittitulakarnon, P. (2022). *Application of lean system in community enterprises in Kao Liao District, Nakhon Sawan Province* (Bachelor's thesis in Science). Program in Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University. (in Thai)
- [2] Wajanawichakorn, K. (2022). Waste reduction for improving the efficiency of the Kab Bua silk weaving process: A case study of Ban Pa Ao Community Enterprise, Ubon Ratchathani Province. *Journal of Engineering and Innovation*, 15(1), 89–101. (in Thai)
- [3] Kaewsut, J. (2019). *Production process improvement through the application of lean concepts: A case study of a rubber glove manufacturing factory in Songkhla Province* (Master's independent study in Business Administration). Program in Business Administration, Prince of Songkla University. (in Thai)
- [4] Noppolkhrang, C., & Thamaphan, P. (2022). *Reduction of production time and improvement of bottled drinking water production efficiency: A case study of Yang Chum Noi Agricultural Cooperative Factory, Yang Chum Noi District, Sisaket Province* (Master's thesis in Science). Program in Logistics Engineering, Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University. (in Thai)
- [5] Fueangfoo, D. (2016). *Development of a reading comprehension activity package using the 5W1H technique* (Master's thesis in Education). Program in Curriculum and Instruction, Dhurakij Pundit University. (in Thai)
- [6] Jeerapadungkiat, P. (2014). *Improving packing department production efficiency using the ECRS theory: A case study of New Young Marketing Co., Ltd.* (Bachelor's thesis in Business Administration). Program in Industrial Management, Faculty of Business Administration, Thai-Nichi Institute of Technology. (in Thai)

- [7] Nantajinda, L. (2010). *Application of ECRS for a milk run transportation system: A case study of ABC Transport Co., Ltd.* (Master's thesis in Science). Program in Logistics and Supply Chain Management, Faculty of Logistics, Burapha University. (in Thai)
- [8] Laksana, S. (2011). *Development of work efficiency improvement* (Bachelor's thesis in Business Administration). Faculty of Management Science, Suan Sunandha Rajabhat Institute. (in Thai)
- [9] Sumpan, A. (2020). *Warehouse efficiency improvement: A case study of PBS (Thailand) Co., Ltd.* (Master's independent study in Engineering). Program in Engineering Management, Dhurakij Pundit University. (in Thai)

Research Article

การพัฒนาออกแบบและสร้างชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก
Development of a Hydraulic Press-Based Flat Steel Bar Cutting System

เกียรติศักดิ์ ธาน้อย¹ วิชญาส นาคสูงเนิน¹ พีระพงศ์ บัวพา¹ และ กิตติพล ขาวงาม^{1*}

Kiadtisak Thanoi¹ Wichayaphas Naksungnoen¹ Peerapong Buapa¹ and Kittipon Khaongam^{1*}

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

¹ Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen Campus

*Corresponding author. E-mail: kittipon.khaongam@hotmail.com

Received: May 29, 2026

Revised: June 22, 2026

Accepted: June 25, 2026

Available online: June 28, 2026

APA Citation:

Thanoi, K. ., Naksungnoen, W. ., Buapa, P. ., & Khaongam, K. (2026). Development of a Hydraulic Press-Based Flat Steel Bar Cutting System. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 13–28. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.2>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาลำบากและความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพในการตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก ซึ่งเกิดจากกระบวนการป้อนชิ้นงานแบบดั้งเดิมที่ขาดประสิทธิภาพ จึงได้พัฒนาและออกแบบชุดรางลำเลียงสำหรับป้อนเหล็กเส้นแบนร่วมกับเครื่องกดไฮดรอลิกเพื่อเพิ่มความเร็วและความแม่นยำในการตัด วิธีการวิจัยประกอบด้วยการสร้างต้นแบบระบบรางลำเลียงและทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตัดระหว่างกรณีมีและไม่มีรางลำเลียง พร้อมประเมินด้านเวลาและความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ผลทดลองพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาในการตัดเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm จาก 8.6 s/piece (ก่อนพัฒนา) เหลือ 3.8 s/piece (หลังพัฒนา) คิดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพร้อยละ 55.81 ในด้านความแม่นยำ ชิ้นงานที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm ความยาวเป้าหมาย 150 mm มีค่าความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 150.2, 150.1 และ 150.2 mm ตามลำดับ มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1 mm และค่าความฉากเฉลี่ยประมาณ 90° มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1° นอกจากนี้การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (process capability analysis) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่า Cp (process capability index) และ Cpk (process capability index ที่ปรับด้วยตำแหน่งจริง) สำหรับความหนา 3, 6 และ 9 mm เท่ากับ 1.85/1.39, 1.95/1.60 และ 3.30/2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 ผลการวิจัยยืนยันว่าชุด

รางลำเลียงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตควบคุมคุณภาพและมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมจริง

คำสำคัญ: เครื่องกดไฮดรอลิก การตัดเหล็กเส้นแบน ระบบรางลำเลียง ความแม่นยำในการตัด
ความสามารถของกระบวนการ (Cp, Cpk)

Abstract

The aim of this research is to overcome the problem of delay and non-uniform quality in the cutting of flat steel bars by hydraulic press, due to the inefficient traditional process of feeding the steel bar to the hydraulic press. So a conveyor rail system to convey flat steel bars along with the hydraulic press was developed and designed to boost the cutting speed and precision. The research method was to build a prototype for the conveyor rail system and test it to see the difference in cutting performance between the conveyor rail and no conveyor rail, as well as the cutting time and the accuracy of the workpieces. The experimental results indicated that the developed system could cut the cutting time of the flat steel bars with a thickness of 9 mm from 8.6 s/piece (before development) to 3.8 s/piece (after improvement), which is an improvement of 55.81% efficiency. The accuracy of the workpieces with thicknesses of 3, 6 and 9 mm and a target 150 mm, showed average size of 150.2, 150.1, and 150.2 mm, respectively, with a tolerance of up to 1 mm, and an average squareness of about 90° with a tolerance of up to 1°. In addition, the results of the process capability analysis using a computer program showed that the values of Cp (process capability index) and Cpk (process capability index adjusted for actual position) for thicknesses of 3, 6 and 9 mm were 1.85/1.39, 1.95/1.60 and 3.30/2.26 respectively, all of which are superior to the industrial standard of 1.33. The results of the research validate the developed conveyor rail system which can enhance the production efficiency, ensure quality control and can be applied in real industrial conditions.

Keywords: Hydraulic press, Flat steel bar cutting, Conveyor-assisted feeding system, Cutting accuracy, Process capability (Cp, Cpk)

1. บทนำ

ระบบไฮดรอลิกถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตสมัยใหม่เนื่องจากมีความสามารถในการสร้างแรงสูงควบคุมได้อย่างแม่นยำและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลาย [1] ข้อได้เปรียบดังกล่าวทำให้เครื่องกดไฮดรอลิกเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับกระบวนการตัดโลหะเฉพาะการตัดเหล็กเส้นแบนซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานโครงสร้างและงานอุตสาหกรรมเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม เช่น การตัดด้วยแก๊สหรือเครื่องเลื่อยกล ระบบไฮดรอลิกให้ความรวดเร็วในการตัดที่สูงกว่ามีความแม่นยำด้านมิติที่ดีกว่าและมีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานมากกว่าจากความต้องการของภาคอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มผลผลิตและความสม่ำเสมอของคุณภาพการปรับปรุงระบบตัดด้วยไฮดรอลิกจึงเป็นประเด็นสำคัญงานวิจัยจำนวนมากให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฮดรอลิกและกลไกการตัด เช่น Sanchez-Marquez และ Jabaloyes Vivas [2] ได้พัฒนาระบบเซอร์โวไฮดรอลิกตำแหน่งความแม่นยำสูงสำหรับเครื่องมือกลใช้ตัวควบคุมพีซี PID แบบปรับค่าตัวเองออนไลน์ซึ่งสามารถปรับค่าพารามิเตอร์แบบเวลาจริงส่งผลให้ลดเวลาตอบสนองค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวและเพิ่มประสิทธิภาพภายใต้โหลดที่เปลี่ยนแปลงในบริบทของการตัดเหล็กเส้นแบน Huang et al. [3] รายงานว่าระบบไฮดรอลิกแบบควบคุมด้วยปั๊มที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพและความแม่นยำดีกว่าการตัดด้วยแก๊สนอกจากนี้ Thummala et al. [4] ได้พัฒนาเครื่องตัดเหล็กเส้นแบนด้วยระบบไฮดรอลิกต้นแบบในปริณิญาพันธ์และรายงานที่สามารถตัดเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm ได้เร็วกว่าการตัดด้วยแก๊ส ต่อมา Li et al. [5] ได้นำเสนอการควบคุมแยกกำลังและความเร็วสำหรับระบบเซอร์โวไฮดรอลิกของเครื่องตัดแบบโรลลิงแชร์ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 44.6% เมื่อเทียบกับระบบทั่วไปพร้อมทั้งคงความแม่นยำสูงและเสถียรภาพ งานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องจักรไฮดรอลิกอื่น ๆ เช่น ระบบอัดบล็อกกึ่งอัตโนมัติ ยังชี้ให้เห็นว่าการบูรณาการองค์ประกอบของระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอในการทำงานแม้จะมีความก้าวหน้าดังกล่าวแต่ประสิทธิภาพของกระบวนการตัดด้วยไฮดรอลิกยังคงถูกจำกัดขึ้นก่อนการตัดเฉพาะกระบวนการบ่อนขึ้นงาน ในทางปฏิบัติเหล็กเส้นแบนมักถูกบ่อนเข้าสู่เครื่องจักรด้วยแรงงานคนอาศัยพนักงานหลายคนส่งผลให้กระบวนการทำงานไม่ต่อเนื่อง ใช้เวลานานและเกิดความแปรปรวนสูงในการจัดตำแหน่งขึ้นงาน [6] ความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวนำไปสู่ปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และเพิ่มความเสี่ยงด้านความปลอดภัยข้อจำกัดเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงระบบบ่อนขึ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของกระบวนการขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติเฉพาะสายพานลำเลียงอัจฉริยะได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายวัสดุและลดการพึ่งพาแรงงานคน Yu et al. [7] ได้นำเสนอระบบโลจิสติกส์สายพานลำเลียงแบบโมดูลาร์ที่ปรับเปลี่ยนได้พร้อมการควบคุมแบบกระจาย แสดงให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมสายพานลำเลียงที่มีความยืดหยุ่นสามารถลดเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าและปรับปรุงความต่อเนื่องของการไหลของวัสดุในสภาพแวดล้อมการผลิตอัตโนมัติทำนองเดียวกัน Wang et al. [8] ได้พัฒนาระบบขนถ่ายวัสดุอัตโนมัติด้วยสายพานลูกกลิ้งแบบแอคทีฟที่ช่วยลดความ

แปรปรวนของกระบวนการอย่างไรก็ตามงานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้บูรณาการระบบลำเลียงเข้ากับเครื่องกดไฮดรอลิกสำหรับตัดโลหะดังนั้นช่องว่างงานวิจัยที่สำคัญ คือ การบูรณาการรางลำเลียงกับเครื่องกดไฮดรอลิกสำหรับเหล็กเส้นแบนยังมีน้อยงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นประสิทธิภาพการตัดเพียงด้านเดียวและขาดการประเมินความสามารถของกระบวนการด้วยดัชนี C_p และ C_{pk} [9] ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งสำหรับการตัดเหล็กเส้นแบน โดยบูรณาการรางลำเลียงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้อนชิ้นงาน ลดแรงงานคน พร้อมทั้งเปรียบเทียบเวลา ความแม่นยำ และประเมินความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk}) แนวทางนี้มุ่งเพิ่มผลิตภาพและความสม่ำเสมอของคุณภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียง
- 2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการตัดในด้านเวลาและความแม่นยำก่อนและหลังการพัฒนา รวมทั้งประเมินความสามารถของกระบวนการโดยใช้ดัชนี C_p และ C_{pk}

3. ขอบเขตของการวิจัย

- 3.1 ใช้เหล็กเส้นแบนที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm ใช้เครื่องกดไฮดรอลิกรุ่น VO-50 ในการทดลอง
- 3.2 ออกแบบชุดตัดเหล็กเส้นแบนและระบบรางลำเลียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 3.3 ประเมินผลในด้านเวลาในการตัด ความแม่นยำของชิ้นงาน และความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk})
- 3.4 การทดลองดำเนินการภายใต้สภาวะการทำงานที่กำหนดในห้องปฏิบัติการ

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 หลักการตัดด้วยเครื่องกดไฮดรอลิก การตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกเป็นกระบวนการตัดเฉือน (shearing process) ที่อาศัยแรงกดจากระบบไฮดรอลิกในการทำให้วัสดุเกิดความเค้นเฉือนจนขาดออกจากกันระบบไฮดรอลิกสามารถสร้างแรงกดสูงและสม่ำเสมอจึงเหมาะสำหรับกระบวนการตัดโลหะที่ต้องการความแม่นยำและความต่อเนื่องในการทำงานนอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการตัดและเพิ่มความปลอดภัยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบดั้งเดิม เช่น การตัดด้วยแก๊สหรือเครื่องเลื่อยกล [10]-[11]

4.2 ระบบรางลำเลียงสำหรับการป้อนชิ้นงานระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งถูกนำมาใช้เพื่อช่วยป้อนเหล็กเส้นแบนเข้าสู่ตำแหน่งตัดอย่างต่อเนื่องลดแรงเสียดทานระหว่างการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและลดความแปรปรวนที่เกิดจากการป้อนด้วยแรงงานคนระบบดังกล่าวช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการทำงานและช่วยให้ตำแหน่งของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลต่อความแม่นยำของกระบวนการตัดและประสิทธิภาพการผลิต [12]

4.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (process capability analysis) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบว่ากระบวนการผลิตสามารถผลิตชิ้นงานให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้อย่างสม่ำเสมอเพียงใดวิธีการนี้ได้รับความนิยมในระบบควบคุมคุณภาพอุตสาหกรรมเพราะสามารถบอกได้ทั้งศักยภาพสูงสุดและประสิทธิภาพที่แท้จริงของกระบวนการผ่านดัชนีหลัก 2 ตัว คือ C_p และ C_{pk} เกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทั่วไปกำหนดว่าหาก C_p และ C_{pk} มีค่ามากกว่า 1.33 แสดงว่ากระบวนการผลิตนั้นมีความสามารถเพียงพอ (capable) สำหรับการผลิตจริง [13]

C_p (process capability index) เป็นดัชนีที่บอกศักยภาพสูงสุดของกระบวนการสมมติให้ค่ากลางของชิ้นงานที่ผลิตได้อยู่ตรงเป้าหมายพอดีไม่เกิดการเอียงศูนย์ คำนวณได้จากสมการ (1)

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

C_{pk} (process capability index ที่ปรับด้วยตำแหน่งจริง) เป็นดัชนีที่บอกความสามารถตามจริงของกระบวนการคำนึงถึงว่าค่ากลางของชิ้นงานอาจคลาดเคลื่อนจากเป้าหมายมีการเอียงศูนย์ คำนวณได้จากสมการ (2)

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \quad (2)$$

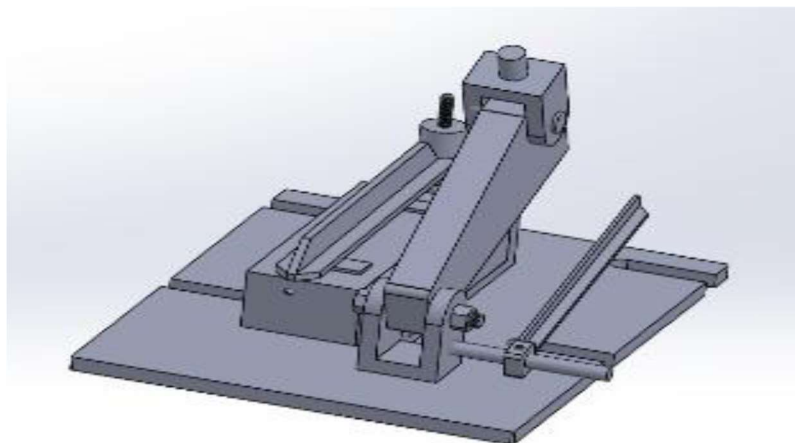
เมื่อ USL (upper specification limit) = ขีดจำกัดบนของค่าที่ยอมรับได้ค่าสูงสุด LSL (lower specification limit) = ขีดจำกัดล่างของค่าที่ยอมรับได้ค่าต่ำสุด σ = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ μ = ค่าเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผลิตได้จริง

5. วิธีการดำเนินการวิจัย

5.1 การออกแบบและพัฒนาโครงสร้างเครื่อง

งานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการออกแบบชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พิจารณาโครงสร้างฐาน ชุดตัด และระบบรองรับแรง จากนั้นทำการดัดแปลงเครื่องกดไฮดรอลิก รุ่น VO-50 ที่มีอยู่เดิมดังภาพที่ 1 ให้สามารถติดตั้งระบบรางลำเลียงได้ ในภาพที่ 1 แสดงเครื่องก่อนพัฒนาซึ่งยังไม่มีระบบรางลำเลียงชุดกดชิ้นงานเดิมเป็นแบบเสาเดี่ยว และชุดตั้งความยาวเดิมเป็นแบบเสาเดี่ยว

การพัฒนาครั้งนี้ได้ติดตั้งส่วนประกอบใหม่ ซึ่งมีลูกศรสีแดงกำกับเพื่อนั่นส่วนที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ชุดกดชิ้นงานเปลี่ยนจากเสาเดี่ยวเป็นแบบ 2 เสาพร้อมแผ่นกดขนาดกว้างขึ้นและชุดตั้งความยาวชิ้นงานเปลี่ยนจากเสาเดี่ยวเป็นแบบ 2 เสา นอกจากนี้ยังเพิ่มระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งจำนวน 6 ลูกกลิ้งสำหรับป้อนชิ้นงาน รายละเอียดการประกอบระบบรางลำเลียงแสดงในตารางที่ 1 และผลลัพธ์ของเครื่องหลังพัฒนาทั้งระบบปรากฏในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 เครื่องตัดเหล็กเส้นแบบก่อนพัฒนา Thummala et al. [4]

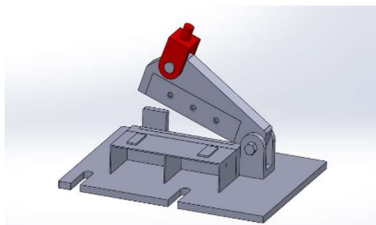
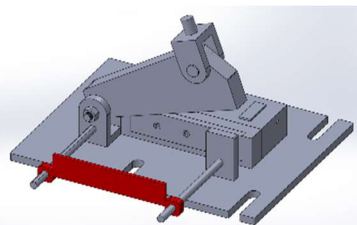
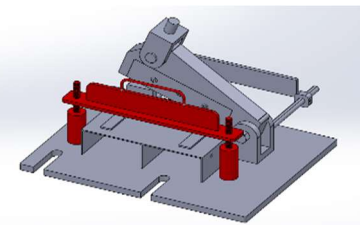
5.2 การพัฒนาระบบรางลำเลียง

การออกแบบและสร้างระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้งเพื่อใช้ในการป้อนชิ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งตัด กำหนดระยะห่างและจำนวนลูกกลิ้งให้เหมาะสมกับขนาดของเหล็กเส้นแบบ สร้างระบบรางลำเลียงแบบลูกกลิ้ง (roller conveyor) มีรายละเอียดดังนี้ จำนวนลูกกลิ้ง 6 units ระยะห่าง 120 mm วัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเคลือบผิว เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm โครงรองรับ เหล็กกล่องขนาด 40×40 mm ระบบนี้ช่วยลดแรงเสียดทานและเพิ่มความสม่ำเสมอในการป้อนชิ้นงานเข้าสู่ตำแหน่งตัด

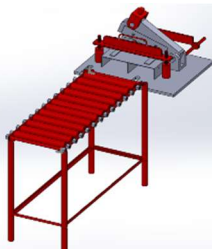
5.3 ขั้นตอนการประกอบและติดตั้ง

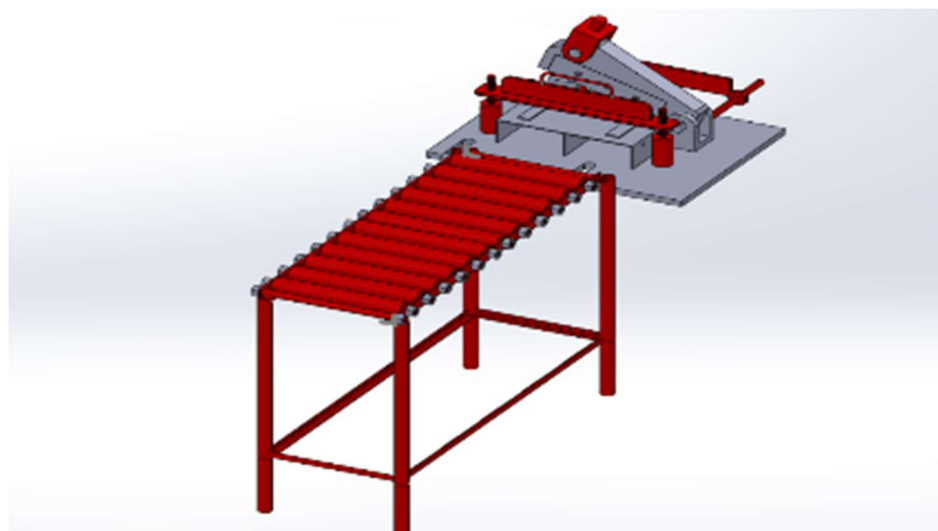
การดัดแปลงเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับรางลำเลียงขั้นตอนการประกอบและติดตั้งระบบรางลำเลียงแสดงดังตารางที่ 1 ประกอบด้วยภาพย่อย 6 ภาพเรียงลำดับ ได้แก่ (1) ตัวยึดชุดตัดเหล็กเข้ากับแกนไฮดรอลิก (2) การติดตั้งชุดรองรับแผ่นบาร์สำหรับปรับตั้งความยาวชิ้นงาน (3) การติดตั้งเสาชุดกดพร้อมแผ่นบาร์กดชิ้นงาน (4) โครงสร้างรางลำเลียง (5) ชุดรางลำเลียงพร้อมโครงและลูกกลิ้ง และ (6) ชุดตัดเหล็กเส้นแบบหลังการพัฒนา ลักษณะการประกอบชุดตัดหลังการพัฒนาแสดงดังภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ขั้นตอนการพัฒนาสร้างระบบรางลำเลียงสำหรับชุดตัดเหล็กเส้นแบบ

		
1 ตัวยึดชุดตัดเหล็กเข้ากับแกนไฮดรอลิก	2 การติดตั้งชุดรองรับแผ่นบาร์ปรับตั้งความยาวชิ้นงาน	3 การติดตั้งเสาชุดกดพร้อมแผ่นบาร์กดชิ้นงาน

ตารางที่ 1 (ต่อ)

		
4 โครงสร้างรางลำเลียง	5 ชุดรางลำเลียงพร้อมโครงและลูกกลิ้ง	6 ชุดตัดเหล็กเส้นแบนหลังการพัฒนา



ภาพที่ 2 เครื่องตัดเหล็กเส้นแบนหลังพัฒนา (พร้อมติดตั้งระบบรางลำเลียง)

5.4 การทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองใช้เหล็กเส้นแบนเกรด SS400 ขนาด 150×100 mm ความหนา 3, 6 และ 9 mm แต่ละความหนาเตรียมไว้จำนวน 10 piece ทดสอบเวลาและเตรียมเพิ่มอีก 30 ชิ้นต่อความหนา สำหรับการทดสอบความแม่นยำภายหลังการพัฒนาเครื่องมือวัดประกอบด้วยจับเวลาดิจิทัลความละเอียด 0.01s เวอร์เนียคาลิเปอร์ยี่ห้อ Mitutoyo ความละเอียด 0.02 mm และโปรแทรกเตอร์ความละเอียด 0.5° กระบวนการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบเวลาในการตัด เปรียบเทียบระหว่างวิธีการตัด 4 แบบ ได้แก่ (ก) ชุดตัดหลังพัฒนาซึ่งติดตั้งระบบรางลำเลียง (ข) ชุดตัดก่อนพัฒนาที่ไม่มีรางลำเลียง (ค) การตัดด้วยแก๊ส และ (ง) การตัดด้วยเลื่อยชักขนาด 14 in รุ่น HR-014 แต่ละวิธีทำการตัดเหล็กทั้งสามความหนาอย่างต่อเนื่องจำนวนความหนาละ 10 piece บันทึกเวลาตั้งแต่เริ่มป้อนชิ้นงานจนกระทั่งตัดขาดสมบูรณ์จากนั้นจึงวัดความ

ยาวและความฉากของชิ้นงานที่ได้ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบความแม่นยำของชุดตัดหลังพัฒนา ทำการตัดเหล็กแต่ละความหนาจำนวน 30 piece นำมาวัดความยาวจริงด้วยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์และวัดความฉากด้วยโปรแทรกเตอร์เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการตัดด้วยดัชนี C_p และ C_{pk} ต่อไปตัวอย่างข้อมูลเวลาในการตัดสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลเวลาในการตัด (s) สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

ครั้งที่	ชุดตัดก่อนพัฒนา (s)	ชุดตัดหลังพัฒนา (s)
1	8.6	3.8
2	8.7	3.9
3	8.5	3.7
4	8.6	3.8
5	8.8	3.9
6	8.5	3.7
7	8.6	3.8
8	8.7	3.8
9	8.6	3.9
10	8.5	3.7
เฉลี่ย	8.6	3.8
SD	0.10	0.08

5.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลมาคำนวณจากนั้นวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_p และ C_{pk}) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ± 1 mm ($USL=151$ mm, $LSL=149$ mm) เพื่อประเมินเสถียรภาพของกระบวนการ

6. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ได้แก่ 6.1 การเปรียบเทียบเวลาในการตัดระหว่างกระบวนการต่างๆ 6.2 ความแม่นยำของชิ้นงาน และ 6.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk}) พร้อมทั้งอภิปรายผลในหัวข้อ 7

6.1 การเปรียบเทียบเวลาในการตัด

การทดสอบประสิทธิภาพด้านเวลาดำเนินการโดยเปรียบเทียบระหว่างชุดตัดเหล็กเส้นแบนก่อนหลังการปรับปรุงติดตั้งระบบรางลำเลียงกับก่อนพัฒนารวมถึงเปรียบเทียบกับ การตัดด้วยแก๊สและการตัดด้วย

เครื่องเลื่อยชัก 14 in ทดสอบกับเหล็กเส้นแบนขนาด 150x100 mm ที่มีความหนา 3, 6 และ 9 mm จำนวนความหนาละ 10 piece ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบเวลาเฉลี่ยในการตัดเหล็กเส้นแบนขนาดความหนาต่างๆ

กระบวนการตัด	ความหนา 3 mm	ความหนา 6 mm	ความหนา 9 mm
ชุดตัดหลังพัฒนา (รางลำเลียง)	3.4 s	3.5 s	3.8 s
ชุดตัดก่อนพัฒนา	4.4 s	6.4 s	8.6 s
การตัดด้วยแก๊ส	24.1 s	27.4 s	31.2 s
เครื่องเลื่อยชัก 14 in	35.0 s	64.0 s	90.5 s

จากตารางที่ 3 พบว่าชุดตัดหลังพัฒนามีเวลาเฉลี่ยในการตัดลดลงเมื่อเทียบกับก่อนพัฒนาทุกความหนา สามารถลดเวลาได้คิดเป็น 20.83% สำหรับความหนา 3 mm 45.31% สำหรับความหนา 6 mm และ 55.81% สำหรับความหนา 9 mm เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดด้วยแก๊ส พบว่าชุดตัดหลังพัฒนาใช้เวลาน้อยกว่า 85.9%, 87.2% และ 87.8% สำหรับความหนา 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับเครื่องเลื่อยชักพบว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่า 90.3%, 94.5% และ 95.8% ตามลำดับ

6.2 ความแม่นยำของชิ้นงานหลังพัฒนา

การประเมินความแม่นยำด้านความยาวและความฉากของชิ้นงานหลังพัฒนาดำเนินการโดยวัดชิ้นงานทั้ง 10 pieces/mm ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ความละเอียด 0.02 mm และเครื่องวัดมุม ผลปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความแม่นยำของชิ้นงานหลังการพัฒนาระบบรางลำเลียง

ความหนา ชิ้นงาน (mm)	ความยาว เป้าหมาย (mm)	ความยาว เฉลี่ย (mm)	ความคลาด เคลื่อน (mm)	ความฉาก เฉลี่ย (°)	ความคลาดเคลื่อน ความฉาก (°)
3	150	150.2	+0.2	90.1	$\pm 0.8^\circ$
6	150	150.1	+0.1	89.9	$\pm 0.7^\circ$
9	150	150.2	+0.2	90.0	$\pm 0.6^\circ$

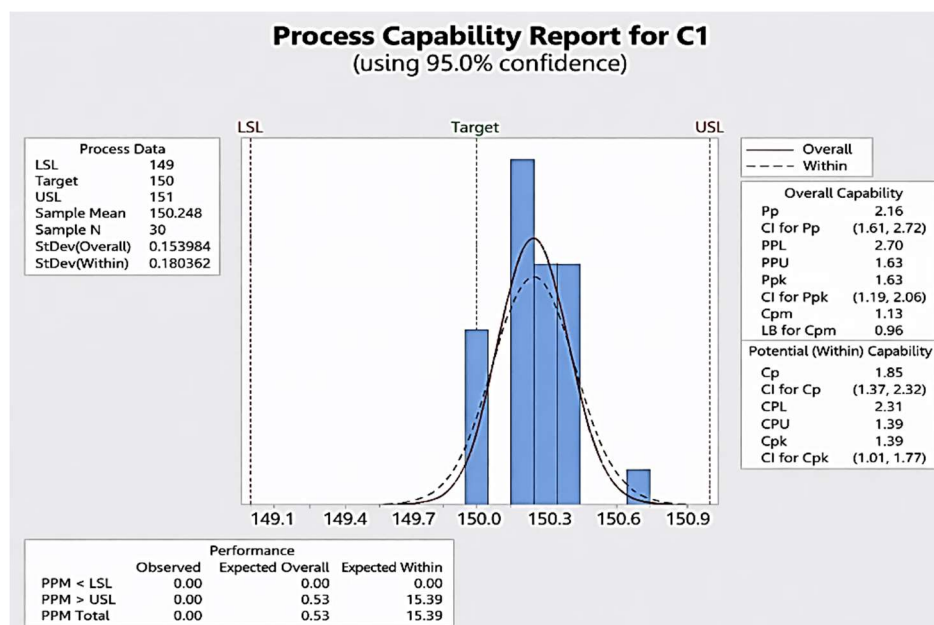
จากตารางที่ 4 พบว่าชิ้นงานทุกความหนามีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 150.1-150.2 mm มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 1 mm เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดในขอบเขตการวิจัย นอกจากนี้ ค่าความฉากเฉลี่ยของชิ้นงานทุกความหนาอยู่ที่ประมาณ 90° มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1^\circ$ แสดงให้เห็นว่าระบบรางลำเลียงช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอในการจัดตำแหน่งชิ้นงานก่อนตัดส่งผลให้ชิ้นงานมีความถูกต้องทางมิติ

6.3 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Cp และ Cpk) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การวิเคราะห์ดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index) ดำเนินการด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประเมินความเสถียรและศักยภาพของกระบวนการตัดหลังพัฒนา กำหนดค่าเป้าหมายความยาวชิ้นงานที่ 150 mm และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ± 1 mm USL=151 mm, LSL=149 mm ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนแต่ละความหนาแสดงดังภาพที่ 3 ถึง 5

6.3.1 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm ดำเนินการเพื่อประเมินเสถียรภาพของกระบวนการตัดโดยใช้ค่าดัชนี Cp และ Cpk เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 3



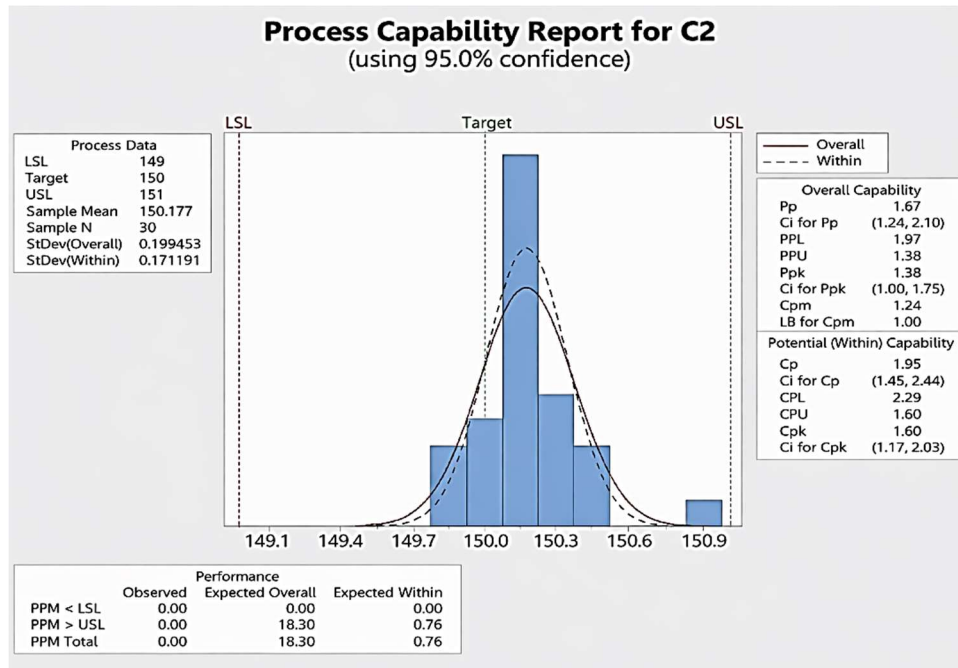
ภาพที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm

ภาพที่ 3 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.248 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.180 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ Cp และ Cpk มีค่าเท่ากับ 1.85 และ 1.39 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 [14] ยืนยันว่ากระบวนการยังสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าค่า Cpk จะต่ำกว่าค่า Cp เล็กน้อยซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการยังมีการเอียงศูนย์ไปทางขีดจำกัดบนบางส่วนเมื่อพิจารณาลักษณะของวัสดุ พบว่าเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm มีแนวโน้มเกิดการสั่นสะเทือนและการเบี่ยงตัวระหว่างการป้อนเข้าสู่ตำแหน่งตัดได้ง่ายกว่าวัสดุที่มีความหนามากกว่า เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างต่ำกว่าส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการสูงกว่ากลุ่ม 6 และ 9 mm เล็กน้อย ระบบ

รางลำเลียงและระบบไฮดรอลิกที่พัฒนาขึ้นยังสามารถควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุและรักษาความสม่ำเสมอของแรงเฉือนได้อย่างต่อเนื่องทำให้กระบวนการยังคงมีเสถียรภาพและสามารถผลิตชิ้นงานได้

6.3.2 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm ดำเนินการเพื่อประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการตัดโดยใช้ค่าดัชนี C_p และ C_{pk} เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของกระบวนการ ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4



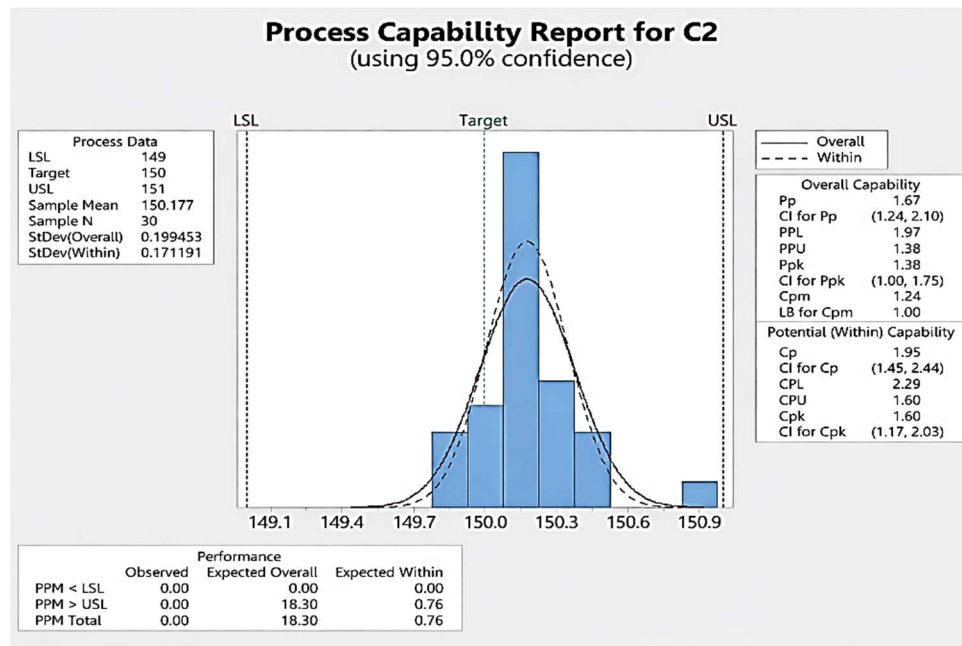
ภาพที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm

จากภาพที่ 4 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.100 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.171 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ C_p และ C_{pk} มีค่าเท่ากับ 1.95 และ 1.60 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 [15] ยืนยันว่ากระบวนการมีเสถียรภาพและสามารถควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูล พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ใกล้ค่าเป้าหมายมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานลดลงและช่วยเพิ่มเสถียรภาพการกระจายตัวของข้อมูลมีลักษณะสม่ำเสมอมากขึ้นระบบสามารถควบคุมความแปรปรวนของกระบวนการได้ดีขึ้นเหล็กเส้นแบนหนา 6 mm มีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างมากกว่าเหล็กเส้นแบนหนา 3 mm จึงช่วยลดการสั่นสะเทือนและการเบี่ยงตัวของชิ้นงานระหว่างการป้อนเข้าสู่ตำแหน่งตัดส่งผลให้ระบบรางลำเลียงสามารถควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของวัสดุได้มีเสถียรภาพมากขึ้นขณะเดียวกันระบบไฮดรอลิกสามารถ

ถ่ายทอดแรงเฉือนได้อย่างต่อเนื่องกระบวนการตัดมีความแม่นยำสูงขึ้นและลดโอกาสการเกิดของเสียภายในกระบวนการ

6.3.3 ผลการวิเคราะห์สำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm ดำเนินการเพื่อประเมินศักยภาพของกระบวนการตัดและความสามารถในการควบคุมคุณภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นใช้ค่าดัชนี C_p และ C_{pk} เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของกระบวนการผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการสำหรับเหล็กเส้นแบนหนา 9 mm

ภาพที่ 5 พบว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการ (Sample Mean) เท่ากับ 150.317 mm และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายในกระบวนการ (Within StDev) เท่ากับ 0.101 mm ส่งผลให้ค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ C_p และ C_{pk} มีค่าเท่ากับ 3.30 และ 2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการมีความแปรปรวนต่ำมากและมีศักยภาพสูงในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานให้เป็นไปตามข้อกำหนดเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลพบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ใกล้ค่าเฉลี่ยและมีการกระจายตัวต่ำมาก สอดคล้องกับค่าดัชนี C_{pk} ที่สูงกว่า 2.00 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับดีเยี่ยม กระบวนการมีเสถียรภาพสูงและสามารถควบคุมความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ยของกระบวนการจะมีแนวโน้มเอียงไปทางขีดจำกัดบนเล็กน้อย เหล็กเส้นแบนหนา 9 mm มีความแข็งแรงเชิงโครงสร้างสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทุกขนาดที่ใช้ในการทดสอบส่งผลให้การสั่นสะเทือนและการเคลื่อนตัวของชิ้นงานระหว่างกระบวนการตัดลดลงทำให้ระบบรางลำเลียงสามารถควบคุมตำแหน่งของวัสดุได้อย่างแม่นยำมากขึ้นขณะเดียวกันระบบไฮดรอลิกสามารถถ่ายทอดแรงเฉือนได้อย่างมีประสิทธิภาพและสม่ำเสมอ

ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของกระบวนการต่ำที่สุดและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงานได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 5 สรุปค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ (C_p , C_{pk})

ความหนาชิ้นงาน (mm)	C_p	C_{pk}	เกณฑ์มาตรฐาน (1.33)	ผลการประเมิน
3	1.85	1.39	ผ่าน	มีความสามารถเพียงพอ
6	1.95	1.60	ผ่าน	มีความสามารถเพียงพอ
9	3.30	2.26	ผ่าน	มีความสามารถดีเยี่ยม

จากตารางที่ 5 สรุปได้ว่ากระบวนการตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียงมีค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมทุกความหนาโดยความหนา 9 mm ให้ค่าสูงที่สุดเนื่องมาจากความหนาที่มากขึ้นทำให้ชิ้นงานมีแนวโน้มการโก่งตัวหรือการเคลื่อนที่ระหว่างตัดน้อยกว่าส่งผลให้ความแปรปรวนลดลง

7. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานในหัวข้อ 7.1-7.4 สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

7.1 ด้านเวลาในการตัด การติดตั้งระบบรางลำเลียงช่วยลดเวลาในการตัดลงอย่างชัดเจนเฉพาะในเหล็กหนา 9 mm ซึ่งก่อนพัฒนามีเวลาเฉลี่ย 8.6s หลังพัฒนาลดเหลือ 3.8s คิดเป็นประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 55.81% ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของระบบลำเลียง (Conveyor System Theory) ช่วยลดแรงต้านทานการเคลื่อนที่และลดเวลาในการจัดตำแหน่งชิ้นงานด้วยแรงงานคนที่พบว่าระบบสายพานลำเลียงสามารถลดเวลา [16] ในการเคลื่อนย้ายวัสดุได้

7.2 ด้านความแม่นยำ ระบบรางลำเลียงช่วยให้ตำแหน่งของชิ้นงานมีความสม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของความยาวไม่เกิน 1 mm และความฉากไม่เกิน 1° ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตการวิจัยที่กำหนดไว้ผลดังกล่าวเกิดจากการที่ระบบไฮดรอลิกสามารถควบคุมแรงกดได้อย่างคงที่ประกอบกับระบบลำเลียงที่ช่วยควบคุมตำแหน่งชิ้นงานให้ตรงกับแนวตัดรายงานวาระบบตัดด้วยไฮดรอลิกให้ความแม่นยำดี [17] กว่า การตัดด้วยแกส

7.3 ด้านความสามารถของกระบวนการ ค่า C_p และ C_{pk} ที่สูงกว่า 1.33 ในทุกความหนายืนยันว่ากระบวนการหลังพัฒนามีความเสถียรและมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลการศึกษาสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนดว่า $C_{pk} > 1.33$ ถือว่ากระบวนการมีความสามารถเพียงพอ [18] ค่า C_{pk} ที่เพิ่มขึ้นตามความหนาของชิ้นงาน (1.39, 1.60, 2.26) ชี้ให้เห็นว่ากระบวนการตัดเหล็กที่มีความหนามากกว่ามีแนวโน้มให้ความแม่นยำสูงกว่า เนื่องจากชิ้นงานมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างตัดน้อยกว่า

7.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย อย่างไรก็ตามค่า C_{pk} ที่ต่ำกว่า C_p ในทุกความหนา (โดยเฉพาะความหนา 3 mm ที่ค่า $C_{pk} = 1.39$ ซึ่งใกล้เคียงเกณฑ์) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการยังมีการเยื้องศูนย์ ซึ่งอาจเกิดจากการตั้งค่าตำแหน่งหยุดชิ้นงานหรือการสึกหรอของอุปกรณ์ ดังนั้น ควรมีการปรับตั้งศูนย์และบำรุงรักษาเครื่องอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้กระบวนการอยู่ในภาวะควบคุมที่ดียิ่งขึ้น

8. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการออกแบบและพัฒนาชุดตัดเหล็กเส้นแบนด้วยเครื่องกดไฮดรอลิกร่วมกับระบบรางลำเลียง ชุดตัดหลังพัฒนาสามารถลดเวลาในการตัดลงได้ 20.83%, 45.31% และ 55.81% สำหรับเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm ตามลำดับ เมื่อเทียบกับก่อนพัฒนาด้านความแม่นยำชิ้นงานมีความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 150.1-150.2 mm และความฉากเฉลี่ย $89.9-90.1^\circ$ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่กำหนดนอกจากนี้ การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการพบว่าค่า C_p/C_{pk} สำหรับเหล็กหนา 3, 6 และ 9 mm เท่ากับ 1.85/1.39, 1.95/1.60 และ 3.30/2.26 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่ 1.33 ผลการวิจัยยืนยันว่าระบบรางลำเลียงที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและควบคุมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

9. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการปรับตั้งและบำรุงรักษาระบบรางลำเลียงรวมถึงชุดตัดอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาความแม่นยำและเสถียรภาพของกระบวนการ นอกจากนี้ ในอนาคตอาจพัฒนาระบบป้อนชิ้นงานอัตโนมัติร่วมกับเซนเซอร์และ PLC รวมถึงระบบตรวจสอบขนาดแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ อีกทั้งควรศึกษาการประยุกต์ใช้กับวัสดุประเภทอื่นและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบที่พัฒนาขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.กิตติพล ขาวงาม ที่ปรึกษาวิจัย คุณจิรวัฒน์ ทุมมาลา คุณรัฐพล สวัสดิ์ และคุณสิวันฐ พลทิพย์ ผู้ริเริ่มแนวคิดต้นแบบระบบตัดเหล็กเส้นแบน และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่สนับสนุนทรัพยากรและอำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้บรรลุล่วงประสงค์

คำแถลงบทบาทและส่วนร่วมของผู้เขียน

เกียรติศักดิ์ ทาน้อย : เขียนต้นฉบับบทความ ดำเนินการทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล
วิษณุภาส นาคสูงเนิน : ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลภาคสนาม วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น จัดทำตาราง
พีระพงศ์ บัวพา : ออกแบบชิ้นส่วนระบบรางลำเลียงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ช่วยประกอบติดตั้งชุดตัดเหล็กเส้นแบน

กิตติพล ขาวงาม : กำหนดแนวความคิดการวิจัย ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย คำนวณวิเคราะห์ข้อมูล (Cp/Cpk) เขียนตรวจสอบและแก้ไขต้นฉบับ กำกับดูแลทิศทางการวิชาการ และบริหารจัดการโครงการวิจัย ผู้เขียนทุกคนได้อ่านและอนุมัติต้นฉบับบทความฉบับสุดท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Benić, J., Brezak, D., Šitum, Ž., Kolar, D., & Lisjak, D. (2023). Detailed experimental comparison of energy efficiency between proportional and direct driven hydraulic system. *Results in Engineering*, 18, 101178. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101178>
- [2] Sanchez-Marquez, R., & Jabaloyes Vivas, J. (2021). Building a C control chart: A novel and practical method for practitioners. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107428>
- [3] Huang, Z., Xu, Y., Ren, W., Fu, C., Cao, R., Kong, X., & Li, W. (2022). Design of position control method for pump-controlled hydraulic presses via adaptive integral robust control. *Processes*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.3390/pr10010014>
- [4] Thummala, C., Sawatdee, R., & Phontip, S. (2019). *Design and construction of a flat steel bar cutting machine applied by a hydraulic press machine*. Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus. (in Thai)
- [5] Li, L., Chen, H., Jin, R., Xu, Y., Liu, Q., Li, G., & Huang, H. (2024). Independent metering-based leveling system with multi-actuator for energy saving: Modeling, control, and application on large-size forming equipment. *Energy Conversion and Management*, 302, 118119. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118119>
- [6] Zhang, S., & Xia, X. (2011). Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Applied Energy*, 88(9), 3061–3071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.015>
- [7] Yu, B., Xie, N., Zheng, B., & Chen, D. (2019). Methodology and decentralised control of modularised changeable conveyor logistics system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(8), 739–749.
- [8] Wang, C.-N., Hsu, H.-P., & Tran, V.-V. (2017). An improved dispatching method (a-HPDB) for automated material handling system with active rolling belt for 450 mm wafer fabrication. *Applied Sciences*, 7(8), 780. <https://doi.org/10.3390/app7080780>
- [9] Borucka, A., Kozłowski, E., Antosz, K., & Parczewski, R. (2023). A new approach to production process capability assessment for non-normal data. *Applied Sciences*, 13(11), 6721. <https://doi.org/10.3390/app13116721>

- [10] Sandin, O., Rodríguez, J. M., Larour, P., Parareda, S., Frómeta, D., Hammarberg, S., ... Casellas, D. (2024). A particle finite element method approach to model shear cutting of high-strength steel sheets. *Computational Particle Mechanics*, 11(5), 1863–1886. <https://doi.org/10.1007/s40571-023-00708-5>
- [11] Liu, K.-F., Jin, T., Shang, Z.-T., & Wang, H. (2024). Neural adaptive dynamic surface control of an electro-hydraulic loading system for rail grinders. *Nonlinear Dynamics*, 112(16), 14191–14213. <https://doi.org/10.1007/s11071-024-09808-0>
- [12] Ruane, P., Walsh, P., & Cosgrove, J. (2022). Development of a digital model and metamodel to improve the performance of an automated manufacturing line. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.011>
- [13] de-Felipe, D., & Benedito, E. (2017). A review of univariate and multivariate process capability indices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 1687–1705. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0273-6>
- [14] Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons.
- [15] Sanchez-Marquez, R., & Jabaloyes Vivas, J. (2021). Building a Cpk control chart: A novel and practical method for practitioners. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107428>
- [16] Dulina, L., Zuzik, J., Furmannova, B., & Kukla, S. (2024). Improving material flows in an industrial enterprise: A comprehensive case study analysis. *Machines*, 12(5), 308. <https://doi.org/10.3390/machines12050308>
- [17] Hou, T., Kou, Z., Wu, J., Xu, P., Zhang, B., & Peng, Y. (2023). Positioning control strategy of hydraulic support pushing system in fully mechanized coal face. *Electronics*, 12(17), 3628. <https://doi.org/10.3390/electronics12173628>
- [18] Kwilinski, A., & Kardas, M. (2023). Enhancing process stability and quality management: A comprehensive analysis of process capability indices. *Virtual Economics*, 6(4), 73–92. [https://doi.org/10.34021/ve.2023.06.04\(5\)](https://doi.org/10.34021/ve.2023.06.04(5))

Research Article

การศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายใต้มุมเอียง
และอัตราการเติมสารทำงานที่แตกต่างกันโดยวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ

Experimental Investigation of the Heat Transfer Performance of a Two-Phase
Closed Thermosyphon under Different Inclination Angles and Filling Ratios
Using Dimensionless Analysis

กิตติพล ขาวงาม^{1*} และ พันธุ์เทพ คำพอง²

Kittipon Khaongam^{1*} and Phantep Khampong²

^{1*}สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

²ครูผู้ช่วย, โรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาอุดรธานี

^{1*}Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen Campus

² Assistant Teacher, Prachaksilpakarn School, The Secondary Educational Service Area Office Udonthani

*Corresponding author. E-mail: kittipon.khaongam@hotmail.com

Received: May 29, 2026

Revised: June 22, 2026

Accepted: June 26, 2026

Available online: June 28, 2026

APA Citation:

Khaongam, K., & Khampong, P. . (2026). Experimental Investigation of the Heat Transfer Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon under Different Inclination Angles and Filling Ratios Using Dimensionless Analysis. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 29–56. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.3>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งที่ผ่านมาแทบไม่มีการศึกษาปัจจัยทั้งสองร่วมกันอย่างละเอียดการทดลองได้ทดสอบ มุมเอียง 15°, 20° และ 25° จากแนวระนาบ อัตราการเติมสารทำงานเอทานอล ภายในส่วนให้ความร้อน 60%, 70% และ 80% ของปริมาตร การทดลองใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm และความยาวรวม 450 mm แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนให้ความร้อน 150 mm ส่วนอะเดียแบติก และส่วนระบายความร้อน อุณหภูมิของไหลร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบอยู่ที่ 55, 65 และ 85 °C ในขณะที่น้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 20 °C ประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความต้านทานทางความร้อน และกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบมีการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ เลขนัสเซลต์ (Nusselt number) เลขเรย์ลี (Rayleigh

number) และเลขจาคอบ (Jakob number) พบว่า ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ที่มุมเอียง 20° ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน 70% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวระบบมีค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนสูงกว่าสภาวะอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับการเดือดและการไหลพาความร้อนตามธรรมชาติที่เป็นที่ยอมรับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบกู้คืนความร้อนในอนาคต

คำสำคัญ: ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน อัตราการเติมสารทำงาน มุมเอียงของท่อ ตัวแปรไร้มิติ

Abstract

The primary purpose of this paper is to find the interaction between the inclination angle and filling ratio on the performance of a two-phase closed thermosyphon as both two parameters are rarely studied together in detail so far. The tests were conducted at an inclination angle of 15° , 20° and 25° from horizontal plane and filling ratios of 60%, 70% and 80% of the evaporator volume by ethanol. A copper tube with a diameter of 22 mm and a total length of 450 mm was used in the experiment; the tube was divided into three parts; 150 mm heating section, an adiabatic section, and a cooling section. The hot fluid inlet temperatures were 55, 65 and 85°C and the cooling water was held at 20°C constant. The results of the two-phase closed thermosyphon performance were evaluated based on the recovered heat transfer rate, thermal resistance, and by a second evaluation from the heat transfer inside the machine. To understand the figures the Nusselt number, Rayleigh number and Jakob number were used as dimensionless parameters. Based on the experimental results, it is found that the two-phase closed thermosyphon with 70% filling ratio and inclined at 20° gives the highest heat transfer performance. The thermal resistance was the lowest under these conditions, and the heat transfer was the highest amongst other conditions tested and the theory of boiling and natural convection was in good agreement. Clearly from this study, both the inclination angle and the filling ratio influence a lot the heat transfer efficiency within the two-phase closed thermosyphon. The data obtained will be useful for further design and implementation of the waste heat recovery systems.

Keywords: Two-Phase Closed Thermosyphon, Heat Transfer Performance, Filling Ratio, Inclination Angle, Dimensionless Parameters

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน Ghahremani et al. [1] ได้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนและการกู้คืนความร้อนทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นสิ่งสำคัญในงานวิศวกรรมพลังงานสมัยใหม่ เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมมีส่วนการใช้พลังงานความร้อนในระดับสูงและมีศักยภาพในการกู้คืนพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกเป็นจำนวนมาก ดังที่รายงานในงานวิจัยของ Malleswararao et al. [2], Forman et al. [3] และ Lomonaco et al. [4] การพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนประสิทธิภาพสูงจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดการใช้พลังงานขั้นต้น เพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสากล ดังที่กล่าวไว้ใน Sichamnan et al. [5] เทอร์โมไซฟอนพื้นที่หน้าตัดกลมแบบปิดสองสถานะ (Two-Phase Closed Thermosyphon, TPCT) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟที่สามารถลำเลียงพลังงานผ่านกลไกการระเหยและการควบแน่นของสารทำงาน อาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นตัวขับเคลื่อนไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกโครงสร้างแบบไม่มีไส้ดูดซับ (wickless structure) ทำให้มีความเรียบง่ายแข็งแรง และให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำตามที่อธิบายไว้ใน Faghri [6] ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว Kang et al. [7] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ TPCT อย่างแพร่หลายในระบบกู้คืนความร้อนทิ้ง ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบควบคุมอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมรวมถึง Sae-Jung et al. [8] และ Rittidech et al. [9] ได้ศึกษาประยุกต์ใช้ในระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในบริบทของประเทศไทยและ Jengsooksawat et al. [10] ได้พัฒนาระบบลู่วัสดุเทอร์โมไซฟอนร่วมกับห้องไอ (vapour chamber) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน วรรณกรรมที่ผ่านมาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับปัจจัยเชิงกลสองประการหลัก ได้แก่ อัตราการเติมสารทำงาน (filling ratio) และมุมเอียงของท่อ (inclination angle) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการไหลสองสถานะและประสิทธิภาพการเปลี่ยนสถานะภายในระบบ ในด้านอัตราการเติมสารทำงาน Mutalikdesai และ Kate [11] รายงานว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับที่รักษาสมดุลระหว่างปริมาตรของเหลวและไอ เพื่อหลีกเลี่ยงทั้งสถานะแห้ง (dry-out) ที่ส่วนทำระเหยและการสะสมของของเหลวมากเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขัง (flooding) ซึ่งเพิ่มความต้านทานทางความร้อน Shabgard et al. [12] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความร้อนชั่วขณะภายใต้อัตราการเติมที่แตกต่างกัน และพบว่าค่า optimal filling ratio ไม่ใช่ค่าคงที่แต่ขึ้นอยู่กับภาวะความร้อนและขนาดของท่อ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ Lin et al. [13] ศึกษาผลของสภาพการเปียกผิว (surface wettability) ต่อ TPCT ด้วยวิธีเชิงตัวเลข ในขณะที่ Ghaffari et al. [14] พบว่าในระบบระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ อัตราการเติมที่ต่ำมากอาจให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดในบางสถานะ ซึ่งแตกต่างจากแนวคิดทั่วไป แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของระบบขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานเป็นสำคัญ ในด้านมุมเอียงของท่อ Lataoui et al. [15] ศึกษา TPCT ในระบบเครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดสุญญากาศและพบว่ามุมเอียงที่เหมาะสมไม่ได้มีค่าคงที่แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการทำงาน สอดคล้องกับผลงานของ Khaongam และ Srihajong [16] ที่ศึกษาผลของการปรับมุมเอียงของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น พบว่าสามารถเพิ่มค่า heat flux และลดค่าความต้านทานทางความร้อนได้ Solomon et al. [17] ยืนยันด้วยวิธีเชิงตัวเลขว่ามุม

เอียงมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลสองสถานะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแม้จะมีความพยายามในการศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหรืออัตราการเติมสารทำงานในลักษณะแยกส่วน (isolated parameters) กล่าวคือ งานที่ศึกษามุมเอียงมักกำหนดอัตราการเติมให้คงที่ในขณะที่งานที่ศึกษาอัตราการเติมมักกำหนดมุมเอียงให้ตายตัว [11-17] ซึ่งทำให้ไม่สามารถจับปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองได้ส่งผลให้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของพารามิเตอร์เหล่านี้ภายใต้สภาวะการทำงานจริงที่อาจมีความผันผวนนั้นยังไม่สมบูรณ์นอกเหนือจากพารามิเตอร์เชิงกลแล้ว การวิเคราะห์สมรรถนะของ TPCT ผ่านตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameters) เป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจกลไกทางฟิสิกส์ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเนื่องจากตัวแปรเหล่านี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบที่มีความหมายเชิงกายภาพและสามารถเปรียบเทียบกันได้ในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวแปรไร้มิติ 3 ตัว ได้แก่ Nusselt Number (Nu), Rayleigh Number (Ra) และ Jakob Number (Ja) เนื่องจากตัวแปรทั้งสามนี้ครอบคลุมกลไกหลักของการถ่ายเทความร้อนภายใน TPCT ประกอบด้วย การพาความร้อน (convection), แรงลอยตัวที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (buoyancy-driven flow) และการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน (phase change) ตามลำดับ โดย Nusselt Number (Nu) เป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนต่อการนำความร้อนผ่านชั้นสารทำงานที่อยู่ผนังในบริบทของ TPCT ค่า Nu ที่สูงหมายถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอและของเหลวภายในท่อช่วยพาความร้อนออกจากผิวผนังได้ดีกว่าการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ค่า Nu จึงช่วยให้ทราบว่าสภาวะการทำงานนั้น ๆ ส่งเสริมหรือลดทอนการพาความร้อนภายในระบบอย่างไร Gedik [18] พบว่าค่า Nu ของ TPCT เพิ่มขึ้นตามอัตราการถ่ายเทความร้อนและมีค่าสูงสุดที่มุมเอียงเหมาะสม ขณะที่ Zhang et al. [19] ใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับสภาวะการทำงานในท่ออุณหภูมิสูง Rayleigh Number (Ra) เป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายความสมดุลระหว่างแรงลอยตัว (buoyancy force) กับแรงหนืด (viscous force) และการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusion) ค่า Ra ที่สูงหมายถึงแรงลอยตัวมีอิทธิพลเหนือแรงหนืดและแรงต้านการนำความร้อน ส่งผลให้เกิดการไหลแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) ที่รุนแรง Chami และ Zoughaib [20] อธิบายว่า Ra เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงแรงขับเคลื่อนหลักของ TPCT คือ แรงโน้มถ่วงและความแตกต่างของอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารทำงานโดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอก ดังนั้น การวิเคราะห์ Ra จึงช่วยให้เข้าใจว่าแรงลอยตัวมีมากเพียงพอที่จะทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ดีหรือไม่ โดยเฉพาะเมื่อมุมเอียงเปลี่ยนไปแรงโน้มถ่วงที่กระทำในแนวแกนท่อจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลโดยตรงต่อค่า Ra และด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อรูปแบบการไหลและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ส่วน Jakob Number (Ja) เป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัส (sensible heat) ที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารทำงาน กับความร้อนแฝง (latent heat) ที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะค่า Ja ที่สูงแสดงว่าพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงานมากกว่าการเปลี่ยนสถานะ ในทางกลับกันหากค่า Ja ต่ำ แสดงว่าพลังงานความร้อนถูกใช้ไปกับการเปลี่ยนสถานะเป็นหลัก ซึ่งเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูงในการลำเลียงความร้อน Xu et al. [21] และ Cai et al. [22]

ใช้ Ja ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะของ TPCT และพบว่า Ja มีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสถียรของระบบการวิเคราะห์ค่าร่วมระหว่าง Ja กับอัตราการถ่ายเทความร้อนจะช่วยให้เราสามารถระบุได้ว่าสภาวะการทำงานใดที่ส่งเสริมการเปลี่ยนสถานะได้ดีที่สุดความท้าทายสำคัญอีกประการหนึ่งในการพัฒนาระบบ TPCT คือการจัดการกับความไม่เสถียรของการไหลสองสถานะซึ่งอาจนำไปสู่ปรากฏการณ์แห้งหรือการไหลย้อนกลับที่ไม่สมบูรณ์ Perinba Selvin Raj et al. [23] ได้เสนอการออกแบบเทอร์โมไซฟอนแบบรูปที่มีช่องไอคู่และช่องของเหลวเดี่ยว พร้อมห้องขดเชยเพื่อลดความไม่เสถียรของการไหล Mana et al. [24] พบว่าเทอร์โมไซฟอนแบบรูปที่มีช่องไอคู่ช่วยเพิ่มความเร็วของการไหลของไอและส่งเสริมการควบแน่นที่รวดเร็วยิ่งขึ้น He et al. [25] วิเคราะห์ลักษณะความไม่เสถียรของรูปเทอร์โมไซฟอนในช่วงอัตราการเดินที่กว้างและพบว่าความไม่เสถียรเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในช่วงอัตราการเดินที่ต่ำและสูงเกินไปขณะที่ Smith et al. [26] ศึกษาผลของมุมคดและอัตราการเดินต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนและพบว่ารูปแบบการไหลมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เชิงเรขาคณิต นอกจากนี้ Rukruang et al. [27] ได้ศึกษาขีดจำกัดและศักยภาพของเทอร์โมไซฟอนแบบช่องขนาดเล็กหลายช่องสำหรับการระบายความร้อนด้วยอากาศในด้านการปรับปรุงพื้นผิวและการระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ Larimi et al. [28] พัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบพื้นผิวแบบ Multi-Scale Electroplated Porous (MuSEP) ซึ่งสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบเดือด Vincent et al. [29] พัฒนารูปแบบการทำนายความต้านทานความร้อนของ TPCT แบ่งความต้านทานรวมออกเป็นสามองค์ประกอบย่อยเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด ซึ่ง Ghaffari et al. [30] นำไปประยุกต์ใช้เพื่อผลักดันขีดจำกัดของการระบายความร้อนด้วยอากาศสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์กำลังสูงในด้านการพัฒนาวิธีการออกแบบสมัยใหม่ Wansasueb et al. [31] ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิรวมของท่อความร้อน ขณะที่ Wang et al. [32] พัฒนาความสัมพันธ์เชิงประจักษ์สำหรับการทำนายฟลักซ์ความร้อนของ TPCT พิจารณาตัวแปรไร้มิติที่ครอบคลุมกลไกการถ่ายเทความร้อนสองสถานะ นอกจากนี้ Khaongam et al. [33] ได้ศึกษารูปแบบการไหลภายในเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่เน้นส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหยซึ่งสร้างจากแก้ว และ Pipatpaiboon et al. [34] ได้นำเสนอวิธีการลดการสูญเสียความร้อนในส่วนอะเดียแบติก TPCT แม้ว่างานวิจัยข้างต้นจะให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสมรรถนะของ TPCT ภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลายแต่เมื่อพิจารณาอย่างเป็นระบบแล้วพบว่ามีข้อจำกัดและช่องว่างทางความรู้ที่สำคัญ ประการแรก วรรณกรรมส่วนใหญ่ยังคงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเดินสารทำงานในลักษณะแยกส่วน (isolated parameter studies) ซึ่งไม่สามารถจับปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองได้ ส่งผลให้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของพารามิเตอร์เหล่านี้ภายใต้สภาวะการทำงานจริงซึ่งมีความผันผวนนั้นยังคงไม่สมบูรณ์ [11-17], [35-39] งานวิจัยที่ศึกษาผลรวมอย่างเป็นระบบยังมีจำนวนจำกัด และยังไม่มีการนำเสนอขอบเขตการทำงานที่เหมาะสม (optimal operating envelope) ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองพารามิเตอร์ ประการที่สอง แม้งานวิจัยบางชิ้นจะใช้ตัวแปรไร้มิติในการวิเคราะห์สมรรถนะ [32], [18-20] แต่ยังไม่มีการเชื่อมโยงเชิงระบบระหว่างพารามิเตอร์เชิงกลที่

ปรับเปลี่ยนได้ (มุมเอียงและอัตราการเติม) กับกลไกทางฟิสิกส์ที่ถูกควบคุมโดยตัวแปรไร้มิติ (Nu, Ra, Ja) ภายในชุดการทดลองเดียวกันกล่าว คือยังขาดการศึกษาเชิงปริมาณที่อธิบายว่าเมื่อเปลี่ยนมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน ค่า Nu, Ra และ Ja เปลี่ยนแปลงไปอย่างไรและ การเปลี่ยนแปลงนั้นสอดคล้องกับพฤติกรรมการเดือดและการไหลแบบสองสถานะภายในท่อหรือไม่ซึ่งเป็นองค์ความรู้สำคัญในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดบนพื้นฐานเชิงกลไก ประการที่สาม งานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เสนอเพียงสถานะที่ให้สมรรถนะสูงสุด (best point) โดยไม่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดสถานะนั้นจึงดีที่สุดและสถานะใกล้เคียงมีพฤติกรรมแตกต่างกันอย่างไร [35], [40] ยังขาดการศึกษาที่วิเคราะห์เชิงลึกถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหล (flow pattern) ค่าการถ่ายเทความร้อนและเสถียรภาพของระบบในมิติของตัวแปรไร้มิติเพื่อสร้างขอบเขตการทำงานที่เหมาะสม (optimal operating map) ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพจากช่องว่างทางความรู้ดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีความแปลกใหม่ (Novelty) ที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาอย่างชัดเจนในประเด็นสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ (1) การศึกษาปฏิสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เชิงกลแบบเต็มรูปแบบโดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (full factorial design) เพื่อศึกษาผลรวม (interaction effect) ของมุมเอียง 15° , 20° , 25° และอัตราการเติมสารทำงาน 60%, 70%, 80% ภายใต้ช่วงกำลังความร้อนที่แตกต่างกัน 55, 65, 85 °C ซึ่งครอบคลุมสภาวะการทำงานที่หลากหลายกว่าที่เคยมีรายงานมาก่อนทำให้สามารถจับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและจุดเปลี่ยนผ่าน (transition points) ของระบบได้อย่างแม่นยำ (2) การวิเคราะห์เชิงกลไกด้วยตัวแปรไร้มิติสามตัวพร้อมกันงานวิจัยนี้ไม่ได้หยุดอยู่เพียงการรายงานค่าฟลักซ์ความร้อนหรือความต้านทานทางความร้อนเท่านั้นแต่นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu, Ra และ Ja อย่างเป็นระบบเพื่ออธิบายว่าแรงลอยตัว (Ra) ขับเคลื่อนการไหลอย่างไร การพาความร้อน (Nu) ตอบสนองต่อการไหลอย่างไรและการเปลี่ยนสถานะ (Ja) ได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลอย่างไร ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่างกลไกระดับจุลภาค (micro-scale phase change) กับสมรรถนะระดับมหภาค (macro-scale performance) ที่ไม่เคยมีรายงานอย่างเป็นระบบในงานวิจัยก่อนหน้านี้และ (3) การนำเสนอขอบเขตการทำงานที่เหมาะสมบนพื้นฐานทางฟิสิกส์ งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่นำเสนอสถานะที่ให้สมรรถนะสูงสุดเท่านั้นแต่ยังวิเคราะห์เชิงลึกว่าเหตุใดสภาวะดังกล่าวจึงเหมาะสมที่สุด อาศัยการตีความค่าตัวแปรไร้มิติควบคู่กับทฤษฎีการเดือดและการควบแน่นรวมถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลและเสถียรภาพของระบบซึ่งจะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ใช่เพียงการลองผิดลองถูก จากช่องว่างทางความรู้และความแปลกใหม่ที่นำเสนอดังกล่าวงานวิจัยชิ้นนี้จึงถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาเชิงทดลองอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับผลรวมของมุมเอียงของท่อและอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อนของ TPCT ภายใต้ช่วงกำลังความร้อนที่กำหนด (สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อ 2.1) พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตัวแปรไร้มิติ (Nu, Ra, Ja) เพื่ออธิบายกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทความร้อนอย่างครอบคลุมและระบุสภาวะการทำงานที่เหมาะสม (สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อ 2.2) ผลการศึกษานี้คาดว่าจะช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ในด้านการออกแบบ TPCT ที่มีพื้นฐานเชิงกลไกและสนับสนุนการพัฒนาแนว

ทางการออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกักเก็บความร้อนทั้งระบบพลังงานความร้อนในภาคอุตสาหกรรมและระบบจัดการความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่กำหนด

2.2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนด้วยการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers อธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อน ระบุสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 วิจัยนี้จำกัดการศึกษาเฉพาะท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดท่อเดี่ยวที่ทำงานภายใต้แรงโน้มถ่วงผลิตจากท่อทองแดงผิวเรียบเป็นโครงสร้างหลัก

3.2 ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานเพียงชนิดเดียว ไม่พิจารณาสารทำงานชนิดอื่น

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ มุมเอียงของท่อ 15° , 20° และ 25° จากแนวระดับ อัตราการเติมสารทำงาน 60%, 70% และ 80% ของปริมาตรส่วนทึบ

3.4 สมรรถนะของท่อความร้อนถูกประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อน

3.5 การทดลองใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 55, 65 และ 85 °C ร่วมกับน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ 20 °C ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวถูกเลือกให้สอดคล้องกับระบบกักเก็บความร้อนที่อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 50-100 °C ในภาคอุตสาหกรรม [3-4] รวมถึงการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในระบบพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิทำงานใกล้เคียงกัน [41] ตลอดจนเหมาะสมกับจุดเดือดของเอทานอล 78 °C เพื่อศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนสถานะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

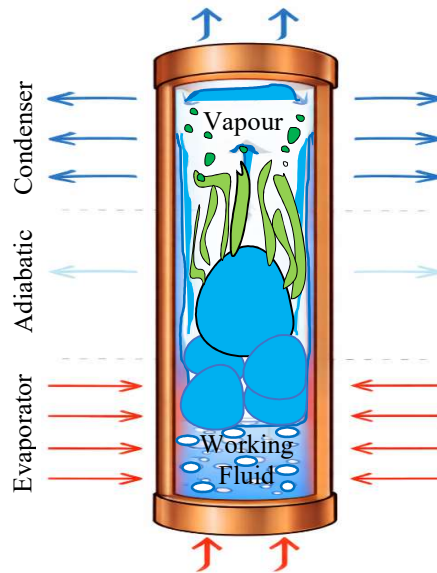
3.6 การวิเคราะห์ผลจำกัดเฉพาะสมรรถนะและตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob ไม่พิจารณาการจำลองเชิงตัวเลขหรือการทดสอบระดับอุตสาหกรรม

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ใช้การไหลเวียนของสารทำงานในท่อปิดและการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไออาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นแรงขับเคลื่อนหลักทำให้สามารถลำเลียงความร้อนจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณอุณหภูมิต่ำได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทางกลหรือ

พลังงานภายนอกโครงสร้างภายในมี 3 บริเวณสำคัญ ส่วนควบแน่น ส่วนกันความร้อน และส่วนทำระเหย พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ส่วนทำระเหยทำให้สารทำงานเดือดและเปลี่ยนเป็นไอจากนั้นไอจะเคลื่อนสู่ส่วนควบแน่นเพื่อปลดปล่อยพลังงานและกลับเป็นของเหลวก่อนที่จะไหลย้อนกลับลงสู่ส่วนทำระเหย ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเกิดวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในทุกระบบปิด ลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อน

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถประเมินได้จากหลักสมดุลพลังงานของของไหลหล่อเย็นที่ไหลผ่านบริเวณส่วนทำระเหยหรือส่วนควบแน่น [42] ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของสมการต่อไปนี้ ดังสมการที่ 1

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W) $\dot{m}$ = ปริมาณการไหลของมวลสารหล่อเย็นต่อหน่วยเวลา (kg/s) c_p = ความสามารถในการเก็บความร้อนของของไหล (J/kg·K) T_{out} = อุณหภูมิของไหลขณะไหลออกจากระบบ (K หรือ °C) T_{in} = อุณหภูมิของไหลก่อนเข้าสู่ระบบ (K หรือ °C)

4.3 ค่าความต้านทานทางความร้อน

ค่าความต้านทานทางความร้อนจากอุณหภูมิเฉลี่ยของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นงานวิจัยนี้นิยมค่าความต้านทานทางความร้อนในรูปของอุณหภูมิผืนท่อกและฟลักซ์ความร้อน [43] ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2

$$R_{th} = \frac{T_{w,e} - T_{w,c}}{Q} \quad (2)$$

เมื่อ R_{th} = ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (K / W)
 $T_{w,e}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนทำระเหย (K หรือ °C) $T_{w,c}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนควบแน่น (K หรือ °C) Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน

มุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีผลต่อการไหลย้อนกลับของสารทำงานในสถานะของเหลวภายใต้แรงโน้มถ่วง ขณะที่อัตราการเติมสารทำงานส่งผลต่อพฤติกรรมการณ์เดือดและการควบแน่นภายในท่อ อัตราการเติมสารทำงาน [44] สามารถนิยามได้ ดังสมการที่ 3

$$FR = \frac{V_f}{V_e} \quad (3)$$

เมื่อ FR = อัตราการเติมสารทำงาน (– หรือ %) V_f = ปริมาตรของสารทำงานที่เติมลงในท่อ (m³) V_e = ปริมาตรของส่วนทำระเหย (m³)

สำหรับปริมาตรของส่วนทำระเหยท่อทรงกระบอกหาได้จากสมการเรขาคณิต [45] ดังสมการที่ 4

$$V_e = \frac{\pi D_i^2}{4} L_e \quad (4)$$

เมื่อ D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m) L_e = ความยาวของส่วนทำระเหย (m)

4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการณ์เดือดภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนงานวิจัยนี้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ Nusselt, Rayleigh และ Jakob Number

4.5.1 Nusselt Number (Nu) ในบริบทของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ค่า Nu ที่สูงหมายถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากการพาความร้อนจากการเคลื่อนที่ของไอและของเหลวเหนือกว่าการนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุ [18] คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W / m²·K) D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m) k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน (W / m·K)

4.5.2 Rayleigh Number (Ra) สำหรับท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนค่า Ra ที่สูงสะท้อนถึงอิทธิพลของแรงลอยตัวที่ขับเคลื่อนการไหลของไอขึ้นด้านบนและของเหลวไหลกลับลงด้านล่าง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของสารทำงานโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก [20] คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_{sat})D^3}{\nu\alpha} \quad (6)$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2) β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ($1/K$) T_w = อุณหภูมิผนังท่อ (K) T_{sat} = อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงาน (K) ν = ความหนืดจลน์ (m^2/s) α = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน (m^2/s)

4.5.3 Jakob Number (Ja) บ่งชี้อัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัสต่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งใช้ประเมินพฤติกรรมการเดือดและการเปลี่ยนสถานะภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [19] คำนวณได้จากสมการที่ 7

$$Ja = \frac{Cp(T_w - T_{sat})}{h_{fg}} \quad (7)$$

เมื่อ Cp = ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg\cdot K$) h_{fg} = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Propagation) เนื่องจาก Q คำนวณจาก 3 ตัวแปรที่วัดได้ ($\dot{m}, T_{c,out}, T_{c,in}$) ความไม่แน่นอนรวม W_Q จึงต้องคำนวณกระจายความคลาดเคลื่อนจากทุกตัวแปร [46] ตามสมการที่ 8

$$W_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} W_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{c,out}} W_{T_{c,out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{c,in}} W_{T_{c,in}}\right)^2} \quad (8)$$

เมื่อ W_Q = ความไม่แน่นอนรวมของ (W), $W_{\dot{m}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอัตราการไหล kg/s $W_{T_{c,in}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิทางเข้า ($^{\circ}C$ หรือ K), $W_{T_{c,out}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิทางออก ($^{\circ}C$ หรือ K), $\frac{\partial Q}{\partial x_i}$ = สัมประสิทธิ์ความไวขึ้นกับตัวแปร x_i

การประเมินความไม่แน่นอนรวมเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดใช้วิธีการ propagate uncertainty ตามทฤษฎีของ Kline และ McClintock (1953) พิจารณาจากความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดแต่ละชนิด ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

(± 0.5 °C) โรตاميเตอร์ ($\pm 2\%$) และแหล่งจ่ายความร้อน ($\pm 1\%$) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดของพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ ได้แก่ ฟลักซ์ความร้อน (q) อยู่ที่ $\pm 5.2\%$ ค่าความต้านทานทางความร้อน (R_{th}) อยู่ที่ $\pm 6.8\%$ และเลขนัสเซิลต์ (Nu) อยู่ที่ $\pm 7.1\%$ อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ไม่เกิน $\pm 10-15\%$) สำหรับการทดลองทางความร้อนตามมาตรฐานงานวิจัยด้านท่อความร้อน

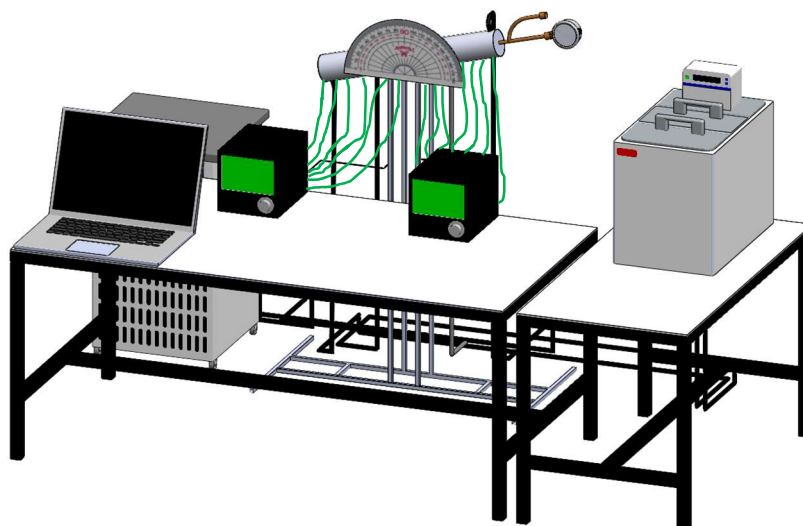
4.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่รายงานว่ามีมอดูเลียงและอัตราการเต็มสารทำงานมีความสำคัญต่อสมรรถนะของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนการเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถลดค่าความต้านทานทางความร้อนและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่วิเคราะห์ผลร่วมกันของพารามิเตอร์ดังกล่าวพร้อมการอธิบายในรูปของตัวแปรไร้มิติยังมีจำนวนจำกัด ซึ่งเป็นช่องว่างขององค์ความรู้ที่งานวิจัยนี้ศึกษา

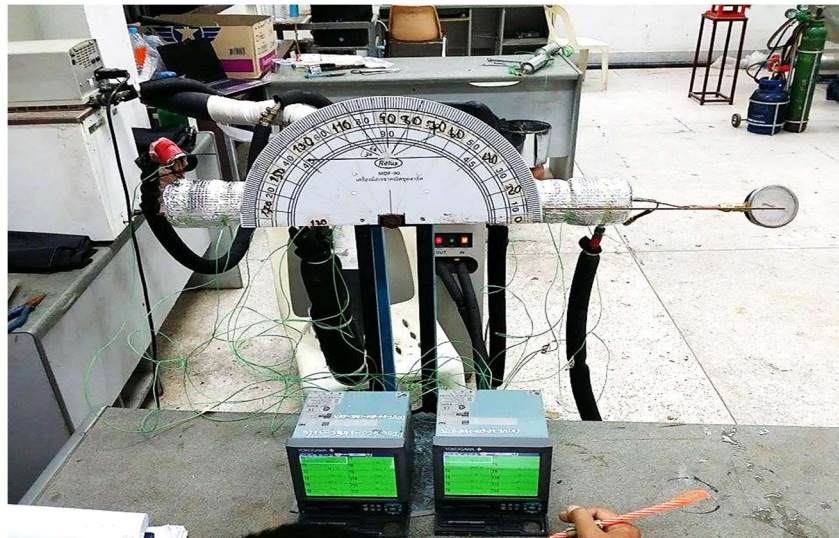
5. ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

5.1 อุปกรณ์การทดลอง

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการศึกษานี้ผลิตจากท่อทองแดงผิวเรียบ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนทำระเหย 2) ส่วนอะเดียแบติก และ 3) ส่วนควบแน่น ดังแสดงในภาพที่ 1 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยแหล่งให้ความร้อนบริเวณส่วนทำระเหยใช้น้ำร้อน และระบายความร้อนบริเวณส่วนควบแน่นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน ดังแสดงในภาพที่ 2 การทดสอบในห้องแล็บ ภาพที่ 3 การวัดอุณหภูมิผนังท่อใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (accuracy $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger, รุ่น DX1000, Yokogawa) ส่วนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นวัดด้วยโรตاميเตอร์ (ช่วง 0-5 L/min, accuracy $\pm 2\%$)



ภาพที่ 2 แผนภาพระบบการทดสอบแสดงตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล และระบบควบคุมอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและระบายความร้อน (TPCT)



ภาพที่ 3 ชุดทดสอบต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนพร้อมระบบปรับมุมเอียง

5.2 การเตรียมสารทำงาน

ก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละสภาวะ ได้ทำการดูต้ออากาศภายในท่อเทอร์โมไซฟอนออกด้วยปั๊มสุญญากาศ รุ่น RV3, Edwards เป็นเวลา 39 min เพื่อกำจัดแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ Non-condensable gas ออกจากระบบจากนั้นจึงทำการเติมสารทำงาน เอทานอล ความบริสุทธิ์ 99.9% อัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ตามลำดับ

5.3 วิธีการทดลอง

การทดลองถูกออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมเอียง 15° , 20° และ 25° จากแนวระนาบ และอัตรา การเติมสารทำงานกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าส่วนทำระเหยแปรผันในช่วง 55 , 65 และ 85°C เพิ่มขึ้น 10 ไป 20°C และควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าส่วนควบแน่นคงที่ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ตลอดการทดสอบในแต่ละสภาวะการทดลองระบบจะถูกปล่อยให้ทำงานจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว Steady state พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ไม่เกิน $\pm 0.5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 18 min จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขเพื่อความน่าเชื่อถือ

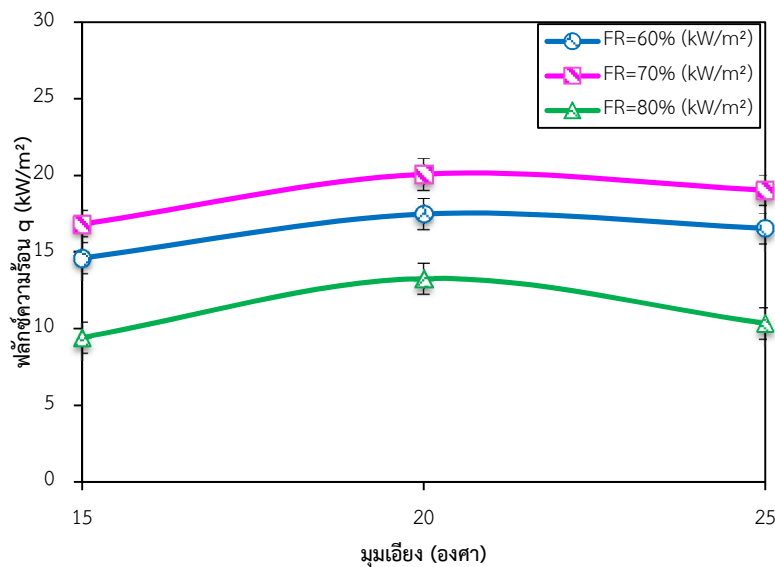
5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่บันทึกได้ถูกนำมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) ที่ส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหย ใช้สมการที่ (1) จากสมดุลพลังงานของของไหลหล่อเย็น ต่อด้วยคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน (R_{th}) จากสมการที่ (2) ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยแปรไร้มิติ Nusselt, Rayleigh และ Jakob คำนวณจากสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ สำหรับการประเมินความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัด หลักการ propagate uncertainty ตามสมการที่ (8) พิจารณาความคลาดเคลื่อนอุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิล $\pm 0.5^\circ\text{C}$ และโรตاميเตอร์ $\pm 2\%$ เป็นหลัก

6. ผลการทดลอง

6.1 ผลของมุมเอียงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนถูกคำนวณจากสมการสมดุลพลังงาน และนำมาวิเคราะห์ผลของมุมเอียงของท่อภายใต้อัตราการเดินสารทำงานที่แตกต่างกันผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อและอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 4



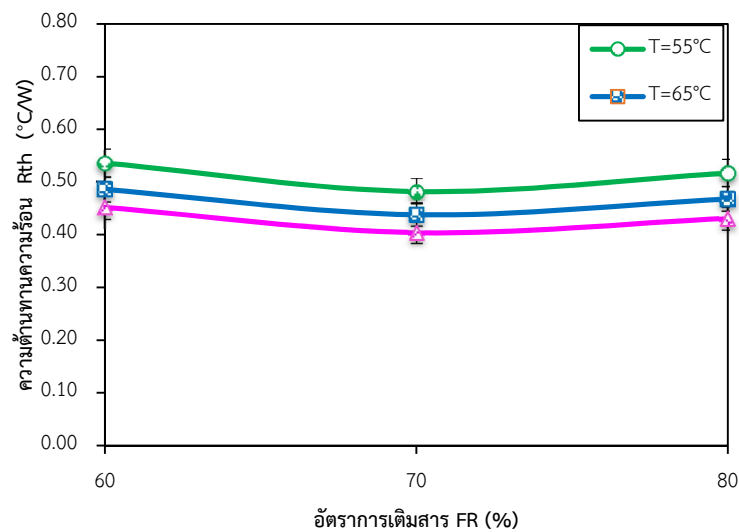
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการเดินสารทำงาน 60%, 70% และ 80%

จากภาพที่ 4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามุมเอียงส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบ เปลี่ยนไปสังเกตได้จากแนวโน้มของฟลักซ์ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามองศาการเอียง ดังนี้ ที่มุมเอียง 15° การกระจายตัวของของเหลวบนผิวท่อที่มีแนวโน้มสะสมเป็นฟิล์มหนาในบริเวณส่วนควบแน่น ทำให้การนำและการเปลี่ยนสถานะถูกจำกัดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการคืบตัวของของเหลวยังมีแรงขับเคลื่อนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ความร้อนอยู่ในระดับต่ำเพียง 9.5-16.8 kW/m² ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเดินสาร ซึ่งสะท้อนถึงความหน่วงของการไหลเวียนและรูปแบบการไหลที่มีความคงตัวต่ำ [35] เมื่อปรับมุมเอียงเป็น 20° การเคลื่อนที่ของไอและการไหลย้อนกลับของของเหลวเข้าสู่ภาวะสมดุลที่สุดทำให้การก่อตัวของฟิล์มบางและการควบแน่นบนผนังเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกับการไหลแบบลามินาร์ที่มีเสถียรภาพสูง ช่วยลดการสะสมของของเหลวส่วนเกินและสนับสนุนการพาความร้อนที่ต่อเนื่องส่งผลให้ฟลักซ์ความร้อนพุ่งสูงสุด [36] อย่างมีนัยสำคัญ ค่าอยู่ที่ 13.5-19.56 kW/m² สูงสุดที่ FR=70% ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 15-25% เมื่อเทียบกับมุม 15° แสดงว่าประสิทธิภาพของการระเหยต่อการควบแน่นถูกยกระดับสูงสุดและอัตราการถ่ายเทความร้อนเกิดค่ามากที่สุดในกลุ่มการทดสอบทั้งหมด [37] ส่วนที่มุมเอียง 25° แม้แรงลอยตัวของไอจะเพิ่มสูงขึ้นตามมุมที่ชันขึ้นแต่การไหลของไอในช่องทางแคบเริ่มเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นจนเกิดการสั่นสะเทือนของอุณหภูมิและ

ช่วงของการแห้งเป็นบางช่วงเป็นผลมาจากการรบกวนของอินเตอร์เฟสระหว่างไอและของเหลวส่งผลให้พลังความร้อนลดลงมาอยู่ที่ 10.2-18.8 kW/m² กลไกการเปลี่ยนสถานะและการลำเลียงพลังงานขาดความเสถียรลง แม้ค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนอาจยังคงสูงกว่ากรณี 15° แต่ไม่สามารถรักษาสมรรถนะในระดับที่สม่ำเสมอได้เช่นเดียวกับมุม 20° ที่เหมาะสมที่สุด [38], [39]

6.2 ค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนถูกเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุด คือ มุมเอียง 20° นำมาคำนวณจากอัตราส่วนของผลต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 5



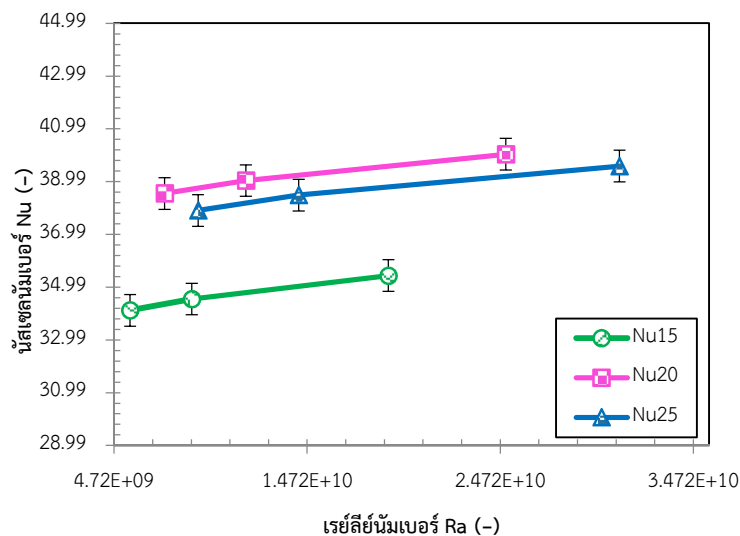
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเต็มสารทำงานต่างกัน

จากภาพที่ 5 ภายใต้สภาวะมุมเอียง 20° ปริมาณสารทำงานภายในท่อมีผลต่อค่าความต้านทานความร้อนรวมในลักษณะที่ไม่เป็นสัดส่วนเชิงเส้นระบบแสดงสมรรถนะสูงสุดที่ FR 70% ให้ความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด [40] อยู่ที่ประมาณ 0.50 °C/W เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อน $T_e=55^\circ\text{C}$ ลดลงต่อเนื่องเป็น 0.44 /W และ 0.40 °C/W สำหรับสภาวะ $T_e=65^\circ\text{C}$ และ $T_e=85^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับพฤติกรรมของการไหลของไอและของเหลวที่เสถียรที่สุดเนื่องจากปริมาณสารทำงาน FR 70% เอื้อต่อการเกิดฟิล์มบางระเหยและการไหลกลับของคอนเดนเสท อาศัยแรงโน้มถ่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางตรงกันข้าม [47] การลดปริมาณสารทำงานลงเหลือ FR 60% ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนรวมขยับสูงขึ้นเป็น 0.52, 0.49 และ 0.45 °C/W ตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นเครื่องยืนยันถึงสภาวะที่ขาดแคลนของเหลวหล่อเลี้ยงผิวระเหยที่รบกวนความต่อเนื่องของวงจรการไหล [48] ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนการเติมเป็น FR 80% นั้น แม้จะมีมวลของเหลวมากขึ้นแต่กลับทำให้ค่า R_{total} เพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปอยู่ที่ 0.51, 0.47 และ 0.43 °C/W สำหรับสภาวะอุณหภูมิเดียวกันปรากฏการณ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดเชิงกลเนื่องจากปริมาณของเหลวที่มาก

เกินไปอาจเริ่มเกิดขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลของไอหรือก่อให้เกิดปรากฏการณ์ท่วมเริ่มต้น (incipient flooding) ซึ่งลดทอนประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบสองสถานะ [49] นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนยังช่วยลดความต้านทานความร้อนรวมได้อย่างสม่ำเสมอ [50] ในทุกช่วง FR เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานที่สูงขึ้นเร่งอัตราการเปลี่ยนสถานะและลดแรงต้านทานพลวัตของระบบจึงสรุปได้ว่าที่มุมเอียง 20° สภาวะ FR 70% ถือเป็นจุดสมดุลทางกายภาพและเชิงกลที่ส่งเสริมรูปแบบการไหลแบบหมุนเวียนปิดให้สมบูรณ์ที่สุดส่งผลให้ระบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนบรรลุสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยตัวแปรไร้มิติ

กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนอย่างเป็นระบบเลขนัสเซลล์ (Nusselt number, Nu) เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนสัมพันธ์กับการนำความร้อน ค่า Nu ที่สูงขึ้นส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ส่วนเลขเรย์ลี (Rayleigh number, Ra) บ่งบอกถึงอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวต่อแรงหนืดและแรงแพร่ความร้อน ค่า Ra ที่สูงหมายถึงแรงลอยตัวมีอิทธิพลเหนือกว่าก่อให้เกิดการไหลแบบพาความร้อนตามธรรมชาติที่รุนแรงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6



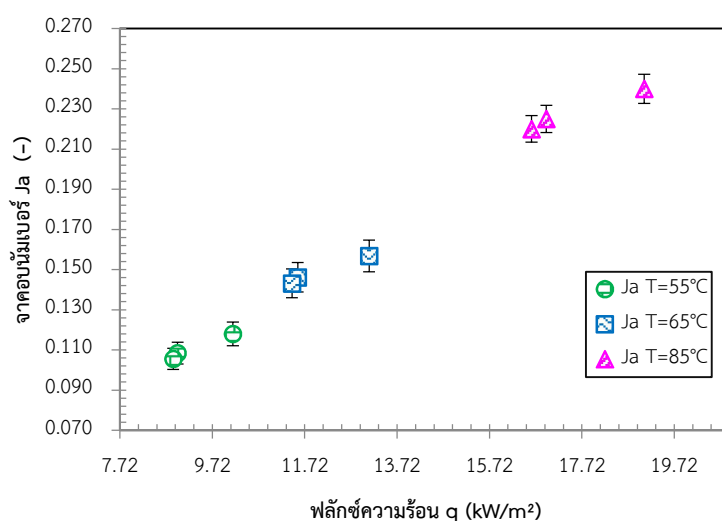
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Nusselt และ Rayleigh ภายใต้มุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 6 จากความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์ลีและเลขนัสเซลล์ พบว่าค่าเลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบตามเลขเรย์ลีที่สูงขึ้นในช่วง 4.72×10^9 ถึง 3.47×10^{10} มุมเอียง 20° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับมุมอื่นซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายผ่านกลไกเชิงลึกของรูปแบบการไหลสองสถานะเชิงพลวัตกรรมทางกายภาพ มุมเอียง 20° สร้างองค์ประกอบแรงโน้มถ่วงในแนวแกนท่อที่

เหมาะสมที่สุดในการรักษาสมดุลระหว่างการไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นก่อให้เกิดรูปแบบการไหลแบบแอนนูลาร์ที่เสถียร [51] ส่งผลให้ค่า Nu 20 อยู่ในช่วง 38.9-39.9 ซึ่งสูงกว่าค่า Nu 15 ที่ประมาณ 33.9-35.0 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมุมเอียง 15° มีความชันน้อยเกินไปจนเกิดการขัดตัวของของเหลวและความต้านทานการนำความร้อนผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้นในทางกลับกัน ที่มุมเอียง 25° แม้แรงโน้มถ่วงจะดึงของเหลวกลับได้ดีขึ้นแต่กลับเกิดแรงเฉือนจากการไหลสวนทางที่รุนแรงขึ้นจนรบกวนความต่อเนื่องของชั้นฟิล์ม [52] ทำให้ค่า Nu 25 อยู่ที่ประมาณ 37.9-38.9 ซึ่งต่ำกว่ามุมเอียง 20° อยู่ประมาณ 2-3 หน่วย สอดคล้องกับพฤติกรรมเชิงกลที่ระบบ มุมเอียง 20° มีเสถียรภาพทางพลศาสตร์สูงสุด วงจรการไหลเวียนสารทำงานดำเนินไปอย่างต่อเนื่องไม่เกิดการสั่นพ้องหรือการสูญเสียพลังงานจากความปั่นป่วนภายในท่อ [26] นอกจากนี้ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานยังตอบสนองเชิงบวกต่อสภาวะดังกล่าว เมื่อ Ra เพิ่มขึ้นสู่ค่า 2.47×10^{10} อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดลดลงและแรงตึงผิวปรับตัว เอื้อให้การแตกตัวของฟองไอและการควบแน่นเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น [53] ดังนั้นการกำหนดมุมเอียง 20° จึงไม่เพียงแต่ยกระดับค่า Nu สูงสุดเชิงปริมาณแต่ยังเป็นการออกแบบเชิงกลศาสตร์ของไหลที่ประสานรูปแบบการไหลสองสถานะสมบัติของสารและแรงขับเคลื่อนทางความร้อนเข้าด้วยกันอย่างลงตัวซึ่งแตกต่างจากสมมติฐานดั้งเดิมที่ว่าสมรรถนะจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความชันของท่อ

6.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะด้วยเลขจacob

เพื่ออธิบายอิทธิพลของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะในทางกายภาพ เลขจacob (Ja) ที่เพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ความร้อนบ่งชี้ว่าสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอนี้อาจเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลวกลไกนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนเนื่องจากกระบวนการระเหยและควบแน่นเป็นหัวใจหลักในการลำเลียงความร้อนจากส่วนที่ระเหยไปยังส่วนควบแน่น แสดงไว้ในภาพที่ 7

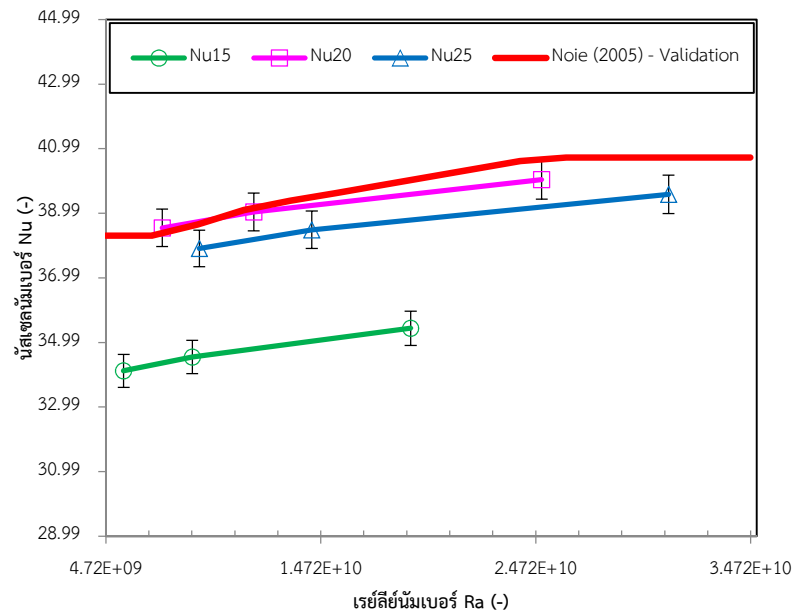


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Jakob Number และอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนที่อัตราการเดินสารทำงานและมุมเอียงที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่า Jakob Number ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความเด่นของการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [21] พบว่าเมื่อ ฟลักซ์ความร้อน (q) เพิ่มขึ้น ค่า Jakob Number มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกเงื่อนไข อุณหภูมิที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 55°C แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีเขียว ค่า Ja เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.108 เมื่อ $q=8.65\text{ kW/m}^2$ และเพิ่มขึ้นเป็น 0.117 ที่ฟลักซ์ความร้อน $q=9.83\text{ kW/m}^2$ แสดงถึงสภาวะที่กระบวนการระเหยเริ่มเกิดขึ้นแต่ยังมีแรงขับเคลื่อนจำกัดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 65°C (สัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีฟ้า) พบว่าในช่วงฟลักซ์ความร้อน $q=11.58\text{--}13.61\text{ kW/m}^2$ ค่า Jakob Number ขยับสูงขึ้นอยู่ในช่วง 0.142-0.159 ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพการนำพลังงานความร้อนไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [54] เฉพาะในกรณีที่อัตราการเติมน้ำทำงาน 70% ซึ่งให้ค่า Ja สูงที่สุดในกลุ่มอุณหภูมินี้ บ่งบอกถึงการมีปริมาตรสารทำงานที่เหมาะสมต่อการเกิดฟิล์มระเหยบางและการจัดรูปแบบการไหลที่เปิดพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยกลไกการเปลี่ยนสถานะได้สูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงสุด 85°C (สัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีชมพู) เมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มสู่ช่วง $q=16.47\text{--}17.29\text{ kW/m}^2$ ค่า Jakob Number พุ่งสูงขึ้นอย่างชัดเจนอยู่ในช่วง 0.218-0.226 และเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ $q=19.56\text{ kW/m}^2$ ค่า Ja สูงสุดถึง 0.243 [55] ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ที่สุดเมื่อติดตั้งท่อทำมุมเอียง 20° เนื่องจากองศาความชันดังกล่าวสร้างองค์ประกอบแรงโน้มถ่วงในแนวแกนที่เหมาะสมพอดีช่วยดึงของเหลวควบแน่นไหลกลับสู่ส่วนระเหยได้ทันเวลาไม่เกิดแรงต้านการไหลสวนทางที่รุนแรงเหมือนมุมที่ชันกว่าหรือการขัดตัวของของเหลวเหมือนมุมที่ราบกว่าพฤติกรรมเชิงกลและการไหลสองสถานะดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานที่ความหนืดลดลงและแรงตึงผิวปรับตัวเอื้อต่อการแตกตัวของฟองไอ [22] การประสานกันระหว่าง มุมเอียง 20° และ FR 70% จึงไม่เพียงแต่ยกระดับ Jakob Number จาก 0.108 สู่ 0.243 ตามการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนเท่านั้นแต่ยังสร้างวงจรการไหลเวียนที่สมดุลลดการสูญเสียพลังงานจากการปั่นป่วนภายในท่อและรักษาเสถียรภาพของการระเหยควบแน่นไว้ได้อย่างต่อเนื่องทำให้ระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนตอบสนองต่อการทำความร้อนได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงสุดเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมความร้อนที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพในระยะยาว

6.5 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลองงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ทำนายได้จากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (empirical correlation) ของ Noie (2005) [56] เป็นงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในด้านท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ผลการเปรียบเทียบ แสดงไว้ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองกับค่าจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของ Noie [56]

จากภาพที่ 8 พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์ของทุกลมุ่เอียงเพิ่มขึ้นตามเลขเรย์ลีย์ที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นช่วยเร่งการไหลเวียนของสารทำงานภายในระบบ ส่งผลให้กระบวนการเดือดและการควบแน่นเกิดขึ้นอย่างเข้มข้นมากขึ้นผลลัพธ์ดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับที่ Rahma et al. [57] รายงานจากการจำลองการไหลภายในท่อการเพิ่มความเข้มข้นของการเปลี่ยนสถานะส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องผ่านการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของไอภายในท่อแม่แนวโน้มจะใกล้เคียงกับสมการเชิงประจักษ์ของ Noie [56] แต่ระดับความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและค่าทำนายแตกต่างกันตามมุมเอียงที่ใช้สำหรับมุมเอียง 20° ค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการของ Noie [56] มากที่สุด Aragones et al. [58] ได้เสนอว่าเงื่อนไขการทำงานที่ให้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำที่สุดมักเกิดขึ้นในช่วงที่การไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นสามารถรักษาสสมดุลได้อย่างเหมาะสมข้อสังเกตนี้ได้รับการสนับสนุนเพิ่มเติมจากผลการศึกษาของ Gyuchang Kim และ Jaeseon Lee [59] พบว่าประสิทธิภาพของท่อขึ้นอยู่กับการสามารถในการส่งกลับของเหลว (liquid replenishment) เนื่องจากการคงสภาพการเปียกของผิวแลกเปลี่ยนความร้อนช่วยลดความต้านทานความร้อนและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในระบบ ดังนั้นการที่มุมเอียง 20° ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับสมการของ Noie [56] มากที่สุดจึงอาจเกิดจากการที่การไหลสองสถานะยังคงมีเสถียรภาพและไม่ถูกรบกวนจากแรงเฉือนมากเกินไปเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 25° ค่าเลขนัสเซิลต์ยังคงอยู่ในระดับสูงแต่เริ่มเบี่ยงเบนจากค่าทำนายของ Noie [56] เล็กน้อย งานของ Yuxin Ma และคณะ [60] พบมุมเอียงเป็นหนึ่งในตัวแปรหลักที่ควบคุมสมรรถนะของท่อและมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของ flow pattern ภายในระบบขณะที่การศึกษาของ Yichuan He et al. [25] วิเคราะห์ลักษณะความไม่

เสถียรของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบลูป พบว่าการเพิ่มแรงขับเคลื่อนการไหลอาจนำไปสู่ความผันผวนของความดันและการรบกวนของผิวสัมผัสระหว่างไอและของเหลวปัจจัยเหล่านี้มีแนวโน้มทำให้ฟิล์มของเหลวบริเวณผนังท่อสูญเสียความต่อเนื่องบางส่วนส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับสถานะที่เหมาะสมที่สุดในทางตรงกันข้าม มุมเอียง 15° ให้ค่าเลขนัสเซิลต์ต่ำที่สุดตลอดช่วงเลขเรย์ลีที่ศึกษา อาจเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดของการไหลกลับของของเหลวควบแน่น Zhoutuo Tan et al. [40] การทำงานของเทอร์โมไซฟอนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลกลับของของเหลวควบแน่นภายใต้แรงโน้มถ่วงเมื่อกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์การกระจายตัวของสารทำงานภายในระบบจะไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Nirmal Kumar Balaguru et al. [61] มุมเอียงมีผลต่อเส้นทางไหลกลับและค่าความต้านทานความร้อนของท่อ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นกลไกหลัก เมื่อลดมุมเอียงเหลือ 15° แรงโน้มถ่วงตามแนวแกนท่ออาจไม่เพียงพอระบายของเหลวควบแน่นทำให้ฟิล์มของเหลวหนาขึ้นและค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงสำหรับความน่าเชื่อถือของข้อมูลค่าความไม่แน่นอนถูกคำนวณตามหลัก Propagation of Uncertainty พิจารณาความคลาดเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลและโรตารีเตอร์ Zhu Li et al. [62] ชี้ให้เห็นการแพร่กระจายของความไม่แน่นอนจากตัวแปรต้นสามารถส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์การถ่ายเทความร้อนได้ หากไม่ได้รับการประเมินอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดของเลขนัสเซิลต์มีค่า $\pm 7.1\%$ ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของ Noie [56]

7. อภิปรายผลการวิจัย

7.1 ผลของมุมเอียงต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมก่อนลดลง มุมเอียง 20° ให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากแรงโน้มถ่วงช่วยส่งเสริมการไหลกลับของสารทำงานในสถานะของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับสู่ส่วนที่ระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่มุมเอียง 15° ซึ่งมีความชันน้อยเกินไป ทำให้การไหลกลับของของเหลวไม่คล่องตัวและเกิดการสะสมของฟิล์มของเหลว ส่วนมุมเอียง 25° เมื่อชันขึ้นแม้จะช่วยให้อะไรไหลกลับได้ดีแต่กลับทำให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลของไอและแรงเฉือนระหว่างสถานะเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะลดลงปรากฏการณ์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Wang et al. [35] ที่รายงานว่ามุมเอียงที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานและสมบัติของสารทำงาน

7.2 ผลของอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าการบรรจุสารทำงาน FR 70% ช่วยให้ระบบถ่ายเทความร้อนได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของเหลวเพียงพอต่อการเกิดการระเหยและการควบแน่นอย่างต่อเนื่องรักษาสมดุลระหว่างปริมาตรของเหลวและไอได้อย่างเหมาะสมหากปริมาณสารทำงานน้อยเกินไป (FR 60%) ผิวส่วนที่ระเหยมีแนวโน้มเกิดสถานะแห้ง (dry-out) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงในทางตรงกันข้ามการเติมสารทำงานมากเกินไป (FR 80%) ทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขังเริ่มต้น (incipient flooding) กีดขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลของไอและลดทอนประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบสอง

สถานะ ผลลัพธ์นี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Robinson et al. [49] ที่ศึกษาผลของอัตราการเติมสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนขนาดเล็ก

7.3 การวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ พบว่า Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers มีแนวโน้มของค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นไปตามกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนร่วมกับการเปลี่ยนสถานะค่าจำนวน Nusselt เพิ่มขึ้นตามอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่จำนวน Rayleigh บ่งบอกถึงอิทธิพลของแรงลอยตัวต่อการไหลภายในท่อและจำนวน Jakob แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานการวิเคราะห์นี้ยืนยันว่ามุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมกันในการออกแบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

8. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความต้านทานทางความร้อน และการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers พบว่า มุมเอียงของท่อมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น สมรรถนะจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมที่มุมเอียง 20° ก่อนจะลดลงเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 25° ที่มุมเอียง 20° ระบบให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากเป็นมุมที่สร้างสมดุลระหว่างการไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอัตราการเติมสารทำงานพบว่าค่าที่เหมาะสมคือ FR 70% ให้ความต้านทานความร้อนต่ำที่สุด เมื่อเติมสารทำงานน้อยเกินไป (FR 60%) จะเกิดสถานะแห้งที่ผิวส่วนท้ายระเหย ส่วนการเติมมากเกินไป (FR 80%) จะเกิดปรากฏการณ์ท่วมที่ลดทอนประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผลการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิตียืนยันว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด คือ มุมเอียง 20° ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน 70% ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (ฟลักซ์ความร้อน 19.56 kW/m^2) และค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุด ($0.40\text{-}0.50 \text{ }^\circ\text{C/W}$) สำหรับการวิเคราะห์เชิงกลไกด้วยตัวแปรไร้มิติ พบว่า เลข Nusselt มีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 20° ($Nu = 38.9\text{-}39.9$) สอดคล้องกับเลข Rayleigh ที่แสดงถึงแรงลอยตัวที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนการไหลเวียนของสารทำงาน ($Ra = 2.47 \times 10^{10}$) ขณะที่เลข Jakob มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ความร้อน ($Ja = 0.108\text{-}0.243$) ยืนยันว่าในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด พลังงานความร้อนถูกใช้ไปกับการเปลี่ยนสถานะอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านการกู้คืนความร้อนทิ้งในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การศึกษาจำกัดเฉพาะท่อทองแดงผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm ใช้สารทำงานเอทานอลชนิดเดียว ช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน $55\text{-}85 \text{ }^\circ\text{C}$ ดังนั้น ผลการศึกษานี้สามารถขยายผลสู่การศึกษาสารทำงานทางเลือก โครงสร้างท่อที่มีพื้นผิวปรับปรุง และสภาวะการทำงานที่หลากหลายขึ้นในอนาคต

9. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลของชนิดสารทำงานที่แตกต่างกัน รวมถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความยาวในแต่ละช่วงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ การศึกษาเชิงตัวเลขร่วมกับการทดลองจะช่วยให้เข้าใจกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบอุปกรณ์ทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งได้กรุณาอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น และบทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คำแถลงบทบาทและส่วนร่วมของผู้เขียน

กิตติพล ขาวงาม : การกำหนดแนวคิดการวิจัย การออกแบบระเบียบวิธีวิจัย การดำเนินการทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและตัวแปรไร้มิติ การเขียนต้นฉบับบทความ การกำกับดูแลทิศทางการวิจัย และการบริหารจัดการโครงการวิจัย

พันธุ์เทพ คำพอง : การเตรียมภาพประกอบ และแผนภาพจำลองชุดการทดลอง ผู้เขียนทุกคนได้อ่านและอนุมัติต้นฉบับบทความฉบับสุดท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ghahremani, A., Maleknezhad, A., & Shafii, M. B. (2026). Design and performance of a hybrid thermosyphon heat pipe for simultaneous heat transfer and energy harvesting. *Results in Engineering*, 110748. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110748>
- [2] Malleswararao, K., Bürger, I., Mejia, A. C., Kim, S. T., & Linder, M. (2026). Innovative approaches to waste heat recovery: Coupling high temperature vapour compression heat pumps with salt hydrate thermochemical systems. *Applied Energy*, 405, 127229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127229>
- [3] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- [4] Lomonaco, G., Borreani, W., Bruzzone, M., Chersola, D., Firpo, G., Osipenko, M., Saracco, P. (2018). Initial thermal-hydraulic assessment by OpenFOAM and FLUENT of a subcritical irradiation facility. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.003>

- [5] Sichamnan, S., Pipatpaiboon, N., Chaiwongsa, P., Onsalung, N., Intarachaisri, K., Thongdaeng, S., Chaithongsri, A. (2026). Experimental investigation of triangular transversely corrugated tubes for solar air collectors under low solar irradiance. *Solar Compass*, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2026.100165>
- [6] Faghri, A. (2014). Heat pipes: Review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1). <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
- [7] Kang, S., Lee, S., & Lee, J. (2025). Performance enhancement of two-phase closed thermosyphon with threaded evaporator surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 164, 108939. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108939>
- [8] Sae-Jung, P., Krittayanawach, T., Deedom, P., & Limmeechokchai, B. (2015). An experimental study of thermo-syphon solar water heater in Thailand. *Energy Procedia*, 79, 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.516>
- [9] Rittidech, S., Donmaung, A., & Kumsombut, K. (2009). Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV). *Renewable Energy*, 34(10), 2234–2238. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.021>
- [10] Jengsooksawat, S., Rittidech, S., & Booddachan, K. (2014). Loop thermosyphon with vapour chamber: A thermodynamic study. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 487191. <https://doi.org/10.1155/2014/487191>
- [11] Mutalikdesai, S., & Kate, A. (2020). Experimental investigation of an aluminium thermosyphon at normal operating conditions. *Journal of Thermal Engineering*, 6(5), 724–735. <https://doi.org/10.18186/thermal.797291>
- [12] Shabgard, H., Xiao, B., Faghri, A., Gupta, R., & Weissman, W. (2014). Thermal characteristics of a closed thermosyphon under various filling conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.053>
- [13] Lin, C.-W., Hsu, H.-Y., & Kumar, R. (2024). Numerical investigation of surface wettability effect on two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 247, 123125. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123125>
- [14] Ghaffari, O., Al Sayed, C., Vincent, M., Grenier, F., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2022). Study of the impact of the airflow and filling ratio on the thermal performances of a two-phase immersion cooling prototype. In *2022 21st IEEE Intersociety Conference*

- on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*.
<https://doi.org/10.1109/iTherm54085.2022.9899558>
- [15] Lataoui, Z., Benselama, A. M., & Jemni, A. (2025). Heat transfer characteristics of thermosyphons used in vacuum water heaters. *Fluids*, 10(8), 199. <https://doi.org/10.3390/fluids10080199>
- [16] Khaongam, K., & Srihajong, N. (2015). Heat transfer characteristics of thermo-syphon: Case study of modifying inclination angle of evaporator and condenser sections. *Food Agricultural Sciences and Technology*, 1(2), 57–62. <https://doi.org/10.14456/randk.2015.9>
- [17] Solomon, A. B., Daniel, V. A., Ramachandran, K., Pillai, B., Singh, R. R., Sharifpur, M., & Meyer, J. (2017). Performance enhancement of a two-phase closed thermosiphon with a thin porous copper coating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.02.001>
- [18] Gedik, E. (2016). Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosiphon at different operating conditions. *Energy and Buildings*, 127, 1096–1107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.066>
- [19] Zhang, H., Zhang, Z., Yang, L., & Li, Y. (2025). Numerical investigation on thermal efficiency and resistance of high-temperature thermosiphons using dimensionless method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106391. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106391>
- [20] Chami, N., & Zoughaib, A. (2010). Modeling natural convection in a pitched thermosiphon system in building roofs and experimental validation using particle image velocimetry. *Energy and Buildings*, 42(8), 1267–1274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.019>
- [21] Xu, H., Guo, X., Yang, S., Tang, F., Zhang, B., & Wang, K. (2025). Influence of height difference on thermal performance and flow stability of loop thermosiphon equipped with vertically placed flat evaporator for IGBT module cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 218, 110124. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110124>
- [22] Cai, Y., Liu, Z., Lu, J., Li, Y., Tang, D., & Hu, C. (2026). Establishment of momentum model and analysis of heat transfer performance for two-phase loop thermosiphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 259, 128344. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128344>
- [23] Perinba Selvin Raj, J. A., Asirvatham, L. G., Angeline, A. A., Rakshith, B. L., Bose, J. R., Manova, S., Wongwises, S. (2025). Mitigation of flow instabilities in multiport minichannel

- thermosyphon through a modified loop design with separate vapor-liquid paths. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106495. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106495>
- [24] Mana, V. V., Asirvatham, L. G., Manova, S., Appadurai, A. A., Kumar, J. P., Leunanonchai, W., & Wongwises, S. (2025). Experimental investigation on the heat transfer performance of a loop thermosyphon with dual vapor lines. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106074>
- [25] He, Y., Hao, T., Makhatha, M. E., Feng, Y., & Qiu, L. (2026). Heat transfer and instability characteristics of a two-phase thermosyphon loop with wide range of filling ratios. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 174, 110938. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110938>
- [26] Smith, K., Siedel, S., Robinson, A. J., & Kempers, R. (2016). The effects of bend angle and fill ratio on the performance of a naturally aspirated thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 101, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.024>
- [27] Rukruang, A., Kaew-On, J., Wongwises, S., & Wang, C.-C. (2025). Experimental optimization and performance limits of a multiport minichannel thermosyphon for air-cooled applications. *Applied Thermal Engineering*, 127540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127540>
- [28] Larimi, Y. N., Ghaffari, O., Ganjali, A., Al Sayed, C., Grenier, F., Jasmin, S., ... Sylvestre, J. (2022). Multi-scale electroplated porous coating for immersion cooling of electronics. In *2022 21st IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*. <https://doi.org/10.1109/itherm54085.2022.9899660>
- [29] Vincent, M., Ghaffari, O., Larimi, Y. N., Grenier, F., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2024). Experimental investigation of the thermal resistance of advanced two-phase thermosyphon heatsinks. *Journal of Cleaner Production*, 238, 122108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.157>
- [30] Ghaffari, O., Vincent, M., Grenier, F., Larimi, Y., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2023). Pushing the limits of air cooling with novel two-phase prototypes for high power microprocessors. In *2023 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*. <https://doi.org/10.1109/itherm55368.2023.10177612>

- [31] Wansasueb, K., Promthaisong, P., Bubphachot, B., Pattiya, A., Chompookham, T., Rittidech, S., & Siriwan, N. (2024). Applied machine learning: Performance prediction of heat pipe with mesh wick. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, 105307. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105307>
- [32] Wang, Y., Ma, K., Liu, Y., Sun, J., & Huang, L. (2026). Experimental and empirical correlation study on the heat transfer characteristics of gravity heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 170, 110028. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110028>
- [33] Khaongam, K., Chompookham, T., & Parametthanuwat, T. (2025). Internal flow pattern of the condenser section that affects the heat transfer characteristics of rectangular two-phase closed thermosyphon. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106246. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106246>
- [34] Pipatpaiboon, N., Thongdang, S., & Rittidech, S. (2016). Reducing heat loss in the adiabatic section of a two-phase closed thermosyphon (TPCT) using acrylic tube. *King Mongkut's University of Technology North Bangkok International Journal of Applied Science and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2016.06.001>
- [35] Wang, Y., Wang, X., Wang, J., Liu, Y., & Chen, J. (2023). Heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon with different inclination angles based on the core-tube monitoring. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102738. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102738>
- [36] Tian, J. A., Xu, Z., Chen, K., Gan, H., Liu, C., Zhao, J., & Rao, Z. (2026). Classic yet vibrant heat transfer device—gravity heat pipe: A review from working mechanism to application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 238, 117073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117073>
- [37] Ma, Y., Lin, Y., Qi, G., Li, X., & Jiang, F. (2026). Effect of inclination angle and particle size on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110269. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110269>
- [38] Jiang, F., Lin, Y., Liu, Y., Qi, G., Li, H., Li, X., ... Li, X. (2022). Effect of inclination angle on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon containing SiC particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 197, 123361. <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2022.123361>

- [39] Yilgor, I., & Shi, S. (2025). Operational characteristics and oscillatory phenomena in two-phase closed thermosyphons. *Applied Thermal Engineering*, 265, 125401. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125401>
- [40] Tan, Z., Zhang, Z., Chu, W., & Wang, Q. (2026). Investigation on heat and mass transfer mechanism within a thermosyphon fin under multiple power distributions. *Applied Thermal Engineering*, 130715. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130715>
- [41] Thongdang, S., Ding, Y., Parametthanuwat, T., Mondragón, R., & Sichamnan, S. (2026). Thermal and exergy efficiency analysis of a corrugated thermosyphon water heater integrated with an evacuated tube solar collector using TiO₂ nanofluid. *Next Energy*, 12, 100691. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100691>
- [42] Xu, H., Guo, X., Liu, Z., Yang, S., Zhang, B., & Tian, S. (2026). Hydrodynamic coupling in vertical flat-plate loop thermosyphons: The critical role of riser confinement on operational stability and heat transfer limits. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 263, 128711. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128711>
- [43] Lu, X., Liu, J., Tong, X., Dai, R., Xiao, Y., & Deng, J. (2025). Experimental investigation on thermal performance of gravity heat pipe with different pipe configurations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105695. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105695>
- [44] Gou, X., Li, G., Zhang, R., Jian, C., Zhang, Q., Li, B., & Dong, Q. (2021). Critical and optimal inclination angles of two-phase closed thermosyphon under different operating conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121540. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121540>
- [45] Siriwan, N., Chompookham, T., Ding, Y., & Rittidech, S. (2017). Heat transfer predictions for helical oscillating heat pipe heat exchanger: Transient condition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3553–3562. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0642-y>
- [46] Paramatthanuwat, T., Boothaisong, S., Rittidech, S., & Booddachan, K. (2010). Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon using deionized water mixed with silver nano. *Heat and Mass Transfer*, 46(3), 281–285. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0565-y>
- [47] Zhang, T., Yan, Z., Wang, L., Zheng, W., Su, Y., & Zheng, R. (2021). Droplet entrainment within the evaporator to the suitable volume-filling ratio of a vertical two-phase closed

- thermosyphon. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106576. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106576>
- [48] Zhang, W., Cheng, K., Lu, J., Chen, H., & Zhang, Y. (2026). The influence of cooling temperature on the thermal-dynamic performance of wettability-driven pulsating heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110701. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110701>
- [49] Robinson, A. J., Smith, K., Hughes, T., & Filippeschi, S. (2020). Heat and mass transfer for a small diameter thermosyphon with low fill ratio. *International Journal of Thermofluids*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100010>
- [50] Khaongam, K., Srihajong, N., Seahang, K., & Pratoomchat, P. (2014). Thermal performance of closed-loop oscillating heat pipes with check valves using AgNO₃/distilled water nanofluids. In *The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI 2014)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33101.74728>
- [51] Kim, I. G., Kim, K. M., Jeong, Y. S., & Bang, I. C. (2017). Flow visualization and heat transfer performance of annular thermosyphon heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1456–1468. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.116>
- [52] Schreiber, M., Wits, W. W., & te Riele, G. J. (2016). Numerical and experimental investigation of a counter-current two-phase thermosyphon with cascading pools. *Applied Thermal Engineering*, 99, 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.095>
- [53] Geetha, A., Rabhi, A., Van Wyk, S., Andersson, M., & Akkus, Y. (2026). Numerical stability assessment of 2D and 3D VOF-based modeling of pulsating heat pipe loops: Influence of physical assumptions and numerical parameters. *Applied Thermal Engineering*, 131097. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131097>
- [54] Yang, S., Guo, X., Xu, H., Tang, F., Zhang, B., & Zhang, Y. (2025). Experimental studies on the heat transfer characteristics and instability of a loop thermosyphon with a vertical flat evaporator for IGBT heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125524. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125524>
- [55] Shelton, M. J., Suresh, S., & Singh, V. K. (2025). Experimental analysis and optimization of two-phase flexible water thermosyphons with corrugated adiabatic sections. *Applied Thermal Engineering*, 128659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128659>
-

- [56] Noie, S. (2005). Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 25(4), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.019>
- [57] Rahma, A. G., Abadassi, F., Ghenaim, A., François, P., Hoarau, Y., Funfschilling, D., & Marouf, A. (2026). Thermal and flow pattern analysis under confinement and vapor superficial velocity conditions in a two-phase closed thermosiphon: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 265, 128849. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128849>
- [58] Aragones, D. I., Warsinger, D. M., & Weibel, J. (2026). Mapping the saturated regime operating envelope of a two-phase closed loop thermosyphon for minimum thermal resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 261, 128509. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128509>
- [59] Kim, G., & Lee, J. (2026). Balancing bubble dynamics and liquid replenishment in a two-phase closed thermosyphon via geometrically tuned bi-philic evaporator surfaces. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130727>
- [60] Ma, Y., Lin, Y., Qi, G., Li, X., & Jiang, F. (2026). Effect of inclination angle and particle size on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110269. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110269>
- [61] Balaguru, N. K., Suresh, S., Shelton, M. J., Krishnan, S. A., & Singh, V. K. (2026). Thermal characterization of bendable water filled two-phase thermosyphons under variable fill ratios and bending angles. *Applied Thermal Engineering*, 131228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131228>
- [62] Zhu, L., Zhao, Y., & Wu, F. (2026). A key condition quotient method for heat conduction conditional uncertainty propagation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 171, 110207. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110207>

Research Article

การพัฒนาต้นแบบรถไฟฟ้าและระบบอัดประจุไฟฟ้าแบบผสม

Development of an Electric Vehicle Prototype and a Hybrid Charging System

อนุชา ตันเสียดี^{1*} และ ชลากร สติภา¹

Anucha Tansiadee^{1*} and Chalakorn Satipa¹

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

¹ Department of Electronic Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriram Rajabhat University

*Corresponding author. E-mail: anuchatanasia36@gmail.com

Received: June 12, 2026

Revised: June 27, 2026

Accepted: June 28, 2026

Available online: June 30, 2026

APA Citation:

Tansiadee, A., & Satipa, C. (2026). Development of an Electric Vehicle Prototype and a Hybrid Charging System. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 57–68.
<https://doi.org/10.14456/brujit.2026.4>

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบรถไฟฟ้าและระบบอัดประจุไฟฟ้าแบบผสม คือระบบอัดประจุจากพลังงานแสงอาทิตย์และระบบอัดประจุจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในบ้าน และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของรถไฟฟ้าต้นแบบที่พัฒนาขึ้น โดยระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ขนาดแรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 600 วัตต์ จำนวน 1 ตัว ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ จำนวน 2 ลูก ต่อแบบอนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ สำหรับเป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อน ระบบอัดประจุแบบกระแสตรงใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาดกำลังไฟฟ้า 85 วัตต์ กระแสไฟฟ้า 3.5 แอมป์ จำนวน 1 แผง และระบบอัดประจุแบบกระแสสลับใช้วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงผ่านหม้อแปลงลดแรงดัน (Step Down Transformer) ขนาด 18 โวลต์ ผลทดลองระบบอัดประจุแบบสองระบบพบว่าแรงดันไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์มีค่าอยู่ในช่วง 18–19 V โดยมีค่าแรงดันสูงสุด 19 V ในช่วงเวลา 12.00–13.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าความเข้มแสงสูงสุด 9,616 Lux ส่งผลให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันของแบตเตอรี่สำหรับระบบขับเคลื่อนได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนการทดสอบการอัดประจุจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในบ้านพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อแบตเตอรี่แบบอนุกรมเพิ่มขึ้นตามลำดับจนถึง 24 V ซึ่งสอดคล้องกับค่าพิกัดแรงดันของระบบขับเคลื่อน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าต้นแบบรถไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นช่วยลดข้อจำกัดด้านแหล่งจ่ายพลังงานของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

คำสำคัญ: ระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ระบบอัดประจุพลังงานแสงอาทิตย์
ระบบอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง

Abstract

This research article aims to develop of an Electric Vehicle Prototype and a Hybrid Charging System, consisting of a solar energy charging system and a residential electricity charging system, and to evaluate the performance of the developed prototype electric vehicle. The propulsion system consists of a brushless DC motor rated at 24V with a power output of 600W. The motor is powered by two 12V, 40Ah batteries connected in series to provide a 24V power supply for the electric drive system. The DC charging system utilizes one solar panel with a power rating of 85W and a current output of 3.5A. Meanwhile, the AC charging system employs an AC-to-DC voltage conversion circuit through a step-down transformer rated at 18V. The experimental results of the dual-mode charging system showed that the voltage generated from the solar panel ranged from 18–19V, with the maximum voltage of 19V recorded between 12:00–13:00, corresponding to the highest light intensity of 9,616 Lux. This resulted in a continuous increase in the battery voltage level for the electric drive system. In addition, the test of the residential electricity charging system revealed that the voltage at the terminals of the two series-connected batteries gradually increased until reaching 24 V, which corresponded to the rated voltage of the propulsion system. The research results demonstrate that the developed prototype electric vehicle with a dual-mode charging system can reduce limitations associated with power sources for electric vehicle propulsion systems and provide greater flexibility in energy management by supporting both renewable solar energy and residential electrical power sources.

Keywords: Electric Vehicle Drive System, Solar Energy Charging System, AC/DC Charging System

1. บทนำ

ในปัจจุบันวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะปัญหามลพิษทางอากาศจากฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ได้กลายเป็นความท้าทายสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและระบบนิเวศในประเทศไทย [1] การเปลี่ยนผ่านไปสู่การใช้งานยานยนต์พลังงานไฟฟ้าจึงถูกยกระดับให้เป็นเทคโนโลยีและยานยนต์แห่งอนาคตที่สำคัญ [2] เนื่องจากสามารถช่วยลดการปล่อยมลพิษในภาคการขนส่ง มุ่งเน้นการใช้พลังงานสะอาด และเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศไปสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน [3] ซึ่งการผลักดันนี้ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงแค่อุตสาหกรรมบุคคลเท่านั้น แต่ยังรวมถึงยานพาหนะประเภทรถจักรยานยนต์ไฟฟ้าที่เป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวันของประชาชน

การเติบโตของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าอย่างเต็มรูปแบบจำเป็นต้องอาศัยการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่รองรับอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะธุรกิจจุดชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยที่มีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องตามปริมาณผู้ใช้งานที่เพิ่มขึ้น [3] ส่งผลให้จำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยส่วนประสมการตลาดที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมและการตัดสินใจเลือกใช้บริการเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างตรงจุด [4] นอกเหนือจากตัวสถานีชาร์จสาธารณะแล้วเทคโนโลยีการเข้าถึงข้อมูลเพื่ออำนวยความสะดวก เช่น แอปพลิเคชันแผนที่แสดงจุดชาร์จแบตเตอรี่แบบเรียลไทม์ก็เป็นเครื่องมือดิจิทัลที่เข้ามามีบทบาทสำคัญในการช่วยลดความวิตกกังวลเรื่องระยะทางการขับขี่และการหาพิกัดสถานีบริการให้แก่ผู้ใช้งาน [5]

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้ายังส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากเปรียบเทียบการเพิ่มโหลดทางไฟฟ้าขนาดใหญ่เข้าสู่ระบบจำหน่าย หากไม่มีการบริหารจัดการที่ดีอาจก่อให้เกิดปัญหาความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ จึงนำไปสู่แนวทางการพัฒนาระบบจัดการชาร์จตามเวลาจริงเพื่อรักษาเสถียรภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาพรวม [6] ควบคู่ไปกับการออกแบบระบบกักเก็บพลังงานแบบแบตเตอรี่และระบบอัดประจุไฟฟ้าที่เหมาะสม [7] ด้วยข้อจำกัดด้านความครอบคลุมของสถานีชาร์จสาธารณะและภาระโหลดไฟฟ้าดังกล่าวการพัฒนายานพาหนะไฟฟ้าให้มีระบบชาร์จ 2 ระบบ (Dual Charging System) ที่สามารถรองรับได้ทั้งการชาร์จประจุไฟฟ้าจากสายส่งในที่อยู่อาศัยและการชาร์จพลังงานทางเลือกหรือระบบชาร์จเร็ว จึงเป็นแนวทางนวัตกรรมที่ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น เพิ่มอิสระในการเดินทาง และลดการพึ่งพาสายส่งไฟฟ้าหลักในช่วงเวลาหนาแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากความสำคัญข้างต้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นแนวทางในการพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าโดยมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและสร้างรถยนต์ไฟฟ้าระบบชาร์จ 2 ระบบ ควบคู่กับการพัฒนาชุดระบบควบคุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เพื่อเป็นต้นแบบของนวัตกรรมยานพาหนะพลังงานสะอาดที่ตอบโจทย์ความสะดวกสบายปลอดภัย และส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

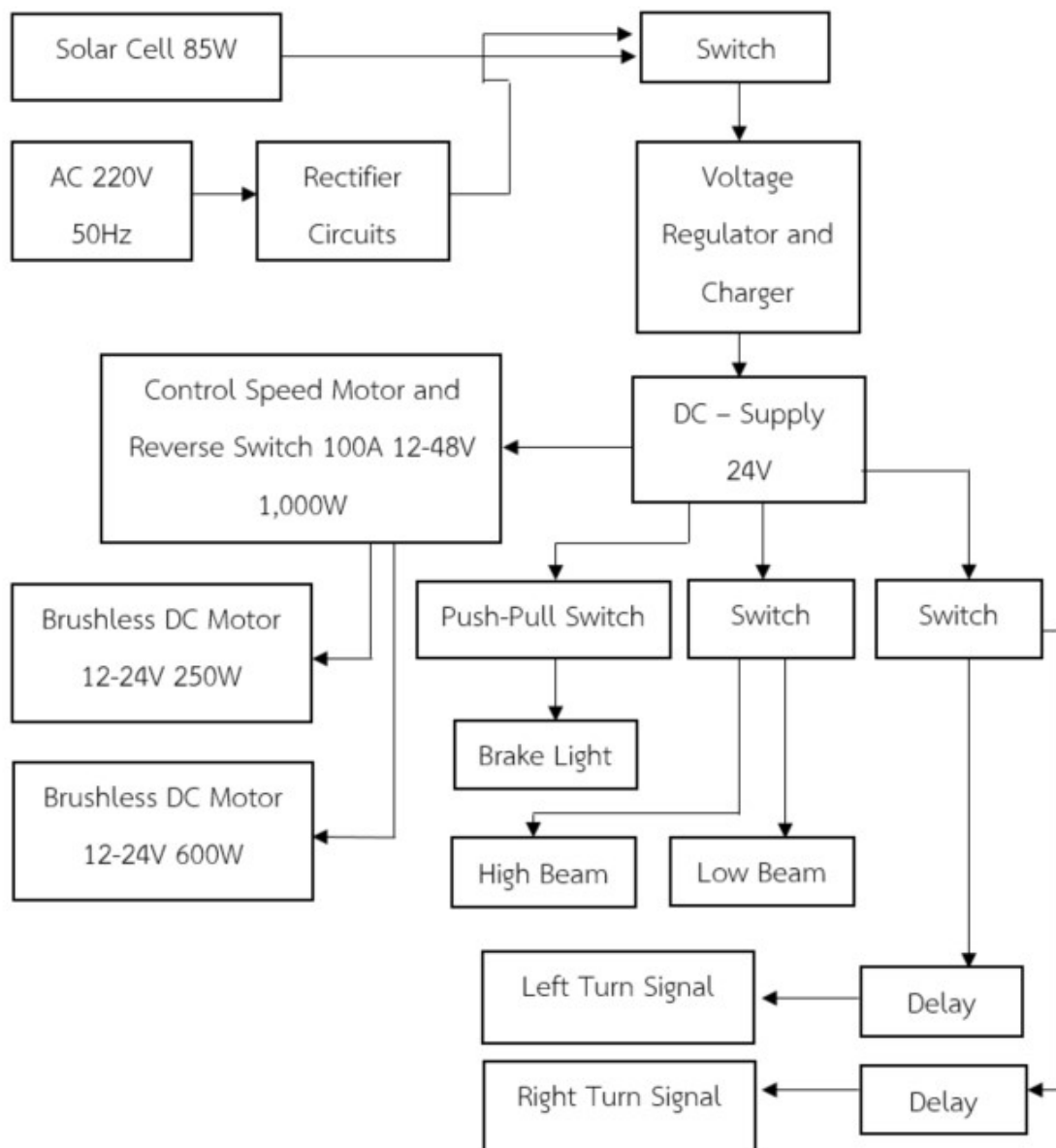
- 2.1 เพื่อออกแบบและสร้างชุดระบบควบคุมการหมุนของมอเตอร์ในชุดขับเคลื่อนไฟฟ้า
- 2.2 เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าต้นแบบที่สร้างขึ้น

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ออกแบบโครงสร้างของรถไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบ

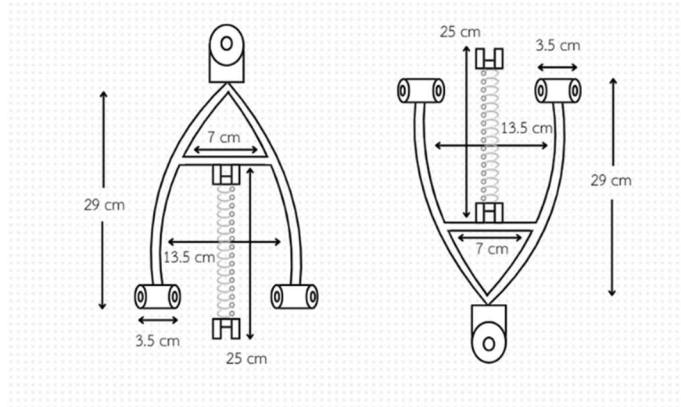
3.1.1 ศึกษาข้อมูลงานวิจัย รถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าชาร์จ 2 ระบบ ที่มีอยู่โดยศึกษาหลักการทำงานของเครื่อง โครงสร้างของรถและส่วนประกอบของรถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าชาร์จ 2 ระบบ พบว่าโครงงานดังกล่าวประกอบด้วยมอเตอร์ไซค์ 3 ล้อ โดยอาศัยหลักการทำงานของมอเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบของล้อด้านหลังของตัวมอเตอร์ไซค์ โครงงานดังกล่าวใช้แบตเตอรี่ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ เป็นแหล่งจ่ายให้กับมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้าชาร์จ 2 ระบบดังกล่าว โดยแบตเตอรี่จะรับพลังงานไฟฟ้าได้จากแหล่งพลังงานไฟฟ้า 2 ทางคือ จากระบบ

ไฟฟ้า 220 โวลต์ และพลังงานไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 85 วัตต์ มีขนาดของตัวแผงด้านกว้าง 45 เซนติเมตร ด้านยาว 98 เซนติเมตรจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชุดควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ 2 ระบบ ซึ่งชุดควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ 2 ระบบดังกล่าวมีส่วนประกอบภายในประกอบด้วย ชุดเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยผ่านวงจรฮาล์ฟเวฟเรกติไฟร์ และแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จากแผงโซลาร์เซลล์โดยผ่านการเลือกแหล่งจ่ายจากสวิตช์ควบคุมเพื่อเลือกแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแหล่งจ่ายใดแหล่งจ่ายหนึ่ง และแสดงกรอบแนวคิดของการพัฒนาต้นแบบรถไฟฟ้าด้วยระบบอัดประจุไฟฟ้าแบบผสมดังภาพที่ 1

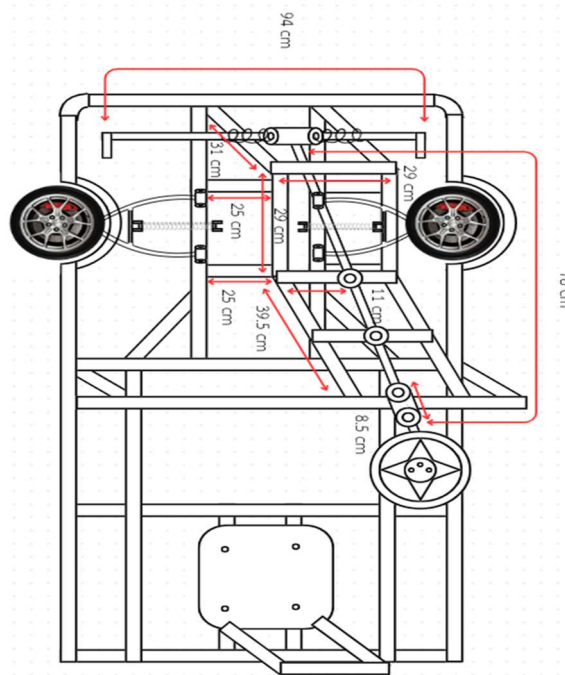


ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดของระบบ

3.1.2 ออกแบบโครงสร้างรถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบ โดยกำหนดให้ชุดล้อหน้าประกอบด้วย ปีกนกที่ใช้สำหรับติดตั้งล้อส่วนหน้าทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โดยมีโช้คอัพแบบสปริงเพื่อให้การเคลื่อนที่ของรถนุ่มนวลผ่านการควบคุมทิศทางของรถด้วยพวงมาลัยผ่านคันส่งทั้งด้านซ้ายและด้านขวา โดยมีเบาะนั่งสำหรับผู้ขับขี่รถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบของผู้วิจัยเป็นเบาะนั่งชนิด 1 ที่นั่ง



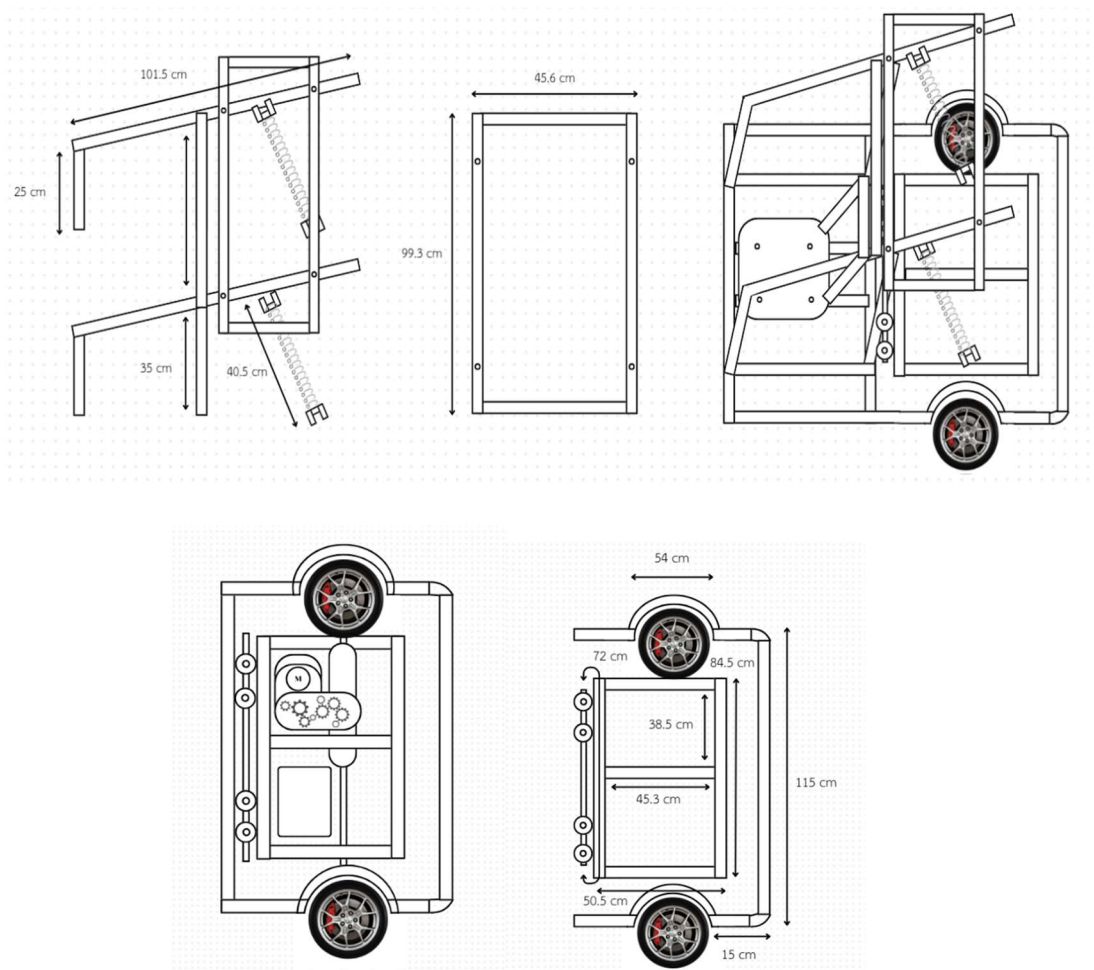
ภาพที่ 1 การออกแบบโช้คอัพแบบก้ามปู



ภาพที่ 2 การออกแบบและจัดวางโครงสร้างหน้าเพื่อรองรับการติดตั้งชุดพวงมาลัย

3.1.3 ออกแบบโครงสร้างรถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบ โดยกำหนดให้ชุดล้อหลังซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ที่ได้จากโครงงานมอเตอร์ไซด์ไฟฟ้าชาร์จ 2 ระบบ มาเป็นต้นกำลังในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ไฟฟ้าของผู้วิจัย โดยโครงสร้างของชุดล้อหลังจะแยกจากโครงสร้างของชุดล้อหน้าโดยเพลานขนาด

แกน 1 นี้ ผ่านตลับลูกปืนจำนวน 3 ชุด และใช้คัพเชื่อมต่อกับโครงสร้างของมอเตอร์ไซค์ชุดล้อหน้าและชุดล้อหลังให้ทำงานสัมพันธ์กันและยืดหยุ่น โดยใช้มอเตอร์จากโครงงานเดิมซึ่งเป็นมอเตอร์ขนาด 12 โวลต์ 600 วัตต์ โดยมีส่วนประกอบภายในที่แกนโรเตอร์ออกแบบให้เป็นลักษณะฟันเฟืองเพื่อขับเฟืองทดให้ขับแกนเพลลาที่อยู่ทางด้านซ้ายของตัวรถที่ยึดติดกับล้อหลังของรถมอเตอร์ไซค์ไฟฟ้า 2 ระบบ ส่วนแกนเพลลา ด้านขวาของตัวรถมอเตอร์ไซค์จะเป็นอิสระและหมุนตามแกนเพลลาทางด้านซ้ายเมื่อรถมอเตอร์ไซค์เคลื่อนที่ไปด้านหน้าเท่านั้น จากหลักการดังกล่าวทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้ออกแบบโดยติดตั้งมอเตอร์ขนาด 12 โวลต์ 250 วัตต์ เพื่อควบคุมการหมุนล้อหลังทางด้านขวาที่เป็นอิสระ จากตัวมอเตอร์ขับไปด้านหน้า โดยออกแบบด้วยการใช้เฟืองและโซ่ของรถมอเตอร์ไซค์ในการควบคุมล้อหลังด้านขวาของโครงงานของผู้วิจัยให้สามารถเดินถอยหลังได้



ภาพที่ 3 การออกแบบชุดโครงสร้างส่วนหลัง

3.2 สร้างรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบโดยศึกษาข้อมูลจากสื่อต่างๆ ทั้งที่เป็นรูปเล่มและในระบบออนไลน์ เมื่อกลุ่มผู้วิจัยได้ออกแบบโดยกำหนดขนาดที่ชัดเจนในทุกขั้นตอนและทุกชิ้นส่วนของงานแล้วจึงได้ดำเนินการสร้างดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4 ประกอบเสร็จสมบูรณ์

3.3 การทดสอบการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบ

การทดสอบการทำงานของโครงงานวิจัย จากผลการทดสอบการทำงานของโครงงานพบว่า โครงงานรถไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบของผู้วิจัยสามารถทำงานได้ โดยสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังด้วยคันเร่งแบบเท้าเหยียบที่ติดตั้งอยู่บนรถของโครงงานของผู้วิจัย สามารถให้แสงสว่างเพื่อการเดินทางในตอนกลางคืน

โดยมีระบบไฟฟ้า สูง-ต่ำอยู่ทางส่วนหน้าของตัวรถ และไฟเลี้ยว ซ้าย-ขวาอยู่ทางส่วนหน้าและหลังของตัวรถ นอกจากนี้ส่วนด้านหลังของตัวรถยังมีชุดไฟเบรกติดตั้งอยู่ด้วย



ภาพที่ 5 การทดสอบการทำงานของโครงการ

4. ผลการวิจัย

4.1 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้รถยนต์พลังงานชาร์จ 2 ระบบทำงานเต็มประสิทธิภาพ

ผู้วิจัยเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ 40 แอมป์ จำนวน 2 ลูกต่ออนุกรมกันทำให้ได้แรงดันไฟฟ้ารวมเท่ากับ 24 โวลต์ และกระแสรวมเท่ากับ 40 แอมป์ เพื่อจ่ายให้กับรถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบให้ทำงานเต็มประสิทธิภาพ ทั้งนี้ก็เพราะว่ารถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้นใช้มอเตอร์ขนาด 24 โวลต์ 600 วัตต์ ดังนั้นเพื่อต้องการให้ได้กำลังงานสูงสุดจึงต้องเลือกใช้ค่าแรงดันสูงสุดที่กำหนดไว้บนฉลากที่ติดอยู่บนตัวมอเตอร์ ในการใช้งานตามหลักการกำลังไฟฟ้า (วัตต์) มีค่าเท่ากับ ผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลด



ภาพที่ 6 แสดงฉลากที่ติดอยู่บนตัวมอเตอร์

4.2 การทดลองความเร็วของตัวรถระหว่างเดินทางและถอยหลัง

ในการทดลองการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบนำเสนอเป็นตารางในการทดสอบเดินทางและถอยแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 และสรุปผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงการทดลองขณะที่รถเดินทาง

การทดลอง	ความเร็ว	ระยะทาง	เวลาที่ใช้
1. ใช้เฉพาะแบตเตอรี่	13.3 กม./ชม.	1,000 เมตร	4 นาที
2. ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์	13.5 กม./ชม.	1,000 เมตร	3.5 นาที
3. ใช้เฉพาะแผงโซลาร์เซลล์	รถไม่วิ่ง	-	-

จากตารางที่ 1 เป็นผลการทดลองเดินทางของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงาน 2 ระบบ ที่ผู้วิจัยได้กำหนดระยะทางในการทดลองเป็นระยะทาง 1000 เมตรหรือ 1 กิโลเมตร พบว่าเมื่อใช้เฉพาะแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวในการขับเคลื่อนรถยนต์ไฟฟ้าชาร์จ 2 ระบบ ของผู้วิจัยจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่นานกว่าการใช้แบตเตอรี่ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ในการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ โดยกรณีที่ 2 การใช้แบตเตอรี่ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ในการจ่ายพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อน พบว่ารถไฟฟ้าต้นแบบสามารถเพิ่มความเร็วเฉลี่ยเป็น 13.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และใช้เวลาในการเคลื่อนที่ลดลงเหลือ 3.5 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเพิ่มเติมเข้าสู่ระบบ และกรณีที่ 3 การใช้แผงโซลาร์เซลล์เพียงอย่างเดียว พบว่ารถไฟฟ้าต้นแบบไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อความต้องการของมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งมีพิกัดกำลังสูงถึง 600 วัตต์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกักเก็บและจ่ายพลังงานหลักร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ และแสดงการทดลองขณะที่รถถอยหลังดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการทดลองขณะที่รถถอยหลัง

การทดลอง	ความเร็ว	ระยะทาง	เวลาที่ใช้
1. ใช้เฉพาะแบตเตอรี่	5.6 กม./ชม.	20 เมตร	20 วินาที
2. ใช้แบตเตอรี่ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์	5.9 กม./ชม.	20 เมตร	15 วินาที
3. ใช้เฉพาะแผงโซลาร์เซลล์	รถไม่วิ่ง	-	-

จากตารางที่ 2 เป็นผลการทดลองขณะรถถอยหลังพบว่าในระยะทางที่ผู้วิจัยกำหนดในการถอยคือ 20 เมตร รถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบของผู้วิจัยเมื่อใช้แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวจะใช้เวลาในการถอยหลังนานกว่าเมื่อเทียบกับใช้แบตเตอรี่ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ที่สามารถถอยหลังได้เร็วกว่า

4.3 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากไฟฟ้าตามบ้าน

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากไฟฟ้าตามบ้าน จากการชาร์จตั้งแต่ช่วงเวลา 9.00 น. – 16.00 น. เว้นระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงการทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากไฟฟ้าตามบ้าน

เวลา	แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุต	แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อแบตเตอรี่ 2 ลูกต่ออนุกรมกัน
09.00 น. - 10.00 น.	18	18
10.00 น. - 11.00 น.	19	19
11.00 น. - 12.00 น.	20	20
12.00 น. - 13.00 น.	21	21
13.00 น. - 14.00 น.	22	22
14.00 น. - 15.00 น.	23	23
15.00 น. - 16.00 น.	24	24

4.4 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ช่วงเวลา 09.00 น. – 16.00 น. เว้นระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง ดังที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงการทดสอบแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์

เวลา	ค่าความเข้มแสง (Lux)	แรงดันไฟฟ้า (V)	แรงดันแบตเตอรี่ (24 V)
09.00 น. - 10.00 น.	4,054	18	18
10.00 น. - 11.00 น.	6,169	18.2	19
11.00 น. - 12.00 น.	8,547	18.5	20
12.00 น. - 13.00 น.	9,616	19	21
13.00 น. - 14.00 น.	8,318	18.5	22
14.00 น. - 15.00 น.	6,698	18.3	23
15.00 น. - 16.00 น.	5,264	18	24

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่องรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบ มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนารถยนต์ไฟฟ้าต้นแบบที่สามารถใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าระบบที่

พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด ทั้งในส่วนของการขับเคลื่อน ระบบควบคุมความเร็ว และโดยผู้ใช้งานสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้อย่างต่อเนื่อง

ผลการทดสอบสมรรถนะของรถยนต์ไฟฟ้าพบว่า การประยุกต์ใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับระบบแบตเตอรี่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อน เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว โดยสามารถลดภาระการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่และช่วยให้ระบบมีศักยภาพในการรักษาระดับการทำงานได้ดีขึ้น

ในด้านการออกแบบและพัฒนาต้นแบบ พบว่าการวางระบบควบคุมและระบบชาร์จพลังงานทั้งสองแหล่งมีความเหมาะสม สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าการสร้างต้นแบบจะพบข้อจำกัดบางประการในขั้นตอนการประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ แต่ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบโดยรวม โดยสรุปการพัฒนาของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานชาร์จ 2 ระบบในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการพลังงานทดแทนเข้ากับระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานแล้วยังเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับการส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดและการพัฒนาเทคโนโลยียานยนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต

6. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

6.1 ควรมีการพัฒนาของระบบขับเคลื่อนให้มีสมรรถนะสูงขึ้นโดยเลือกใช้มอเตอร์และชุดส่งกำลังที่รองรับกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าเดิม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเร็ว แรงบิด และความสามารถในการรองรับภาระงานของรถยนต์ไฟฟ้า

6.2 ควรศึกษาการพัฒนาของระบบชาร์จพลังงานให้รองรับแหล่งจ่ายไฟที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ระบบไฟฟ้ากระแสตรง และระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยออกแบบชุดควบคุมการชาร์จที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการชาร์จและเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่เครื่องมือ อุปกรณ์ และคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์สงกรานต์ ไชยลังกา อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับข้อเสนอแนะทางวิชาการ แนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนด้านต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] Limpitikranon, T. (2022). Electric vehicles: PM 2.5 environmental issues and opportunities in Thailand. *Dhonburi Rajabhat University Journal of Management Science*, 4(1), 50–63.

[In Thai]

- [2] Maungnua, N., Paungmalee, N., & Sangthip, S. (2022). Electric vehicles: The vehicles of the future. *Journal of Bansomdej Engineering and Industrial Technology*, 3(1), 94–103. [In Thai]
- [3] Charoenthongthae, T., & Thanomtheeranant, K. (2023). Overview of the electric vehicle charging station business in Thailand. *Journal for Strategy and Enterprise Competitiveness*, 2(6), 80–95. [In Thai]
- [4] Pantangjaturasophon, A. (2025). Marketing mix factors influencing the decision to use electric vehicle charging stations in Nakhon Ratchasima Province. *Kasetsart Applied Business Journal*, 19(30), 43–58. [In Thai]
- [5] Tungpuri, S., Boonprasit, A., Anuan, W., Nadee, T., & Pholboon, C. (2024). An iOS-based map application for displaying electric vehicle battery charging stations in Bangkok Metropolitan Area. *RMUTP Research Journal Humanities and Social Sciences*, 9(2), 60–72. [In Thai]
- [6] Samsee, T., & Paisankittisakul, E. (2015). Real-time electric vehicle charging management by maintaining peak power demand in power systems to improve energy management system efficiency. *Journal of Engineering and Innovation*, 8(1), 77–90. [In Thai]
- [7] Promasa, N., Panapaiphat, C., Phonkaporn, S., Sirichunchuen, K., Ketkeaw, C., & Unahalekhaka, P. (2024). Suitable battery energy storage systems for residential applications with electric vehicle charging installations. *RMUTSB Academic Journal*, 12(1), 144–155. [In Thai]