



คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
Industrial Technology

# วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์

Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal

ISSN 3088-1773 (Online)

ปีที่ 1 ฉบับที่ 2

กรกฎาคม - ธันวาคม 2568

Vol. 1 No.2

July - December 2025



วารสารวิชาการ

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

## เจ้าของวารสาร

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

## วัตถุประสงค์

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ (Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal) มีวัตถุประสงค์จัดพิมพ์ขึ้นเพื่อส่งเสริมสนับสนุนการสร้างองค์ความรู้ทางวิชาการ เผยแพร่และเสนอผลงานทางวิชาการ ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ สำหรับคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา บุคลากรทางการศึกษา และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ทั้งภายในและภายนอก โดยขอบเขตเนื้อหาของบทความที่เผยแพร่ลงในวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ ประกอบด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับศาสตร์ด้านต่าง ๆ ดังนี้ 1) ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น โยธา ไฟฟ้า เครื่องกล เมคคาทรอนิกส์ อุตสาหการ พลังงาน และเทคโนโลยีเกษตร 2) ด้านวิทยาศาสตร์ประยุกต์ เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีวะ คณิตศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คอมพิวเตอร์ และสารสนเทศ 3) ด้านการออกแบบอุตสาหกรรม เช่น ศิลปะประยุกต์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ สื่อมัลติมีเดียและกราฟิก เซรามิกส์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

## นโยบาย

1. บทความที่นำเสนอเพื่อขอตีพิมพ์ต้องเป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการภาษาไทย
2. บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องเขียนตามรูปแบบที่ทางวารสารกำหนดเท่านั้น
3. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาการพิจารณาถ้อยแถลงโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และต้องเป็นบทความที่ไม่เคยรับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ใดมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างขั้นตอนการพิจารณาตีพิมพ์ที่ใด หากตรวจสอบพบว่าการจัดพิมพ์ซ้ำซ้อนถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้นิพนธ์แต่เพียงผู้เดียว
4. บทความที่ตีพิมพ์เผยแพร่ทุกบทความต้องผ่านการพิจารณาเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (Peer Review) ที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องจากภายในและ/หรือภายนอกมหาวิทยาลัย จำนวน 3 ท่านต่อหนึ่งบทความ ซึ่งบทความต้องผ่านการอนุมัติจากผู้ทรงคุณวุฒิ 2 ใน 3 ท่าน เพื่อประเมินคุณภาพและความเหมาะสมของบทความว่าสมควรเผยแพร่ตีพิมพ์หรือไม่ ทั้งนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อผู้นิพนธ์ และผู้นิพนธ์ไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Double-Blinded Peer Review)

## กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน) และฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม)

## คณะที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ คชสิทธิ์

อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรสา จรุงธรรม

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ปทุมมาเกษร

คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

## บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ชนกพร สมุทรกลิน

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

## ผู้ช่วยบรรณาธิการ และผู้ประสานงาน

นางสาวกรณิกา เมฆนภา

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

## กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย สุขสกุลชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนุสรณ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลีวนกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง

มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวงษ์ ไพรินทร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทิพย์ สุวรรณทีป

Institute of Science Tokyo

## คณะดำเนินงานวารสาร

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎาภรณ์ ศุภระมุข  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ พลเศษ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยษิตา เจริญศิริ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดเกียรติ แก้วพวง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กันยารัตน์ เอกเอี่ยม  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จุฑามาศ เกียรติเวช  
อาจารย์ ดร.ชนกพร สมุทรกลิน  
อาจารย์ ดร.วิศภพ ตรีสุวรรณ  
อาจารย์ ดร.หยก หนูสม  
อาจารย์ ดร.อานันท์ บุตรรัตน์  
อาจารย์ รัตน์โชติ ทองป่อง  
อาจารย์ วิศวรรธน์ พัชรวิชัย  
นางสาวกรณิกา เมฆนภา  
นางสาวจรรยา พุ่มพงษ์  
นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

## เจ้าหน้าที่วารสาร

นางสาวกรณิกา เมฆนภา  
นางสาวจรรยา พุ่มพงษ์  
นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

## ติดต่อกองบรรณาธิการวารสาร

สำนักงานคณบดี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ ในพระบรมราชูปถัมภ์  
เลขที่ 1 หมู่ 20 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 13180  
เบอร์โทรศัพท์ 02-529-3829 หรือ 081-323-6596

E-mail: [itec-journal@vru.ac.th](mailto:itec-journal@vru.ac.th)



# บทบรรณาธิการ

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ (Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal) เป็นวารสารวิชาการที่ดำเนินงานโดยคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี มุ่งหมายในการเป็นเวทีทางวิชาการสำหรับการนำเสนอและเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพ เป็นที่ยอมรับในวงวิชาการ ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ตลอดจนส่งเสริมการสร้างองค์ความรู้ใหม่และยกระดับศักยภาพด้านการวิจัยของคณาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา บุคลากรทางการศึกษา และผู้สนใจทั่วไป

วารสารมุ่งเผยแพร่บทความทางวิชาการในสาขาที่เกี่ยวข้องกับ (1) วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น วิศวกรรมโยธา ไฟฟ้า เครื่องกล เมคคาทรอนิกส์ อุตสาหกรรม พลังงาน และเทคโนโลยีการเกษตร (2) วิทยาศาสตร์ประยุกต์ เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา คณิตศาสตร์ สิ่งแวดล้อม คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ และ (3) การออกแบบอุตสาหกรรม เช่น ศิลปะประยุกต์ การออกแบบผลิตภัณฑ์ บรรจุภัณฑ์ เซรามิกส์ รวมถึงสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง วารสารมีกำหนดจัดพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ ได้แก่ ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน) และฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม)

สำหรับวารสารฉบับนี้ ซึ่งเป็นปีที่ 1 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2568) ได้นำเสนอบทความวิจัยจำนวน 6 บทความ จากผู้เขียนหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ทุกบทความได้ผ่านกระบวนการประเมินคุณภาพทางวิชาการ โดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่านต่อหนึ่งบทความ รวมทั้งการตรวจสอบความถูกต้องด้านภาษาและความเหมาะสมของเนื้อหาอย่างเคร่งครัด กองบรรณาธิการมุ่งมั่นพัฒนาคุณภาพการดำเนินงานของวารสารอย่างต่อเนื่อง เพื่อยกระดับมาตรฐานทางวิชาการและเตรียมความพร้อมสู่การรับรองมาตรฐานวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI)

ในฐานะบรรณาธิการ ขอกราบขอบพระคุณผู้บริหาร คณะทำงาน ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้เขียนบทความ และทุกภาคส่วนที่ให้การสนับสนุนจนทำให้วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ (Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal) ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความในฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านในการต่อยอดองค์ความรู้ พัฒนางานวิจัย และใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการอันทรงคุณค่า ทั้งนี้หากมีข้อเสนอแนะแนวทางปรับปรุง วารสารพร้อมน้อมรับความคิดเห็นเพื่อพัฒนาคุณภาพอย่างต่อเนื่อง

อาจารย์ ดร.ชนกพร สมุทรกลิน  
บรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์



# คำนำ

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ (Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal) ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2568) จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่บทความวิชาการและบทความวิจัยด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ผ่านระบบ ThaiJO โดยมุ่งสนับสนุนการพัฒนาองค์ความรู้และยกระดับคุณภาพผลงานทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา บุคลากรทางการศึกษา และผู้สนใจทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

ในฉบับนี้ได้รับรวบรวมบทความวิจัยจำนวน 6 เรื่อง ครอบคลุมประเด็นที่หลากหลายด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม ได้แก่ การประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการเพิ่มประสิทธิภาพ การออกแบบและพัฒนาระบบงานอุตสาหกรรม การประยุกต์เทคโนโลยีอัตโนมัติและระบบดิจิทัล รวมถึงการศึกษาสมบัติวัสดุและงานวิศวกรรมประยุกต์ ซึ่งสะท้อนพัฒนาการทางวิชาการที่มีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมและสังคม

บทความทุกเรื่องผ่านกระบวนการพิจารณาคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) จำนวน 3 ท่าน ต่อ 1 บทความ ทั้งจากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย พร้อมทั้งผ่านการตรวจสอบด้านภาษาและความเหมาะสมของเนื้อหาอย่างรอบคอบ กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความในฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษา การค้นคว้า และการพัฒนาองค์ความรู้ ตลอดจนสนับสนุนให้เกิดความก้าวหน้าในงานวิจัยและนวัตกรรมอย่างต่อเนื่องและยั่งยืน

**คณะดำเนินงานวารสาร**

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์



# สารบัญ

	หน้า
* วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์	ก - ค
* บทบรรณาธิการ	ง
* คำนำ	จ
* สารบัญ	ฉ
<b>บทความวิจัย</b>	
➤ ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติโดยใช้โมเดล p-hub: กรณีศึกษาในมหาวิทยาลัย อานันท์ บุตรรัตน์, ประภาวรรณ พงศ์ศรี, ภัทรภรณ์ เหนือศรี และริศภาพ ตรีสุวรรณ	1 - 9
➤ การศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ โลหะ-ยาง ภายใต้อิทธิพลของลักษณะพื้นผิววัสดุโดยใช้ แบบจำลองรอยต่อรูปคลื่นไซน์ ทยก หนูสม, เขียมพล นัครามนตรี, จุฑาณี พรหมจันทร์ และวิฑูร อุทัยแสงสุข	10 - 23
➤ การปรับปรุงประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำของเสื้อฟุตบอลภายใต้แบบจำลองอุปสงค์ช่วงปกติและช่วงฤดูกาลด้วยการ จำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง ธนิตศักดิ์ พุฒิพัฒน์โมฆิต, รามพร ทองรัมย์ โอนิส และอัสนียากร สง่าอารีย์กุล	24 - 36
➤ การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวีซีเอ็น ยันต์ศรี สมสีท่า, ทรงศักดิ์ นิลทีถิน, ชัยพล จันทร์ประดิษฐ์, ศิริวรรณ พลเศษ, กิตติศักดิ์ วาดสันทัต, ชุมพล ปทุมมาเกษร, ปรัชญ์ ใจกว้าง, อธิรนนท์ ไชยคุณ และชัยชโย ชี้อตรง	37 - 49
➤ การประยุกต์ TreeNet® Regression ในการสร้างเส้นมาตรฐานของการทดสอบการอัดแน่นดิน รัตนโชติ ทองป้อง, ปวีณา ชุนเกาะ, ธรรศ เสถียรนาม, ภาวินี มากทอง และธราพงษ์ พัฒนศักดิ์ภิญโญ	50 - 59
➤ การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพระบบการจัดลำดับแบบผสมผสานในสายการประกอบยานยนต์ด้วยเทคนิค การจำลองดิจิทัล อนุศักดิ์ อุ่นแท่น	60 - 71



# ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติโดยใช้โมเดล p-hub: กรณีศึกษาในมหาวิทยาลัย

## Vending Machine Location Problem Using The P-Hub Model: a Case Study in a University

อานันท์ บุตรรัตน์<sup>1\*</sup>, ประภาวรรณ แผงศรี<sup>1</sup>, ภัทรภรณ์ เหนือศรี<sup>1</sup> และ ริศภพ ตรีสุวรรณ<sup>1</sup>  
Anan Butrat<sup>1\*</sup>, Prapawan Pangsi<sup>1</sup>, Pattaraporn Nueasri<sup>1</sup> and Rissaphop Treesuwan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรวิศวกรรมจัดการอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Industrial Management Engineering Program, Faculty of Industrial Technology,

Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Phatumthani, 13180, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: anan.but@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : August 21, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 18, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้ โมเดล p-hub เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติในสภาพแวดล้อมของมหาวิทยาลัย โมเดลนี้ซึ่งโดยปกติใช้ในเครือข่ายการขนส่งจะช่วยระบุจุดศูนย์กลาง (central nodes) สำหรับการติดตั้งตู้กดน้ำ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดระยะทางรวมที่ผู้ใช้ต้องเดิน การศึกษานี้เสนอกรอบแนวทางสำหรับผู้บริหารมหาวิทยาลัยในการตัดสินใจเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกภายในวิทยาเขต ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโมเดลในการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดถูกระบุเป็น P1, P4 และ P8 ซึ่งให้ระยะทางรวม 1,110 เมตร การศึกษานี้เสนอแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคตให้พิจารณาปัจจัยที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่น รูปแบบการสัญจรของผู้คนที่เปลี่ยนไป และ อัตราการใช้งานตู้กดน้ำ การศึกษานี้เน้นศักยภาพของโมเดล p-hub ในการพัฒนาคุณภาพชีวิตในวิทยาเขตและสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหาร

**คำสำคัญ :** ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติ, โมเดล P-Hub, การเพิ่มประสิทธิภาพ, ปัญหาการวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก, การเขียนโปรแกรมเชิงตัวเลขแบบทวิภาค (Binary Programming)

### Abstract

This study applies the p-hub model to optimize vending machine locations in a university setting. The model, traditionally used in transportation networks, identifies central nodes for vending machine placement, aiming to minimize total travel distance for users. The study provides a framework for university administrators to make informed decisions about campus amenities. The results show the model's effectiveness in addressing the vending machine location problem. Optimal positions were identified as P1, P4, and P8, yielding a total distance of 1,110 meters. The study suggests future research to include dynamic factors like changing foot traffic



patterns and vending machine usage rates. This study highlights the potential of the p-hub model in enhancing campus life and guiding decision-making.

**Keywords :** Vending Machine Location Problem, P-Hub Model, Optimization, facility location problem, Binary programming

## บทนำ

ในโลกปัจจุบันที่เต็มไปด้วยความเร่งรีบ ความสะดวกสบายถือเป็นสิ่งสำคัญ หนึ่งในสัญลักษณ์ที่พบได้บ่อยที่สุดของวัฒนธรรมความสะดวกสบายนี้คือ ตู้กดน้ำอัตโนมัติ ตู้กดน้ำอัตโนมัติ ด้วยความสามารถในการให้บริการสินค้าต่าง ๆ ตั้งแต่อาหารว่าง เครื่องดื่ม ไปจนถึงอาหารสำเร็จรูป กลายเป็นส่วนสำคัญในชีวิตประจำวันของเรา นอกจากนี้ ตู้กดน้ำยังได้พัฒนาขึ้นเกินกว่าการให้บริการด้านอาหารและเครื่องดื่มเท่านั้น ปัจจุบันตู้กดน้ำสามารถให้บริการสินค้าหลากหลาย ตั้งแต่เครื่องใช้ไฟฟ้าไปจนถึงสินค้าดูแลส่วนบุคคล ทำให้กลายเป็น จุดบริการแบบครบวงจร สำหรับความต้องการหลายด้านของผู้ใช้

ในมหาวิทยาลัย การวางตำแหน่งตู้กดน้ำอย่างมีกลยุทธ์ไม่ได้เป็นเพียงเรื่องของความสะดวกสบายเท่านั้น แต่ยังคงกลายเป็นความท้าทายด้านการเพิ่มประสิทธิภาพที่ซับซ้อน ซึ่งสะท้อนถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของนักศึกษาและบุคลากรอย่างละเอียด บทความนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ โมเดล p-hub ซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในงานวิจัยด้านการปฏิบัติการ เพื่อแก้ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำในบริบทของมหาวิทยาลัย โมเดล p-hub ซึ่งโดยทั่วไปใช้ในด้านโลจิสติกส์และเครือข่ายการขนส่ง มีความเชี่ยวชาญในการระบุ จุดศูนย์กลาง (hub) ที่ทรัพยากรสามารถไหลเวียนไปยัง จุดปลายทาง (spoke) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้โมเดลนี้กับกรณีของวิทยาเขตมหาวิทยาลัยมีวัตถุประสงค์เพื่อ เพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงและลดเวลาในการเดินทางของผู้ใช้

ความสำคัญของการศึกษานี้มีสองประการ ประการแรกคือการส่งเสริมคุณภาพชีวิตในวิทยาเขต โดยทำให้แน่ใจว่านักศึกษาและบุคลากรสามารถเข้าถึงบริการตู้กดน้ำได้อย่างรวดเร็วและสะดวกสบาย ประการที่สองคือการนำเสนอ กรอบแนวทางเชิงวิวิธวิทยา สำหรับผู้บริหารมหาวิทยาลัยในการตัดสินใจเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ภายในวิทยาเขต ในขณะที่เราศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับความซับซ้อนของโมเดล p-hub บทความนี้จะสำรวจ ศักยภาพในการปฏิวัติวิธีการกำหนดตำแหน่งตู้กดน้ำ ซึ่งจะ เป็นแบบอย่างสำหรับงานวิจัยในอนาคตด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อประยุกต์ใช้ โมเดล p-hub ในการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติภายในมหาวิทยาลัย
- 1.2 เพื่อหาตำแหน่งตู้กดน้ำที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Location) ที่ช่วยลดระยะทางรวมการเดินทางของผู้ใช้

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ได้รวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดกรอบแนวคิดการวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) วิวัฒนาการของปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งสิ่งอำนวยความสะดวก (2) ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง p-hub ในด้านการผลิตและการขนส่ง และ (3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดวางตู้กดน้ำอัตโนมัติ

### 2.1 วิวัฒนาการของโมเดลการเลือกทำเลที่ตั้ง (Facility Location Models)

พื้นฐานของการศึกษาการเลือกทำเลที่ตั้งเริ่มจากปัญหาการวางตำแหน่งโรงงานแบบดั้งเดิม (Simple Plant Location Problem) ซึ่งมีเป้าหมายในการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน Cabezas และ García [1] ได้นำเสนออัลกอริทึม Lagrangean Relaxation เพื่อแก้ปัญหาการเลือกทำเลที่ตั้งที่มีความซับซ้อนโดยพิจารณาถึงความพึงพอใจ (Preferences) ร่วม

ด้วย ในขณะที่ Haddou Amar และคณะ [2] ได้เสนอวิธีการลดระยะทาง (Distance Reduction Approach) เพื่อช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของโรงงาน ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เป็นรากฐานสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงความพยายามในการใช้คณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหาการจัดวางทรัพยากร

## 2.2 ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง p-hub

ในงานผลิตและขนส่ง แบบจำลอง p-hub (p-hub Model) เป็นทฤษฎีขั้นสูงที่พัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในการออกแบบเครือข่ายที่มีจุดศูนย์กลาง (Hubs) ในการรวบรวมและกระจายสินค้า ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบโลจิสติกส์และการผลิตสมัยใหม่ โดยวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์และการประยุกต์ใช้ดังนี้

ด้านการผลิตและการกระจายสินค้า (Production and Distribution): Zhao และคณะ [3] ได้นำเสนอแบบจำลอง p-hub Center Problem แบบความน่าจะเป็นที่มีความทนทาน (Distributionally Robust Chance-Constrained) การศึกษานี้ชี้ให้เห็นประโยชน์ของการใช้ p-hub model ในการจัดการกับ "ความไม่แน่นอน" ของข้อมูลในโซ่อุปทาน ซึ่งช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถกำหนดตำแหน่งศูนย์กลางการกระจายสินค้าที่รองรับความเสี่ยงและความผันผวนของความต้องการสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ด้านการขนส่งและโลจิสติกส์ (Transportation and Logistics): Ghaffarinasab และ Motallebzadeh [4] ได้ศึกษาปัญหา p-hub Median Problem ภายใต้สภาวะที่มีความแออัด (Congestion) งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าในการขนส่งจริง การเลือกตำแหน่งฮับที่ไม่คำนึงถึงปริมาณจราจรอาจทำให้เกิดความล่าช้า ดังนั้นการประยุกต์ใช้โมเดล p-hub ที่พิจารณาปัจจัยด้านความแออัดจะช่วยลดต้นทุนเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการไหลเวียนของสินค้าในเครือข่ายขนส่งได้ดียิ่งขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นแสดงให้เห็นว่า p-hub model เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถรองรับเงื่อนไขที่ซับซ้อนทั้งในด้านความไม่แน่นอนและความหนาแน่นของการใช้งาน

## 2.3 การศึกษาบริบทการวางตำแหน่งตู้กดสินค้า (Vending Machine Context)

นอกเหนือจากทฤษฎีเชิงคำนวณ การวางตำแหน่งตู้กดสินค้าในทางปฏิบัติยังต้องคำนึงถึงผลกระทบทางสังคมและบริบทการใช้งาน Volpe และคณะ [5] ได้นำเสนอผลลัพธ์จากโครงการ "A Vending Machine for a Friend" ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวางตู้กดสินค้าเพื่อให้เข้าถึงกลุ่มเป้าหมายในเชิงโภชนาการและสุขภาพ ในขณะที่ Stewart และคณะ [6] ได้ศึกษาการยอมรับของชุมชนต่อการวางตู้กดสินค้าเพื่อการลดอันตราย (Harm Reduction) โดยพบว่าแม้ตู้กดสินค้าจะมีประโยชน์ แต่การเลือกตำแหน่งต้องพิจารณาถึงแรงต้านจากชุมชน (Community Opposition) อย่างรอบคอบ การศึกษาเหล่านี้เน้นย้ำว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Location) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะทางเพียงอย่างเดียว แต่ต้องคำนึงถึงการยอมรับและการเข้าถึงของผู้ใช้งานจริงด้วย

## วิธีดำเนินการวิจัย

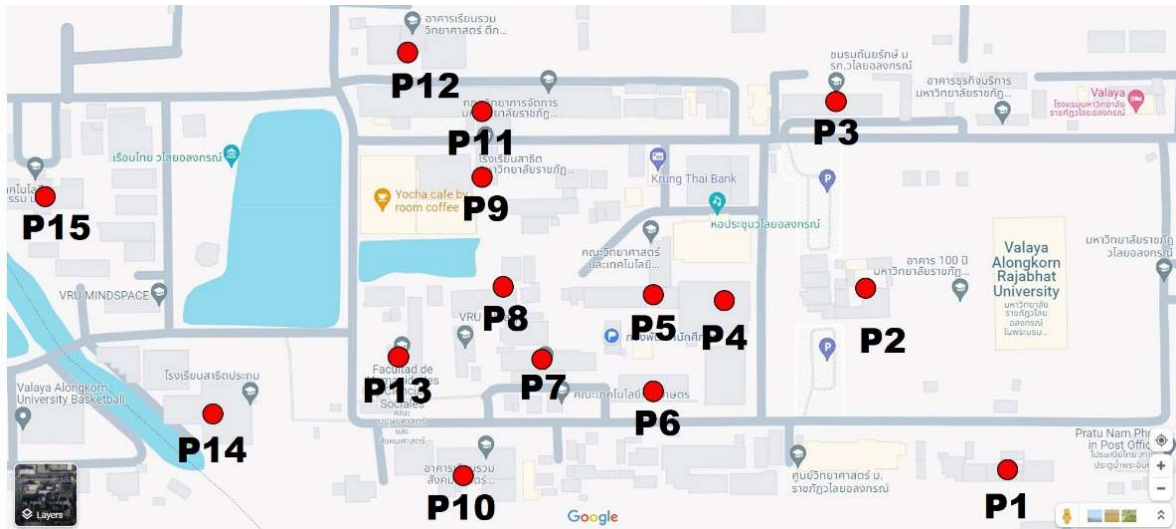
### 1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลถือเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการนำโมเดลการวางตำแหน่งตู้กดน้ำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนย่อยนี้อธิบายกระบวนการรวบรวมข้อมูล ซึ่งรวมถึง แผนผังของมหาวิทยาลัย (ดูรูปที่ 1) และ ระยะทางระหว่างอาคารแต่ละหลัง (ดูรูปที่ 2) โดยใช้ Google Maps เป็นเครื่องมือหลักในการเก็บข้อมูล เพื่อให้ได้ทั้งความแม่นยำและความเกี่ยวข้องกับบริบท

### 2. การสร้างแบบจำลอง

โมเดล p-hub ถูกสร้างขึ้นเพื่อค้นหา ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของสิ่งอำนวยความสะดวกโดยอ้างอิงโครงสร้างสมการและหลักการคำนวณจากงานวิจัยของ Zhao และคณะ [3] และ Ghaffarinasab และ Motallebzadeh [4] ส่วนย่อยนี้อธิบาย

การแทนค่าทางคณิตศาสตร์ของโมเดล รวมถึงสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function) และสมการข้อจำกัด (Constraints) โมเดลมีเป้าหมายเพื่อลดระยะทางรวมที่ผู้ใช้ต้องเดิน โดยพิจารณาจำนวนตึกน้ำที่จำเป็นตามจำนวน hub ที่ต้องการ



รูปที่ 1 ตำแหน่งของตึกเรียนภายในมหาวิทยาลัย

ระยะทาง	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
P1	0	230	450	260	450	350	350	500	550	400	550	650	450	550	1000
P2		0	350	190	400	270	300	350	500	350	500	600	350	500	900
P3			0	180	230	400	450	300	250	500	250	350	500	650	650
P4				0	190	240	260	270	300	320	300	400	400	450	700
P5					0	73	80	80	210	220	200	400	450	600	600
P6						0	81	210	500	180	500	500	260	330	700
P7							0	100	400	105	400	400	98	250	600
P8								0	310	550	300	50	50	50	50
P9									0	450	10	190	300	400	400
P10										0	450	450	130	200	600
P11											0	54	250	400	350
P12												0	300	400	300
P13													0	160	500
P14														0	500
P15															0

รูปที่ 2 ระยะทางระหว่างตึกเรียน

ดัชนี

$$i = \text{จำนวนตำแหน่ง (i = 1, 2, \dots, N)}$$

พารามิเตอร์

$$d_{ij} = \text{ระยะทางระหว่างตึก}$$

= จำนวน hub ที่ต้องการ

ตัวแปรตัดสินใจ

$x_{ij}$  = ตัวแปรเชิงทวิภาค (Binary) สำหรับกำหนดว่า ตำแหน่ง  $i$  จะถูกกำหนดให้กับตำแหน่ง  $j$  หรือไม่

$y_j$  = ตัวแปรเชิงทวิภาค (Binary) สำหรับเลือกตำแหน่ง  $j$  ให้เป็น hub

สมการวัตถุประสงค์

$$MIN = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij}y_j \quad (1)$$

สมการข้อจำกัด

$$\sum_i^N x_{ij} = 1 \quad \forall j \text{ in } I \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \text{ in } I \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N y_j = p \quad (4)$$

สมการวัตถุประสงค์ของโมเดล (1) มีจุดประสงค์เพื่อลด ระยะทางรวมที่ผู้ใช้ต้องเดินไปยังตู้กดน้ำ สมการข้อจำกัดข้อแรก (2) รับประกันว่า ทุกตำแหน่งผู้ใช้ต้องอยู่ในพื้นที่บริการของตู้กดน้ำอย่างน้อยหนึ่งเครื่อง สมการข้อจำกัดข้อที่สอง (3) กำหนดให้ ระยะทางไปยังตู้กดน้ำต้องไม่เกินระยะบริการสูงสุดที่กำหนดไว้ สมการข้อจำกัดข้อที่สาม (4) ระบุว่า จำนวนตู้กดน้ำที่เลือกติดตั้ง ต้องตรงกับจำนวนตู้กดน้ำที่จำเป็นเพื่อการครอบคลุมที่เหมาะสม

### 3. วิธีการแก้ปัญหา

งานวิจัยนี้ใช้ กลยุทธ์เชิงอัลกอริทึม ในการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำ ซึ่งเป็น ตัวแปรของโมเดล p-hub ระเบียบวิธีคำนวณนี้อาศัยการผสมระหว่าง Python ซึ่งเป็นภาษาการเขียนโปรแกรมที่มีความยืดหยุ่นสูง และ Python-MIP ซึ่งเป็นไลบรารีที่ให้เครื่องมือสำหรับ Mixed-Integer Linear Programming (MILP)

เพื่อจัดการกับความซับซ้อนของปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ใช้ อัลกอริทึม Branch-and-Bound ซึ่งสำรวจต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree) อย่างเป็นระบบ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของตู้กดน้ำ วิธีการนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการแก้ปัญหา Binary Programming ซึ่งการตัดสินใจเป็นแบบทวิภาค

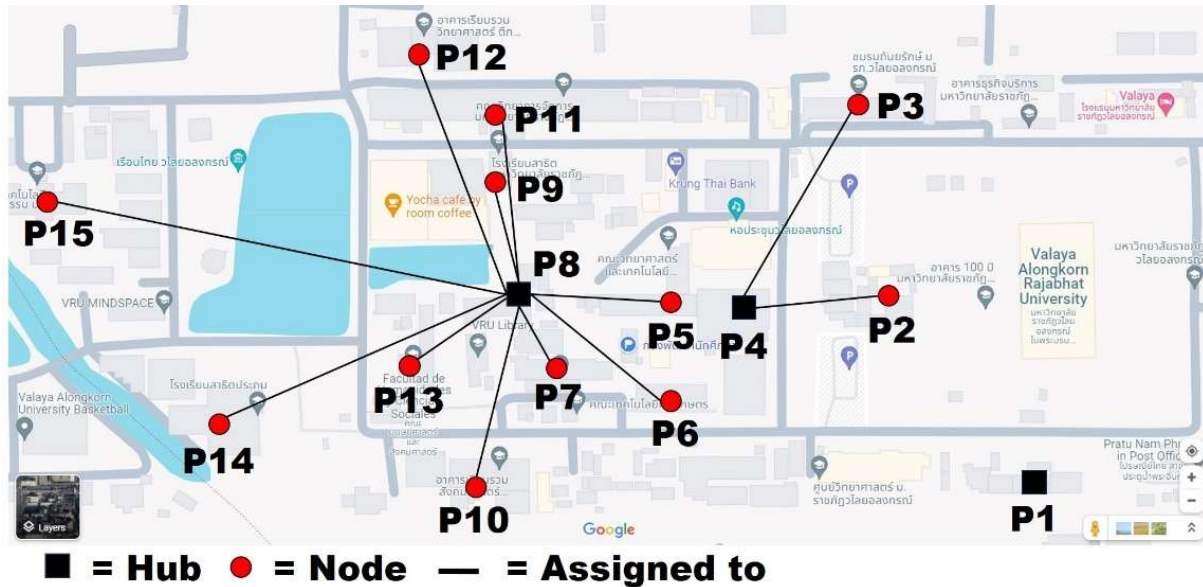
### ผลการวิจัย

#### 1. ตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติที่เหมาะสมที่สุด

โมเดลระบุ ตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระยะทางรวมต่ำสุด โดยจากจำนวน 15 ตำแหน่งและความต้องการ 3 hub ตำแหน่งที่เหมาะสมคือ P1, P4 และ P8 ซึ่งให้ ระยะทางรวม 1,110 เมตร ตำแหน่ง P1 ครอบคลุมเพียง 1 จุด ในขณะที่ P4 และ

P8 ครอบคลุม 7 จุดต่อแต่ละ hub แสดงให้เห็น การกระจายอย่างมีกลยุทธ์ ที่เน้นทั้งการเข้าถึงง่ายและประสิทธิภาพ การกำหนด node เฉพาะมีดังนี้: P1, P4, P4, P4, P8, P8, P8, P8, P8, P8, P8, P8, P8, P8, P8

รูปที่ 3 แสดงภาพการเลือก hub และการกำหนด node ของแต่ละ hub อย่างชัดเจน ทำให้เห็นภาพรวมของการกระจายตัวคนภายในวิทยาเขต การจัดวางนี้ช่วยให้ ทุกพื้นที่ที่มีการสัญจรสูงได้รับการบริการอย่างเหมาะสม เพิ่มความสะดวกสบายให้กับชุมชนในวิทยาเขต



รูปที่ 4 การกำหนด P1 P4 และ P8 เป็น hub

## 2. การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวถูกดำเนินการเพื่อ ประเมินความมั่นคงของโมเดลต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์สำคัญ เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัญจรของผู้คนหรืออัตราการใช้งานตู้คน้ำ นอกจากนี้ งานวิจัยยังรวมผลลัพธ์จากการเปลี่ยนจำนวน hub ที่ต้องการตั้งแต่ 1 ถึง 15 ตามรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การปรับเปลี่ยนจำนวน hub

จำนวน hub ที่ต้องการ	ตำแหน่งที่เป็น hub	ผลลัพธ์จากโมเดล															ระยะทางรวม (เมตร)
		Node จะถูกมอบหมายไปยัง hub															
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
1	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	2,160
2	P4, P8	P4	P4	P4	P4	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	1,370
3	P1, P4, P8	P1	P4	P4	P4	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	1,110
4	P1, P4, P5, P8	P1	P4	P4	P4	P5	P5	P5	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	873
5	P1, P2, P3, P5, P8	P1	P2	P3	P3	P5	P5	P5	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	683

6	P1, P2, P3, P4, P5, P8	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P8	P8	P8	P8	P8	P8	P8	503
7	P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9	P1	P2	P3	P4	P5	P5	P5	P8	P9	P8	P9	P8	P8	P8	413
8	P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8, P9	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P8	P9	P8	P8	P8	333
9	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P11	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P11	P8	P11	P8	P8	P8	260
10	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P10, P11	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P8	P11	P8	P8	P8	210
11	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P10, P11, P15	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P8	P11	P8	P8	P8	160
12	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P11, P12, P13, P15	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P10	P8	P11	P12	P13	P8	110
13	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P15	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P8	P9	P12	P13	P14	60
14	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P10, P11, P12, P13, P14, P15	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P11	P10	P11	P12	P13	P14	10
15	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P19, P10, P11, P12, P13, P14, P15	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	0

## อภิปรายผล

การประยุกต์ใช้โมเดล p-hub กับปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติภายในมหาวิทยาลัยได้ให้ผลลัพธ์ที่น่าสนใจและมีนัยสำคัญ ส่วนนี้จะอภิปรายถึงผลลัพธ์ที่ได้ ความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีต และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

### 1 นัยสำคัญของผลลัพธ์และการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลลัพธ์จากการคำนวณผ่านโมเดล p-hub ระบุว่าตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งตู้กดน้ำคือจุด P1, P4 และ P8 การกระจายตัวของตำแหน่งเหล่านี้ช่วยลดระยะทางรวมในการเดินทางของผู้ใช้งานในวิทยาเขตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งผลลัพธ์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับแนวคิดของ Haddou Amar และคณะ [2] ที่นำเสนอวิธีการลดระยะทาง (Distance Reduction Approach) ว่าเป็นปัจจัยวิกฤตในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ นอกจากนี้ กระบวนการคัดเลือกตำแหน่งภายใต้เงื่อนไขความ

ต้องการของผู้ใช้ ยังสอดคล้องกับงานของ Cabezas และ García [1] ที่พบว่าอัลกอริทึมที่มีการผ่อนคลาย (Relaxation Algorithm) สามารถระบุตำแหน่งที่ตอบสนองความพึงพอใจได้ดีกว่าการพิจารณาเพียงต้นทุนเพียงอย่างเดียว

ในแง่ของประสิทธิภาพเชิงโครงข่าย การที่โมเดลสามารถระบุจุดศูนย์กลาง (Hubs) ที่รองรับความหนาแน่นของผู้ใช้งานได้ดี ถือเป็นที่ยืนยันความสามารถของโมเดล p-hub ที่ถูกกล่าวถึงในงานของ Zhao และคณะ [3] และ Ghaffarinasab และ Motallebzadeh [4] โดยผลการวิจัยของเราแสดงให้เห็นว่า แม้จะปรับเปลี่ยนบริบทจากระบบขนส่งขนาดใหญ่ (Logistics) มาเป็นระบบบริการภายในวิทยาเขต (Campus Facility) หลักการรวมศูนย์เพื่อลดความแออัดและเพิ่มความรวดเร็วในการเข้าถึงยังคงใช้งานได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพและให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ

นอกจากมิติด้านคำนวณ ผลลัพธ์ที่ได้ยังสนับสนุนงานวิจัยเชิงคุณภาพของ Volpe และคณะ [5] และ Stewart และคณะ [6] อย่างชัดเจน โดยตำแหน่ง P1, P4 และ P8 ล้วนเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมหนาแน่น ซึ่งตรงกับข้อค้นพบของพวกเขาที่ว่าความสำเร็จของการตั้งตู้กดสินค้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับตัวสินค้าเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับ "การเข้าถึงได้ง่าย" (Accessibility) และ "การยอมรับของชุมชน" (Community Acceptability) หากวางในตำแหน่งที่ผู้คนไม่สะดวกเดินทางไปใช้บริการ แม้ระบบจะดีเพียงใดก็ไม่อาจเกิดประโยชน์สูงสุดได้

## 2. บทสรุปและแนวทางการวิจัยในอนาคต

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้โมเดล p-hub จากเดิมที่มักใช้ในการขนส่ง มาสู่การจัดการสิ่งอำนวยความสะดวกในระดับจุลภาค อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การวิจัยมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นในอนาคต ควรมีการพิจารณาปัจจัยแบบไดนามิก (Dynamic Factors) เพิ่มเติม เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัญจรในช่วงเวลาเรียนและนอกเวลาเรียน หรือความแปรผันของความต้องการตามฤดูกาล ซึ่งจะช่วยให้โมเดลมีความละเอียดและตอบโจทย์ความเป็นจริงได้ดียิ่งขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ โมเดล p-hub กับปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติในบริบทของมหาวิทยาลัยได้สำเร็จ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโมเดลในฐานะ เครื่องมือที่ทรงพลังสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่า การวางตู้กดน้ำอย่างมีกลยุทธ์สามารถเพิ่มความสะดวกสบายอย่างมากและยกระดับคุณภาพชีวิตในวิทยาเขต ความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวของ โมเดล p-hub ถูกเน้นอย่างชัดเจน โดยการประยุกต์ใช้โมเดลนี้ขยายเกินขอบเขตการใช้งานเดิมในเครือข่ายการขนส่งและโลจิสติกส์ การศึกษานี้จึงสร้าง แบบอย่างสำหรับงานวิจัยในอนาคต ขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้โมเดลและช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับ ปัญหาการวางตำแหน่งที่ซับซ้อน นอกจากนี้การศึกษายังได้เสนอกรอบแนวทางเชิงวิวิธวิทยาที่มั่นคง ซึ่งสามารถชี้แนะแนวทางการตัดสินใจในบริบทที่หลากหลาย และเน้นย้ำถึงความสำคัญของการผสมผสาน วิจัยเชิงปริมาณกับเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพขั้นสูง เพื่อแก้ปัญหาเชิงซับซ้อนในโลกจริง

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังตระหนักถึง ความเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic nature) ของปัญหา แนวทางการวิจัยในอนาคตอาจรวมถึง การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัญจรของผู้คนและอัตราการใช้งานตู้กดน้ำตามเวลา ซึ่งจะช่วยพัฒนา โมเดลที่ซับซ้อนและแม่นยำยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การผสมผสาน เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพอื่น ๆ กับโมเดล p-hub ยังสามารถสำรวจเพื่อแก้ปัญหาการวางตำแหน่งที่ซับซ้อนมากขึ้น การศึกษานี้ไม่เพียงแต่มีส่วนช่วย ยกระดับคุณภาพชีวิตในวิทยาเขต แต่ยังให้ ข้อมูลเชิงลึกอันมีค่าในสาขาการเพิ่มประสิทธิภาพการวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวก แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโมเดล p-hub ในการเปลี่ยนวิธีการกำหนดตำแหน่งตู้กดน้ำ และวางรากฐานสำหรับ งานวิจัยในอนาคตในสาขาที่น่าตื่นเต้นนี้ เมื่อเรายังคงปรับปรุงและขยายโมเดลนี้ต่อไป เราจะสามารถค้นพบโอกาสใหม่ ๆ และมีส่วนร่วมต่อการพัฒนาในสาขาการศึกษาอันสำคัญนี้ต่อไป

## ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโมเดล p-hub ในการแก้ปัญหาการวางตำแหน่งตู้กดน้ำอัตโนมัติภายในมหาวิทยาลัย อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประยุกต์ใช้โมเดลมีความแม่นยำและเหมาะสมยิ่งขึ้น แนะนำให้งานวิจัยในอนาคตพิจารณาปัจจัยแบบไดนามิก เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัญจรของนักศึกษาและบุคลากรตามเวลา รวมถึงอัตราการใช้งานตู้กดน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงวัน นอกจากนี้สามารถทดลองผสมผสานเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพอื่น ๆ เข้ากับโมเดล p-hub เพื่อแก้ปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ได้ การจัดวางตู้กดน้ำที่ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ได้ดีที่สุด และสามารถนำกรอบแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้กับการวางตำแหน่งสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ภายในมหาวิทยาลัยหรือองค์กรอื่น ๆ ได้ในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Cabezas, X., & Garcia, S. (2018). A Lagrangean relaxation algorithm for the simple plant location problem with preferences. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1805.03945>
- [2] Haddou Amar, S., Abouabdellah, A., & Ouazzani, Y. E. (2017). A distance reduction approach for simple plant location problem. In 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT) (pp. 1–5). IEEE.
- [3] Zhao, Y., Chen, Z., & Zhang, Z. (2023). Distributionally robust chance-constrained p-hub center problem. *INFORMS Journal on Computing*, 35(6), 1361–1382.
- [4] Ghaffarinasab, N., & Motallebzadeh, A. (2021). Modeling and solving the uncapacitated r-allocation p-hub median problem under congestion. *Computational and Applied Mathematics*, 40(7), 251.
- [5] Volpe, R., Glaveckaite, S., Sotis, G., Kersnauskaite, D., Sulskute, K., Polevoda, V., Dudoniene, I., & Volpe, M. (2023). Results of European Heart Network pilot project “A vending machine for a friend”. *Journal of Food and Nutrition Sciences*, 11(3), 63–69.
- [6] Stewart, R. E., Cardamone, N. C., Loscalzo, E., French, R., Lovelace, C., Mowenn, W. K., Tarhini, A., Lalley-Chareczko, L., Brady, K. A., & Mandell, D. S. (2023). “There’s absolutely no downside to this, I mean, except community opposition”: A qualitative study of the acceptability of vending machines for harm reduction. *Harm Reduction Journal*, 20(1), 25.



## การศึกษาความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ โลหะ-ยาง ภายใต้อิทธิพลของลักษณะพื้นผิว วัสดุโดยใช้แบบจำลองรอยต่อรูปคลื่นไซน์

### Numerical Investigation of Interfacial Strength in Metal–Rubber Bonding Influenced by Substrate Surface Topography Using a Sine Wave Interface Model

หยก นุสม<sup>1\*</sup>, เยี่ยมพล นครามอนตรี<sup>2</sup>, จุฑาณี พรหมจันทร์<sup>3</sup> และ วิฑูร อุทัยแสงสุข<sup>3</sup>

Yok Nusom<sup>1\*</sup>, Yeampon Nakaramontri<sup>2</sup>, Juthanee Phromjan<sup>3</sup> and Vitoon Uthaisangsuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

<sup>2</sup>ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,  
กรุงเทพมหานคร, 10140, ประเทศไทย

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,  
กรุงเทพมหานคร, 10140, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Major of Mechanical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,  
Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: yok.nu@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : November 7, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 21, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างโลหะและยางภายใต้อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) โดยใช้แบบจำลอง RVE (representative volume element) ของรอยต่อแบบสองมิติ ร่วมกับแบบจำลอง CZM (cohesive zone model) ซึ่งใช้กฎ TSL (traction-separation law) เพื่อจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ การศึกษาจะใช้การเทียบเคียงความขรุขระหรือความหยาบผิวของโลหะด้วยรูปคลื่นไซน์ (sine wave) โดยเปรียบเทียบผลของรูปคลื่นภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความสูงและความยาวคลื่นซึ่งเปรียบเสมือนรูปทรงและค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยต่ออีกด้วย จากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของความหยาบผิวโลหะจะส่งผลกระทบต่อการยึดติดระหว่างวัสดุอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมอดูลัสของ

สภาพยึดหยุ่นของยางสูงกว่า 50 MPa เมื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวด้วยความสูงและความยาวคลื่น ความแข็งแรงรอยต่อจะเพิ่มขึ้นประมาณ 152 % เมื่อความสูงคลื่นเพิ่มจาก 0.002 เป็น 0.02 mm. และเพิ่มขึ้นประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm. ที่มอดูลัสของสภาพยึดหยุ่นของยางเท่ากับ 1000 MPa

**คำสำคัญ :** การยึดติดโลหะ-ยาง, ความแข็งแรงรอยต่อ, ลักษณะพื้นผิว, รูปทรงคลื่น

## Abstract

This research investigates the interfacial strength between metal and rubber under the influence of surface topography by means of the finite element method. A two-dimensional representative volume element (RVE) model of the joint was developed in conjunction with a cohesive zone model (CZM) employing the traction–separation law (TSL) to simulate interfacial damage and failure. The surface roughness of the metal substrate was modeled using sinusoidal wave geometries to examine the effects of wave amplitude and wavelength on the surface profile. Additionally, the elastic modulus of the rubber was varied to evaluate its impact on overall interfacial strength. Results indicate that variations in metal surface roughness significantly affect interfacial adhesion when the elastic modulus of the rubber exceeds 50 MPa. Specifically, at a rubber elastic modulus of 1000 MPa, interfacial strength increased by 152% as wave height increased from 0.002 mm to 0.02 mm, and by approximately 325% as the wavelength decreased from 0.1 mm to 0.01 mm.

**Keywords :** Metal–rubber bonding; Interfacial strength; Surface topography; Waveform morphology

## บทนำ

การยึดติด (adhesion / bonding) ระหว่างวัสดุต่างชนิดถือว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการพัฒนาวัสดุผสม ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ หรือโครงสร้างที่ประกอบด้วยวัสดุต่างประเภทเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะการยึดติดระหว่างโลหะ เช่น อะลูมิเนียม กับ ยาง หรือพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆ ซึ่งพบในผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น ยางรถยนต์แบบไร้ลม ซีลกันรั่ว ยางรองแท่นเครื่อง ชิ้นส่วนกันสั่นสะเทือนดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นต้น ความแข็งแรงของรอยต่อวัสดุ (interfacial strength) มีอิทธิพลโดยตรงต่อสมรรถนะโดยรวมของโครงสร้าง ดังนั้นการยึดติดที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการพัฒนาชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์เหล่านั้น [1,2] โดยทั่วไปแล้วสมบัติของการยึดติดของรอยต่อวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวทั้งทางกายภาพ (physical bonding) ทางเคมี (chemical bonding) รวมถึงการยึดเกาะเชิงกล (mechanical Interlocking) ในส่วนของการเกาะยึดเชิงกลนั้น ได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยวของพื้นผิววัสดุ ผ่านกระบวนการปรับสภาพผิว (surface treatment) เช่น การเพิ่มความหยาบผิวด้วยกระบวนการเชิงกล (mechanical roughening) การกัดกร่อนทางเคมี (chemical treatment) และการทำพื้นผิวด้วยเลเซอร์ (laser texturing) [3–5] เป็นต้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่าลักษณะพื้นผิววัสดุมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการยึดเป็นอย่างยิ่ง การศึกษารูปแบบยึดติดในสัดส่วนระดับจุลภาคหรือไมโครสเกล (micro-scale) และ เมโสสเกล (meso-scale) จะสามารถแสดงให้เห็นพฤติกรรมของวัสดุและนำมาวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบได้ เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมและความเสียหายของรอยต่อระหว่างโลหะและยางเมื่อมีแรงกระทำ งานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลอง RVE แบบ 2 มิติ ในระดับเมโสสเกล ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบ 3 มิติ มาเป็นแบบจำลองตั้งต้นเพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะหรือรูปแบบพื้นผิวต่อการยึดติดระหว่างโลหะและยางซึ่งใช้รูปแบบคลื่นไซน์ (sine

wave) เป็นตัวแทนของลักษณะผิวโลหะ ร่วมกับแบบจำลอง CZM และกฎ TSL ปัจจัยหลักที่ทำการศึกษาคือรูปทรงและค่าความหยาบผิวที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งอยู่ในรูปของความสูงและความยาวคลื่น นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยด้านสมบัติวัสดุเช่นการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุยางที่ส่งผลต่อความแข็งแรงรอยต่ออีกด้วย



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีการยึดติดระหว่างโลหะและยาง [6,7]

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างวัสดุโลหะและยางที่เป็นผลมาจากลักษณะพื้นผิวของวัสดุ
- 1.2 เพื่อเข้าใจพฤติกรรมการยึดติด การเปลี่ยนรูป และการเกิดความเสียหายระหว่างรอยต่อวัสดุ

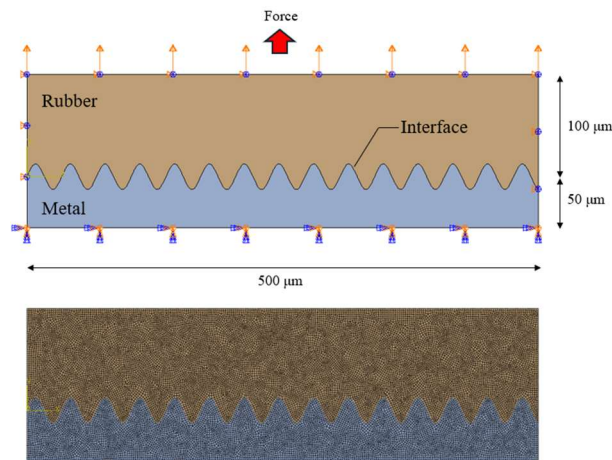
## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาด้านวัสดุวิศวกรรม แบบจำลอง RVE (Representative Volume Elements) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานจำลองเชิงตัวเลข (numerical modeling) เพื่อการวิเคราะห์และทำนายสมบัติเชิงกล (effective mechanical properties) ของวัสดุต่างๆ ทั้งโลหะ พอลิเมอร์ วัสดุคอมโพสิต และวัสดุชนิดอื่น ๆ โดยสามารถศึกษาลักษณะการเสียรูปเชิงกลในระดับจุลภาค (micro-mechanical deformation) ของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ได้ [8,9] สำหรับกรณีของการยึดติดวัสดุต่างชนิด การเกิดความเสียหายหรือการแยกตัวที่รอยต่อ (interface failure / delamination) ก็สามารถอธิบายได้ด้วยการจำลอง RVE เช่นกัน ซึ่ง O'Dwyer et al. [10] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างชั้นกาวกับวัสดุคอมโพสิตโดยใช้แบบจำลอง RVE ซึ่งประกอบด้วยชั้นของคอมโพสิตและชั้นกาว และมีการนิยามกฎ traction-separation law (TSL) ที่รอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสอง ซึ่งได้มีการพิจารณาการรับแรงในทิศตั้งฉากกับรอยต่อ (normal mode / Mode I) และแรงเฉือน (shear mode / Mode II) จากการศึกษาพบว่ากรณีที่แรงยึดติดระหว่างวัสดุต่ำจะทำให้เกิดความเสียหายแบบแยกตัวระหว่างระหว่างวัสดุ (bond line delamination) ขณะที่เมื่อเพิ่มแรงยึดติดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความเสียหายเกิดขึ้นภายในเนื้อคอมโพสิตแทน ในทำนองเดียวกัน Hirsch และ Kästner [11] ได้เสนอวิธีการจำลองแบบ RVE เพื่อศึกษาความแข็งแรงรอยต่อระหว่างโลหะและพอลิเมอร์ โดยใช้แบบจำลอง cohesive zone model (CZM) ร่วมกับกฎ TSL โดยจำลองให้โลหะมีความหยาบผิวและกำหนดให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ส่วนของพอลิเมอร์นิยามด้วยพฤติกรรมวัสดุแบบพลาสติก (plasticity model) ร่วมกับสมการความเสียหายแบบเหนียว (ductile damage model) เพื่อให้แบบจำลองสามารถเกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุได้ รูปแบบความหยาบผิวของรอยต่อถูกแทนด้วยรูปทรงสามเหลี่ยมหลายลักษณะ และทำการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของ

รอยต่อ (adhesive failure / delamination) และการเสียหายในเนื้อวัสดุ (cohesive failure) ต่อมาแบบจำลองดังกล่าวได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและวัสดุคอมโพสิตประเภทอีพ็อกซีเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforced epoxy; GFRP) โดยใช้หน้าตัดความหยาบผิวแบบสุ่ม (random roughness profiles) ซึ่งถูกสร้างขึ้นด้วยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ [12] ผลลัพธ์จากการจำลองพบว่า การเพิ่มความหยาบผิววัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของรอยต่อระหว่างวัสดุ

## วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้มีการนำแบบจำลอง RVE (representative volume element) แบบ 2 มิติมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของรูปแบบรอยต่อระหว่างวัสดุต่อประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างวัสดุโลหะและยางเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของรูปแบบความหยาบผิวต่อประสิทธิภาพการยึดติดระหว่างวัสดุได้ง่ายขึ้นและอาศัยรูปแบบผิวรูปคลื่นไซน์ (sine wave) [13,14] ทดแทนลักษณะความหยาบผิวโลหะ แบบจำลองดังกล่าวได้ดำเนินการและประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Abaqus ซึ่งขนาดสัดส่วนของแบบจำลองอยู่ในระดับเมโสสเกล (meso-scale) โดยมีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างชิ้นงาน (Mode I: normal) ดังแสดงในรูปที่ 2 แบบจำลองมีขนาด  $500 \times 150 \mu\text{m}^2$  ประกอบด้วย 2 วัสดุ ได้แก่ โลหะและวัสดุยาง และกำหนดให้เป็นเอลิเมนต์แบบ plane strain ขนาด  $0.002 \text{ mm}$  จากขอบเขตของแบบจำลอง (model boundary) ขอบล่างซึ่งเป็นวัสดุโลหะจะถูกยึดไว้ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในขณะที่แรงกระทำ (load) จะอยู่ที่ขอบบนของวัสดุยาง



รูปที่ 2 แบบจำลอง RVE ของรอยต่อสำหรับการยึดติดระหว่างวัสดุโลหะ-ยาง

### 1. แบบจำลองรูปคลื่นไซน์

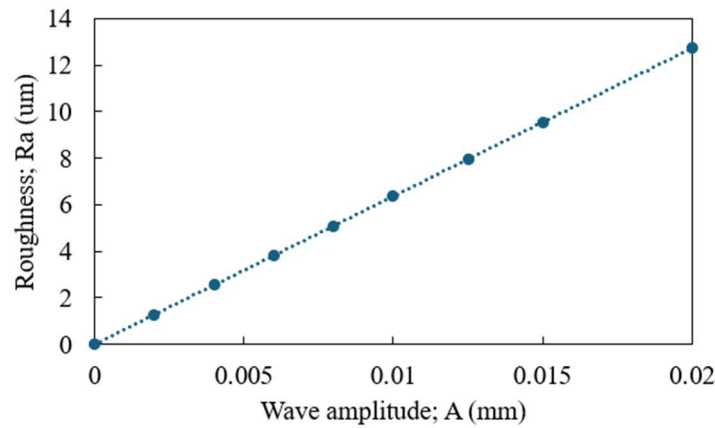
รอยต่อระหว่างโลหะและยางมีรูปร่างตามลักษณะของความหยาบผิววัสดุซึ่งสามารถลดความซับซ้อนเชิงรูปร่างลงโดยใช้คลื่นไซน์ (sine wave) [13,14] ดังสมการที่ (1) มาเป็นตัวแทน

$$z(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (1)$$

โดย  $A$  (Amplitude) คือ ความสูงของคลื่น และ  $\lambda$  (Wavelength) คือความยาวคลื่น ซึ่งค่าความหยาบผิว  $R_a$  มีความสัมพันธ์กับความสูงของคลื่นดังสมการที่ (2) เมื่อแทนค่า  $R_a$  ลงในสมการคลื่นไซน์จะได้สมการความสัมพันธ์ของคลื่นไซน์และความหยาบผิวดังสมการที่ (3) และสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 3

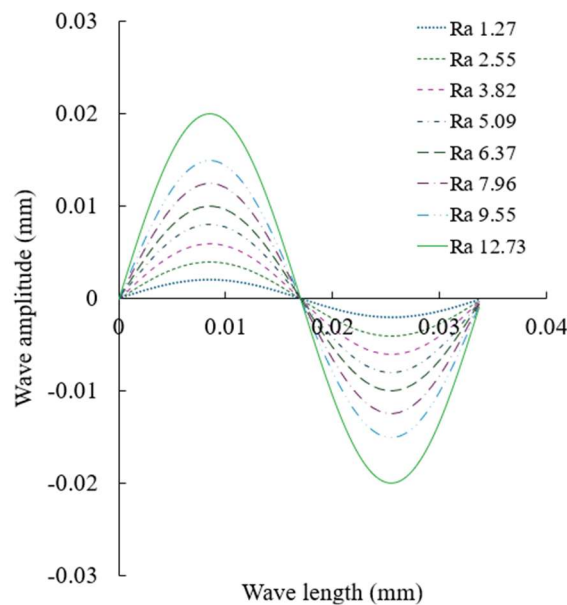
$$Ra = \frac{2A}{\pi} \tag{2}$$

$$z(x) = \left(\frac{\pi Ra}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{3}$$

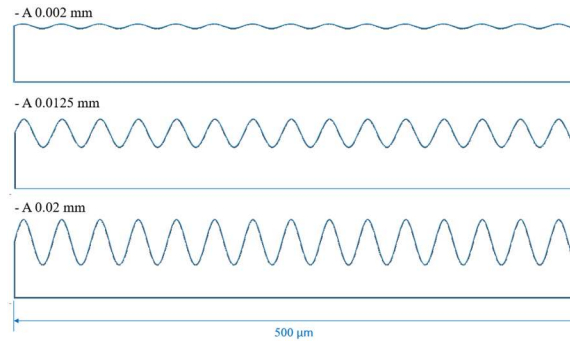


รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคลื่นและความหยาบผิว

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้นำแบบจำลองรูปคลื่นไซน์ (sine wave model) มาใช้เพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์หาค่าจากปัจจัยต่างๆ โดยใช้ความสูงคลื่นตั้งแต่ 0.002 – 0.02 mm. ดังกราฟในรูปที่ 4 ซึ่งครอบคลุมความหยาบผิว Ra 1.27 – 12.73 μm โดยกำหนดให้ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.034 mm. ตัวอย่างผิวดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 5

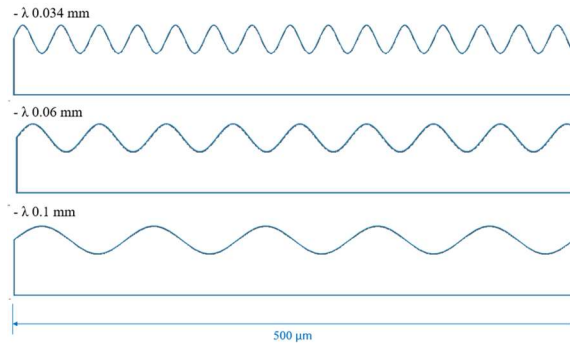


รูปที่ 4 กราฟแสดงคลื่นไซน์ของแต่ละความหยาบผิว



รูปที่ 5 หน้าตัดรูปคลื่นที่มีความสูงคลื่นแตกต่างกันโดยมีความยาวคลื่นขนาด 0.034 mm.

ถึงแม้ว่าความยาวคลื่น  $\lambda$  จะไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหยาบผิวดังแสดงในสมการ (3) แต่ก็มีผลต่อรูปร่างของความหยาบผิว ดังนั้นความยาวคลื่นที่ระยะ 0.01 – 0.1 mm. ดังแสดงตัวอย่างหน้าตัดรูปคลื่นในรูปที่ 6 ได้ถูกนำมาพิจารณา ร่วมกับความสูงคลื่น 0.0125 mm. หรือ Ra ขนาด 7.96  $\mu\text{m}$  เพื่อศึกษาอิทธิพลของการยึดติดอีกด้วย



รูปที่ 6 หน้าตัดรูปคลื่นที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันโดยมีความสูงคลื่นขนาด 0.0125 mm.

## 2 แบบจำลองสมบัติวัสดุ

แบบจำลองสมบัติวัสดุ (material model) ของทั้งวัสดุโลหะและยางได้ถูกกำหนดให้มีสมบัติความยืดหยุ่นแบบคงที่ (linear elastic) โดยใช้สมบัติวัสดุดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวัสดุโลหะมีความแข็งแรงกว่าวัสดุยางมากดังนั้นโลหะจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแต่อย่างใดแต่จะเกิดการยึดตัวในวัสดุยางแทน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการศึกษานี้มีการวิเคราะห์ถึงผลกระทบจากการยึดตัวของวัสดุยาง จึงกำหนดให้ยางมีสมบัติแบบยืดหยุ่นคงที่เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองและการวิเคราะห์หลัง

ระหว่างวัสดุทั้งสองถูกขึ้นด้วยรอยต่อ (interface) ซึ่งนิยามสมบัติของรอยต่อด้วย cohesive zone model (CZM) เพื่อกำหนดให้รอยต่อสามารถเกิดความเสียหายขึ้นได้ซึ่งทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากกัน (delamination) โดยใช้กฎ traction-separation law (TSL) ซึ่งพฤติกรรมความยืดหยุ่นของรอยต่อได้แสดงในสมการ (4)

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K\delta \quad (4)$$

เมื่อ  $t_i$  คือ stress components,  $t_i$  คือ strain components และ  $K$  คือ elastic stiffness of cohesive layer  
 $t_i$  เกณฑ์ความเสียหายของรอยต่อแบบผสม (mixed mode) ของแต่ละทิศทางถูกนิยามด้วยเกณฑ์ quadratic stress criterion [15–17] ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ทำให้เกิดเริ่มต้นของการหลุดออกของสองวัสดุที่แสดงในสมการ (5)

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (5)$$

เมื่อ  $t_n^0$ ,  $t_s^0$  และ  $t_t^0$  คือ ความแข็งแรงของรอยต่อในทิศตั้งฉากกับแนวแรงและแนวเฉือน  
นอกจากนั้นการลามของการหลุดออกของรอยต่อถูกควบคุมด้วย critical energy ( $G^c$ ) ซึ่งเป็นผลจากเกณฑ์ Benzeggagh-Kenane (B-K) ตามสมการที่ (6) ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษานี้

$$G_n^c + (G_s^c - G_n^c) \left\{\frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t}\right\}^\eta = G^c \quad (6)$$

เมื่อ  $G_n^c$  และ  $G_s^c$  คือ Critical fracture energies ในทิศตั้งฉากและแนวเฉือน และ  $h$  คือ ค่าคงที่ของ Cohesive factor ของรอยต่อของวัสดุตามสมการ B-K criterion โดยสมบัตินี้รอยต่อระหว่างวัสดุถูกสมมติค่าเพื่อใช้ในการศึกษาดังแสดงใน

ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 สมบัติโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของวัสดุ

Material	Elastic modulus; E (MPa)
Metal	70,000
Rubber	1-1000

ตารางที่ 2 สมบัตินี้รอยต่อระหว่างวัสดุ

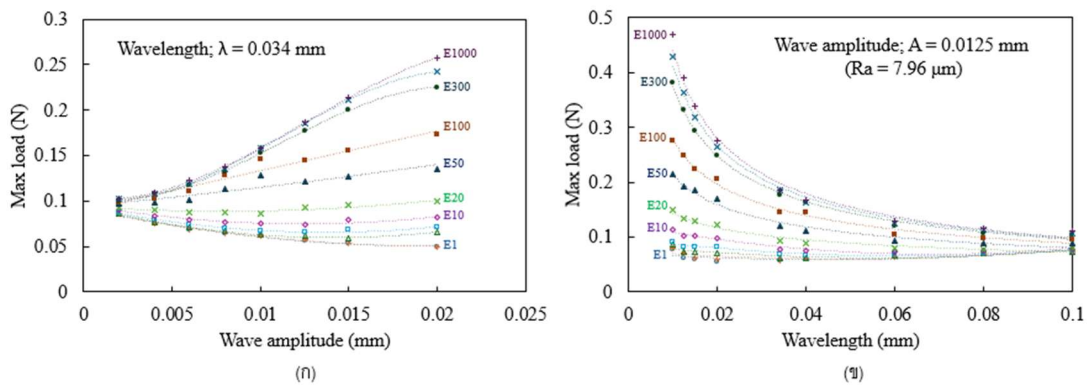
Cohesive zone parameter	Value
$t_n^0$ (MPa)	0.2
$t_s^0$ (MPa)	0.2
$K$ (MPa)	2000
$G_n^c$ (mJ/mm <sup>2</sup> )	0.05

## ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

### 1. ความแข็งแรงยึดติดระหว่างวัสดุ

ผลลัพธ์จากแบบจำลอง RVE ในรูปที่ 7 (ก) เป็นการแสดงแรงสูงสุดที่กระทำตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างวัสดุ (Mode I; Normal) ที่มีความขนาด 500  $\mu\text{m}$  เมื่อมีความสูงคลื่น (wave amplitude; A) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้ความยาวคลื่น (Wavelength;  $\lambda$ ) มีขนาด 0.034 mm. จากกราฟได้แสดงให้เห็นว่าความสูงของคลื่นซึ่งเป็นตัวแทนของความหยาบผิวนั้นส่งผล

กระทบโดยตรงต่อแรงยึดติดของวัสดุ อย่างไรก็ตามตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดผลกระทบร่วมคือสมบัติทางกลของวัสดุยาง ซึ่งในที่นี้มีการเปรียบเทียบแรงยึดติดที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (elastic modulus) ตั้งแต่ 1-1000 MPa ที่ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นต่ำซึ่งหมายถึงวัสดุที่มีความแข็งต่ำและมีความอ่อนตัวได้มาก เช่นในช่วง 1-1.5 MPa แรงยึดติดของวัสดุมีแนวโน้มที่ค่อยๆ ลดลงเล็กน้อยเมื่อความสูงคลื่นหรือความหยาบผิวสูงขึ้น เมื่อมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นหรือวัสดุที่มีความแข็งมากขึ้น เช่น ตั้งแต่ 3-20 MPa แรงกระทำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.0125 mm เป็นต้นไป อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าแรงยึดติดของวัสดุที่มีความสูงคลื่นหรือความหยาบผิวที่แตกต่างกันในช่วงมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1 – 20 MPa มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าความหยาบผิวไม่ได้ส่งผลต่อแรงยึดติดของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญเมื่อวัสดุมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า 20 MPa ตั้งแต่มอดูลัส 50 MPa แรงยึดติดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความสูงคลื่นเพิ่มมากขึ้น และแนวโน้มความชันการเพิ่มขึ้นของแรงยึดติดยิ่งมากขึ้นเมื่อวัสดุมีความแข็งมากขึ้น ในการศึกษาี้แรงยึดติดสูงสุดที่เป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดความสูงคลื่นจาก 0.002 ถึง 0.02 mm. เกิดขึ้นเมื่อมีมอดูลัสสูงสุด 1000 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้น 152% ที่ความความหยาบผิวสูงสุดโดยมีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm

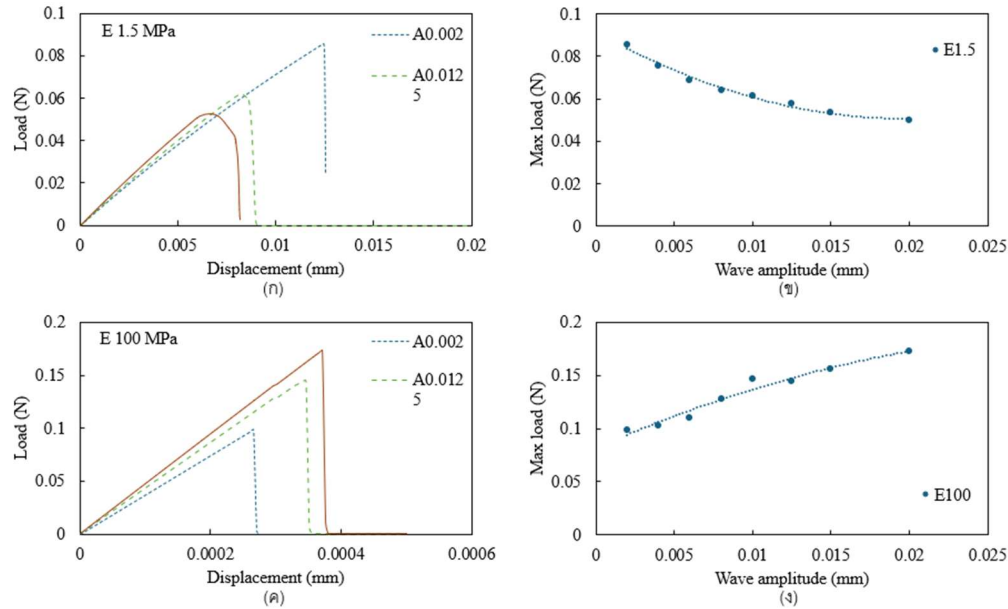


รูปที่ 7 ผลลัพธ์แรงกระทำสูงสุดใน Mode I (Normal) จากแบบจำลองรูปคลื่นที่มี (ก) ความสูงคลื่นที่แตกต่างกัน และ (ข) ความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน

จากกราฟเปรียบเทียบ Load-displacement ในรูปที่ 8 ซึ่งให้เห็นความแตกต่างของพฤติกรรมการยึดติดเมื่อมีความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นทั้งในวัสดุอ่อน (รูปที่ 8 (ก)) และวัสดุแข็ง (รูปที่ 8 (ค)) จากที่กล่าวข้างต้น ที่วัสดุอ่อนจะทำให้แรงยึดติดลดต่ำลงเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่น แต่ในทางกลับกันแรงยึดติดจะสูงขึ้นเมื่อวัสดุแข็งขึ้นหรือมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นตั้งแต่ 20 MPa ขึ้นไป อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่นจะมีผลต่อความชันกราฟ กล่าวคือความชันกราฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงคลื่นมีมากขึ้นทั้งในวัสดุอ่อนและวัสดุแข็งซึ่งหมายถึง Stiffness ของการยึดติดซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งของรอยต่อนั้นเพิ่มขึ้นด้วย

ความยาวคลื่นก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดเนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคลื่นกราฟดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) เปรียบเทียบแรงยึดติดของวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นแตกต่างกันซึ่งเป็นผลมาจากความยาวคลื่นโดยที่ความสูงคลื่นถูกกำหนดให้มีขนาด 0.0125 mm. หรือเทียบเท่าความหยาบผิว Ra ขนาด 7.96  $\mu\text{m}$  และความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01 – 0.1 mm. จากกราฟในรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นยิ่งน้อยประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุยิ่งเพิ่มมากขึ้นซึ่งความแตกต่างมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อวัสดุยางมีมอดูลัสของยึดหยุ่นสูงสุดคือที่ 1000 MPa โดยมีความแตกต่างประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm.

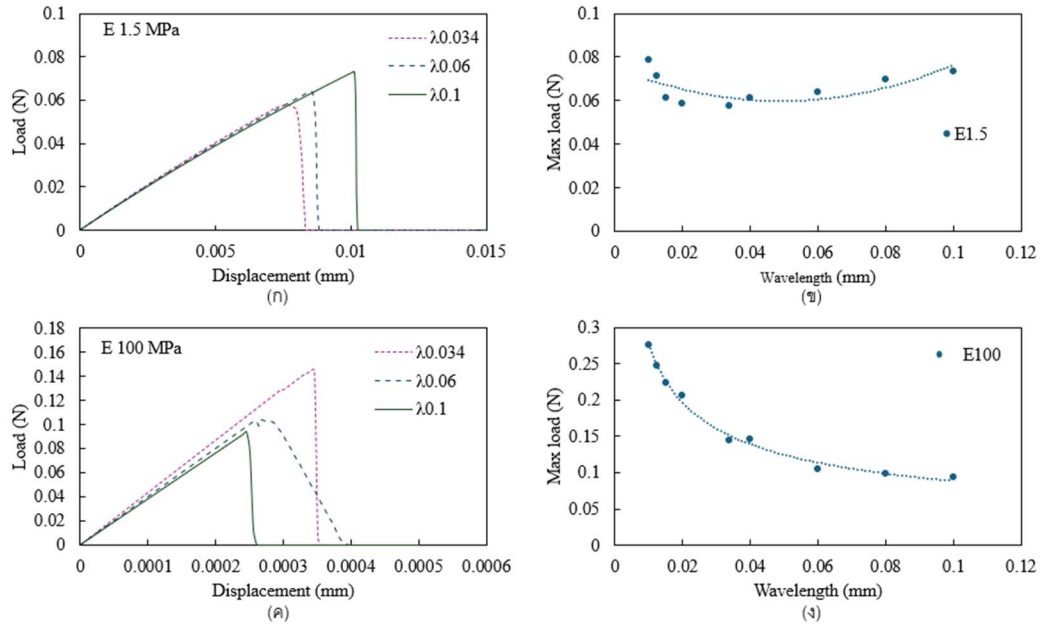




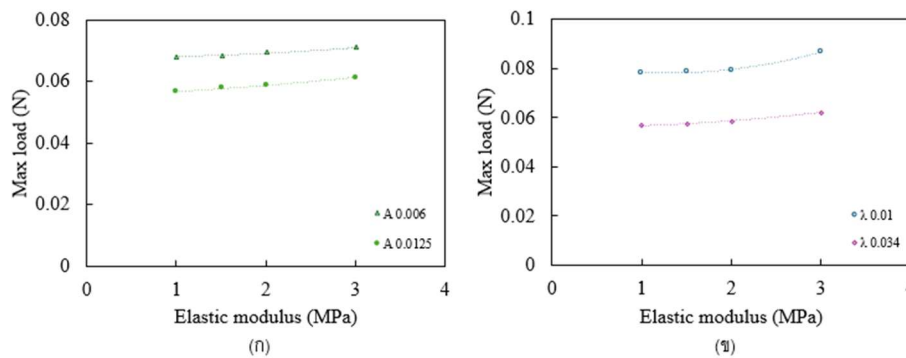
รูปที่ 8 ผลการจำลองใน Mode I ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงคลื่น (ก) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงามีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ข) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงามีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ค) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงามีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa, (ง) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงามีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa

ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก) และ (ค) การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นส่งผลต่อความชันของกราฟเพียงเล็กน้อยไม่ว่าจะในวัสดุที่มีความแข็งมากหรือน้อยซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงของความสูงคลื่น นั่นหมายความว่าความยาวคลื่นไม่มีอิทธิพลต่อ Stiffness ของผิวยึดติดอย่างมีนัยสำคัญ

จากที่กล่าวในข้างต้นจะเห็นว่าสมบัติทางกลของขงามีผลกระทบต่อแรงยึดติดระหว่างวัสดุเป็นอย่างมาก ในกรณีนี้วัสดุมีความแข็งน้อยหรือมีความอ่อนตัวสูงเช่นมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 1 – 3 MPa การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของวัสดุขงใน ช่วงนี้ มีผลต่อประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุค่อนข้างน้อยดังแสดงในรูปที่ 10 แต่เมื่อขงมีความแข็งมากขึ้นตามข้อมูลจากกราฟในรูปที่ 7 ยิงทำให้มีสมบัติการยึดติดระหว่างวัสดุเพิ่มขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาโดยที่คลื่นไซน์ที่มีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm. และความยาวคลื่นขนาด 0.034 เมื่อวัสดุมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1000 MPa จะทำให้แรงยึดติดเพิ่มขึ้น 421% หรือที่ความสูงคลื่นขนาด 0.0125 mm. ซึ่งเทียบเท่ากับความหยาบผิว Ra 7.96  $\mu\text{m}$  และความยาวคลื่นขนาด 0.01 mm. แรงยึดติดระหว่างวัสดุจะมีความแตกต่างสูงถึง 499%



รูปที่ 9 ผลการจำลองใน Mode I ที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น (ก) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ข) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 1.5 MPa, (ค) กราฟ Load-displacement เมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa, (ง) แรงยึดติดสูงสุดเมื่อวัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa



รูปที่ 10 ผลลัพธ์แรงกระทำสูงสุดใน Mode I (Normal) ที่เป็นผลมาจากสมบัติวัสดุ (ก) เปรียบเทียบตามความสูงคลื่น และ (ข) เปรียบเทียบตามความยาวคลื่น

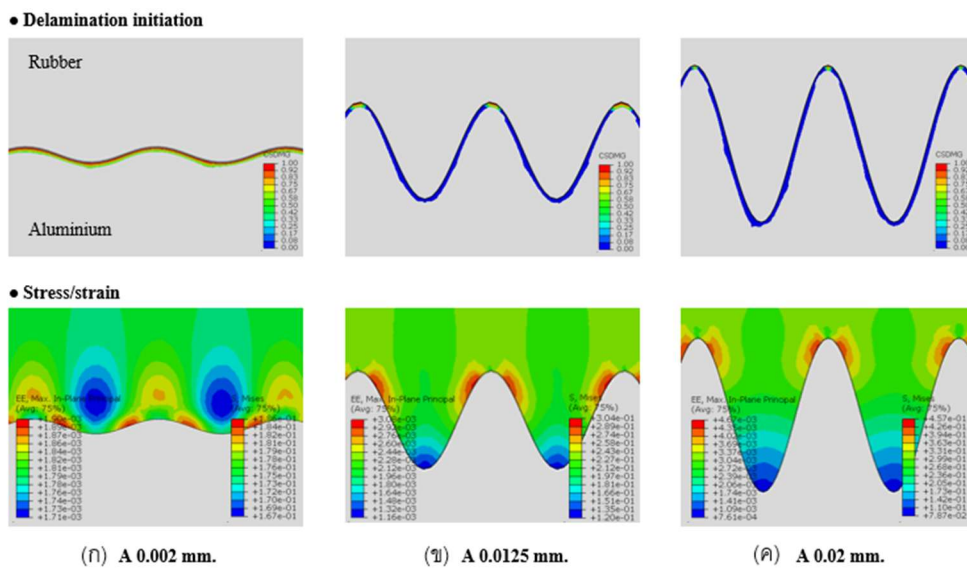
## 2. ความเสียหายของรอยต่อระหว่างวัสดุ

ความเสียหายจากการหลุดออกจากกันของรอยต่อระหว่างวัสดุ (interfacial delamination) ขึ้นอยู่กับรูปร่างของคลื่นจากการสังเกตรผ่านแบบจำลองที่วัสดุขงมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa ดังแสดงใน รูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ซึ่งแสดงการหลุดออกของรอยต่อและการกระจายตัวของความเค้น-ความเครียดในเนื้อวัสดุ นั้นชี้ให้เห็นว่าโดยปกติแล้วจุดเริ่มต้นของการหลุดของรอยต่อ (delamination initiation) มักจะเกิดที่ปลายยอดของวัสดุที่แข็งกว่า (ยอดคลื่น) และลามตามรอยต่อของวัสดุไปยังบริเวณอื่นจนกระทั่งหลุดออกอย่างสมบูรณ์ (completed delamination) เนื่องจากปลายยอดของวัสดุแข็งจะเป็นจุดที่มีความ

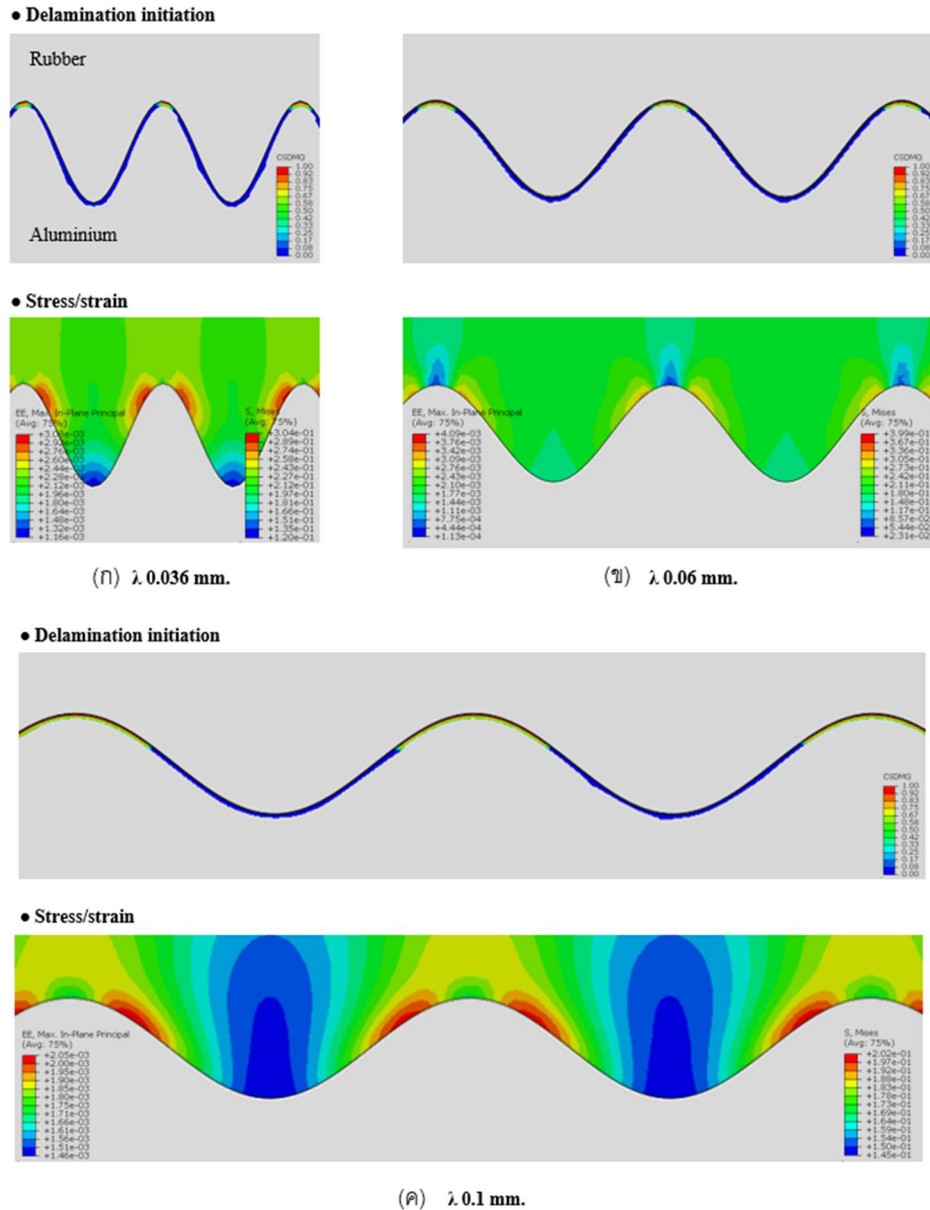
หนาแน่นของความเค้น (stress concentration) ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำ ความเค้นบริเวณปลายยอดคลื่นจะกระจายตัวและส่งผลกระทบต่อบริเวณต่อทำให้เกิดการหลุดออกดังกล่าว

ในกรณีที่ความหยาบพื้นผิวของโลหะมีมากซึ่งหมายถึงมีความสูงคลื่นมากขึ้นทำให้ยอดคลื่นมีลักษณะเป็นมุมแหลมซึ่งส่งผลต่อทิศทางแรงที่กระทำก็บรรอยต่อเป็นแบบผสม (mixed mode) ผนวกกับการเพิ่มขึ้นของความสูงคลื่นทำให้พื้นที่ยึดติดมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้สามารถต้านทานต่อการหลุดออกได้มากขึ้นดังอธิบายโดย Nusom et al. [18] ในขณะที่การลดลงของความยาวคลื่นก็เป็นการทำให้มุมยอดคลื่นลดลงเช่นกันจึงเป็นสาเหตุให้มีแรงยึดติดระหว่างวัสดุเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

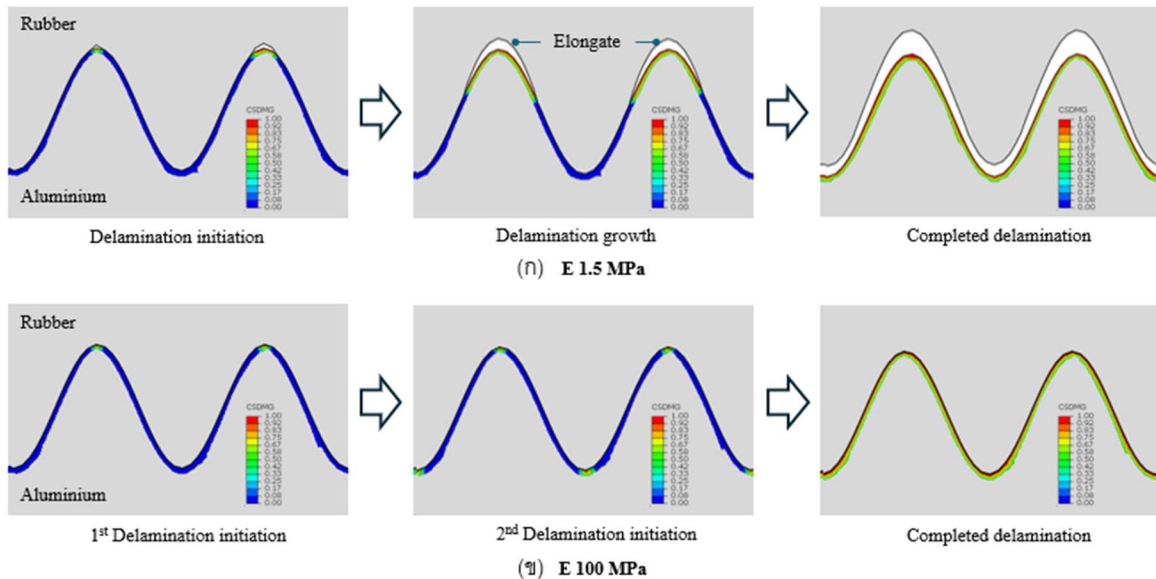
จากรูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อวัสดุอย่างมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน ในที่นี้เป็นารเปรียบเทียบยางที่มีความอ่อนตัวมากกว่าเช่นมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น  $E = 1.5 \text{ MPa}$  และยางที่มีความแข็ง  $E = 100 \text{ MPa}$  ในวัสดุที่มีความอ่อนมากๆ ยางจะสามารถยึดตัวได้ดี ในจุดที่มีแรงกระทำมาก ยางจะเกิดการยึดตัวเยาะกว่าบริเวณอื่นและทำให้ความเค้นกระจายได้ไม่ดีและส่งผลให้ความเค้นเกิดการสะสมตัวมากในบางจุด ซึ่งจากการอธิบายในก่อนหน้าความเค้นจะเกิดการสะสมอยู่บริเวณปลายยอดคลื่นและทำให้เกิดการเริ่มต้นของการหลุดออก (delamination initiation) ดังนั้นวัสดุที่อ่อนกว่าจึงสามารถเกิดการเริ่มต้นการหลุดออกได้ง่ายกว่าวัสดุแข็งซึ่งสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่า หลังจากที่ยางหลุดออกจากรอยยึดติดแล้วยางที่มีความอ่อนตัวมากจะเกิดการยึดตัวเป็นอย่างมากซึ่งทำให้เกิดการดึงรั้งบริเวณรอยต่อที่เกิดการหลุดออกในช่วงต้นจนเกิดการลาม (delamination growth) จนกระทั่งหลุดออกโดยสมบูรณ์ (completed lamination) ดังแสดงในรูปที่ 13 (ก) ส่วนในวัสดุที่มีความแข็งกว่าดังแสดงในรูปที่ 13 (ข) จะเห็นว่าจะมีการยึดตัวที่ต่ำมาก การกระจายตัวของความเค้นที่ดีทำให้สามารถส่งต่อแรงกระทำไปยังรอยต่อของวัสดุได้ใกล้เคียงกันจึงทำรอยต่อมีความแข็งแรงและยากต่อการหลุดออกได้ดีกว่าวัสดุที่อ่อนตัวกว่า



รูปที่ 11 แสดงการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุและการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดสูงสุดที่มีความสูงคลื่นแตกต่างกันเมื่อความยาวคลื่นมีขนาด 0.034 mm และวัสดุอย่างมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa (ก) A 0.002 mm., (ข) A 0.0125 mm. และ (ค) A 0.02 mm.



รูปที่ 12 แสดงการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุและการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดสูงสุดที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเมื่อความสูงคลื่นมีขนาด 0.0125 mm และวัสดุยางมีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น 100 MPa (ก)  $\lambda$  0.002 mm., (ข)  $\lambda$  0.0125 mm. และ (ค)  $\lambda$  0.02 mm.



รูปที่ 13 ผลลัพธ์จากแบบจำลองแสดงพฤติกรรมการหลุดออกของรอยต่อระหว่างวัสดุเมื่อวัสดุมีสมบัติทางกลแตกต่างกัน (ก) E 1.5 MPa และ (ข) E 100 MPa

### สรุปผลการวิจัย

วัสดุยางที่มีค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า 20 MPa การเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวจะไม่ส่งผลต่อแรงยึดติดระหว่างวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่มอดูลัสสูงกว่า 50 MPa นั้นแรงยึดติดจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความหยาบผิวมากขึ้น ซึ่งเมื่อมีมอดูลัส 1000 MPa ความแข็งแรงรอยต่อจะเพิ่มขึ้น 152% เมื่อความสูงคลื่นเพิ่มจาก 0.002 เป็น 0.02 mm. ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นมีผลกระทบต่อแรงยึดติดเช่นกัน กล่าวคือเมื่อความยาวคลื่นสั้นลงทำให้ประสิทธิภาพการยึดติดของวัสดุยิ่งเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความแตกต่างมากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อวัสดุยางมีมอดูลัสของยืดหยุ่นสูงสุดคือที่ 1000 MPa โดยมีความแตกต่างประมาณ 325% เมื่อความยาวคลื่นถูกลดจาก 0.1 mm. เป็น 0.01 mm. ซึ่งจากการสังเกตจากผลที่ได้จากแบบจำลองวัสดุยางที่มีความแข็งแรงน้อยทำให้เกิดการยึดตัวในแต่ละจุดไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดการสะสมของความเค้นบริเวณรอยต่อเฉพาะจุดและทำให้เกิดการหลุดออกของรอยต่อบริเวณนั้นๆได้ง่าย ในขณะที่วัสดุที่แข็งแรงกว่าสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่าจึงทำให้มีความแข็งแรงรอยต่อที่มากกว่า ซึ่งหากพิจารณาโดยที่คลื่นไซน์ที่มีความสูงคลื่นขนาด 0.02 mm. และความยาวคลื่นขนาด 0.034 เมื่อวัสดุมีมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 1000 MPa จะทำให้แรงยึดติดเพิ่มขึ้นถึง 421%

### ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาปัจจัยในการยึดติดระหว่างวัสดุเบื้องต้นเพื่อให้เห็นผลกระทบจากรูปแบบพื้นผิวโลหะโดยใช้คลื่นรูปไซน์เป็นตัวแทนความหยาบผิว อย่างไรก็ตามลักษณะผิวโลหะจริงนั้นจะมีลักษณะที่ต่างกันไป ซึ่งอาจทำให้ผลการศึกษาเกิดการคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นการวิจัยในครั้งต่อไปควรมีการทดสอบการยึดติดและสร้างแบบจำลองจากผิวชิ้นงานจริงเพื่อเปรียบเทียบ รวมถึงพิจารณาคลื่นรูปแบบอื่นในการศึกษาเพื่อให้เห็นทิศทางในการปรับปรุงรูปแบบพื้นผิวโลหะให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการยึดติดกับวัสดุยาง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของ “โครงการวิจัยการออกแบบพื้นผิวโลหะสำหรับยึดติดทางกายภาพกับยางธรรมชาติคอมโพสิตและเทอร์โมพลาสติกยางธรรมชาติเพื่อไม่ใช้ตัวประสาน” ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยยาง การยางแห่งประเทศไทย ประจำปีงบประมาณ 2567 ตามสัญญาเลขที่ 008/2567

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Pan, W., Sun, L., Mu, A., & Lv, W. (2023). Interface constitutive modeling and failure propagation mechanisms of integrated polymer–metal hybrid (PMH) structures. *Composite Structures*, 306, 116593.
- [2] Jespersen, K. M., Ota, H., Harada, K., Hosoi, A., & Kawada, H. (2020). Experimental measurement of mode-I fracture toughness of dissimilar material joints with thermal residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics*, 238, 107249.
- [3] Ji, C., Wang, B., Hu, J., Zhang, C., & Sun, Y. (2020). Effect of different preparation methods on mechanical behaviors of carbon fiber-reinforced PEEK–titanium hybrid laminates. *Polymer Testing*, 85, 106462.
- [4] Wannapa, N., & Uthaisangskuk, V. (2020). Experimental and numerical failure analyses of dissimilar material joints between aluminium and thermoplastic. *Composite Structures*, 252, 112762.
- [5] Tan, C., Su, J., Feng, Z., Liu, Y., Chen, B., & Song, X. (2021). Laser joining of CFRTP to titanium alloy via laser surface texturing. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34, 103–114.
- [6] Karpenko, M., Prentkovskis, O., & Skačkauskas, P. (2023). Comparison analysis between pneumatic and airless tires by computational modelling for avoiding road traffic accidents. In *Reliability and statistics in transportation and communication* (pp. 295–305). Springer International Publishing.
- [7] Vishal Rubber. (n.d.). Rubber to metal bonded parts. <https://www.vishalrubber.com/products/rubber-to-metal-bonded-parts/28>
- [8] Ormsuptave, N., & Uthaisangskuk, V. (2017). Modeling of bake-hardening effect for fine grain bainite-aided dual phase steel. *Materials & Design*, 118, 314–329.
- [9] Srithananan, P., Kaewtatip, P., & Uthaisangskuk, V. (2016). Micromechanics-based modeling of stress–strain and fracture behavior of heat-treated boron steels for hot stamping process. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 61–76.
- [10] O’Dwyer, D. J., O’Dowd, N. P., & McCarthy, C. T. (2013). Micromechanical investigation of damage processes at composite–adhesive interfaces. *Composites Science and Technology*, 86, 61–69.
- [11] Hirsch, F., & Kästner, M. (2017). Microscale simulation of adhesive and cohesive failure in rough interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 178, 416–432.
- [12] Hirsch, F., Natkowski, E., & Kästner, M. (2021). Modeling and simulation of interface failure in metal–composite hybrids. *Composites Science and Technology*, 214, 108965.
- [13] Teague, E. C., Scire, F. E., & Vorburger, T. V. (1982). Sinusoidal profile precision roughness specimens. *Wear*, 83, 61–73.
- [14] Vorburger, T. V., Gilsinn, D. E., Scire, F. E., McLay, M. J., Giaque, C. H. W., & Teague, E. C. (1986). Optical measurement of the roughness of sinusoidal surfaces. *Wear*, 109, 15–27.
- [15] Zhang, S., Xu, Y., & Zhang, W. (2023). Experimental and numerical study on the influence of cure process on the bridging traction mechanism of z-pins. *International Journal of Mechanical Sciences*, 245, 108096.

# การปรับปรุงประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำของเสื้อฟุตบอลภายใต้แบบจำลองอุปสงค์ช่วงปกติและช่วง ฤดูกาลด้วยการจำลองสถานการณ์แบบเหตุการณ์ไม่ต่อเนื่อง

## Optimization of Reorder Point Efficiency for Football Jerseys under Normal and Seasonal Demand Patterns Using Discrete Event Simulation

ธนิตศักดิ์ พุดทิพัฒน์โมษิต<sup>1\*</sup>, รอมพร ทองรัศมี โอนเนส<sup>1</sup> และ อัสริยากร สง่าอารีย์กุล<sup>2</sup>

Thnitsak Pudtipatkosit<sup>1\*</sup>, Roumporn Thongrassamee Aarnes<sup>1</sup> and Atsareeyaporn Sangaareegul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, คณะโลจิสติกส์และเทคโนโลยีการบิน,

มหาวิทยาลัยเซาท์อีสต์บางกอก, กรุงเทพมหานคร, 10260, ประเทศไทย

<sup>2</sup>สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน, คณะบริหารธุรกิจ,

มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, ปทุมธานี, 12120, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Bachelor of Logistics and Supply Chain Management, Faculty of Logistics and Aviation Technology,

Southeast Bangkok College, Bangkok, 10260, Thailand

<sup>2</sup>Bachelor of Logistics and Supply Chain Management, School of Business Administration,

Bangkok University, Pathum Thani, 12120, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: thanitsak.yong@gmail.com

รับบทความ (Received) : November 12, 2025 / ปรับแก้ไข (Revised) : December 18, 2025 / ตอรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

### บทคัดย่อ

การจัดการสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญสำหรับธุรกิจที่เผชิญความต้องการผันผวน โดยเฉพาะในช่วงฤดูกาลที่มีความต้องการสูง การศึกษานี้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำ (ROP) สำหรับร้านเสื้อฟุตบอลในปทุมธานี ซึ่งมีความต้องการสูงในเดือนแข่งขัน ร้านค้าปกติสั่งซื้อ 300 ตัวต่อเดือน แต่การเพิ่ม ROP ฤดูกาลเป็น 600 หน่วยยังไม่เพียงพอ ทำให้เกิดสินค้าขาดสต็อก สูญเสียยอดขาย และลูกค้าไม่พอใจ เพื่อแก้ไขปัญหา ใช้การจำลองด้วย FlexSim วิเคราะห์กลยุทธ์ ROP ต่าง ๆ ทั้งหมด 14 สถานการณ์ สถานการณ์ฐาน (C) ที่ ROP ปกติ 300 และ ROP ฤดูกาล 600 ให้ Releasing 79.39% และ Empty 20.61% การเพิ่ม ROP ฤดูกาลจาก 650–1000 หน่วยช่วยปรับปรุงความพร้อมของสินค้าคงคลังอย่างชัดเจน โดยสถานการณ์ที่ 8 (ROP 300/1000) ได้ Releasing 93.04% แต่ยังมี Last Stock 32 หน่วย การเพิ่ม ROP ปกติเพิ่มเติมพบว่า สถานการณ์ที่ 13 (ROP 550/1000) ได้ Releasing 100% และ Empty 0% แต่มีสินค้าคงเหลือ 72 หน่วย แนวทางที่ปรับแต่งใน สถานการณ์ที่ 14 (ROP 550/950) ให้ Releasing 99.87% มี Empty เพียง 0.13% และไม่มี Last Stock ทำให้เป็นกลยุทธ์ที่มี

ประสิทธิภาพสูงสุด ผลการศึกษาชี้ว่าการปรับค่า ROP ตามความผันผวนของความต้องการสามารถลดสินค้าขาดสต็อก ป้องกันการเก็บสินค้าส่วนเกิน และยกระดับความพึงพอใจของลูกค้า

**คำสำคัญ :** จุดสั่งซื้อซ้ำ การเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลัง ความต้องการตามฤดูกาล FlexSim การขายเสื้อฟุตบอล

## Abstract

Effective inventory management is critical for enterprises navigating volatile demand, particularly during peak seasonal cycles. This study investigates the optimization of the Reorder Point (ROP) for a football jersey retailer in Pathum Thani, which experiences significant demand surges during competition months. Under standard operations, the retailer utilizes a baseline ROP of 300 units; however, a seasonal adjustment to 600 units proved inadequate, resulting in frequent stockouts, lost sales revenue, and diminished customer satisfaction. To address these challenges, a FlexSim simulation was employed to evaluate the efficacy of 14 distinct ROP configurations. The baseline model (Scenario C), featuring a normal ROP of 300 and a seasonal ROP of 600, yielded a service level (fill rate) of 79.39% and a stockout rate of 20.61%. While incrementally raising the seasonal ROP to 1,000 units (Scenario 8) improved the service level to 93.04%, it also resulted in 32 units of residual stock. Further sensitivity analysis revealed that while Scenario 13 (ROP 550/1000) achieved a 100% service level, it produced an undesirable surplus of 72 units. Ultimately, Scenario 14 (ROP 550/950) emerged as the optimal strategy, achieving a 99.87% service level with a negligible 0.13% stockout rate and zero ending inventory. These findings demonstrate that dynamic ROP calibration effectively balances the trade-off between product availability and inventory holding costs.

**Keywords :** Reorder Point (ROP) Inventory Optimization Seasonal Demand Discrete Event Simulation (DES) Safety Stock Level Stockout

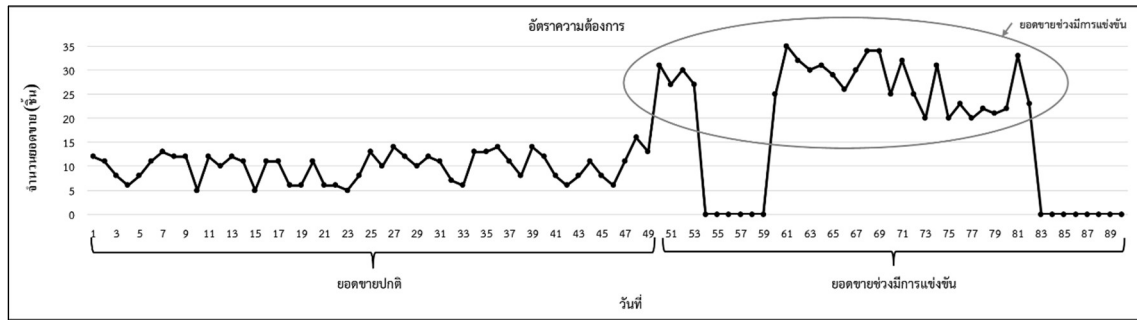
## บทนำ

การจัดการสินค้าคงคลังมีบทบาทสำคัญในการทำให้มั่นใจว่าสินค้ามีเพียงพอเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้า ในขณะที่ปริมาณสินค้าส่วนเกินให้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ธุรกิจมักเผชิญกับความท้าทายเมื่อความต้องการมีความผันผวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เกิดการเพิ่มขึ้นของความต้องการตามฤดูกาล การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของจุดสั่งซื้อซ้ำ (ROP) สำหรับร้านจำหน่ายเสื้อฟุตบอลในจังหวัดปทุมธานี ซึ่งมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเดือนของการแข่งขันฟุตบอล

ภายใต้สภาวะปกติ ร้านค้าจะเติมสต็อกในวันแรกของแต่ละเดือน โดยสั่งซื้อจำนวน 300 หน่วย ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการตามปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการแข่งขันฟุตบอลเกิดขึ้นภายในเดือน ความต้องการจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลให้สินค้าขาดสต็อก เพื่อรับมือกับสถานการณ์นี้ ร้านค้าได้พยายามเพิ่มการสั่งซื้อรายเดือนเป็น 600 หน่วยในช่วงเดือนที่มีการแข่งขัน แม้จะมีการปรับเพิ่มแล้ว แต่ความต้องการก็ยังคงเกินกว่าปริมาณสินค้าที่จัดหาได้ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียยอดขายและลูกค้าไม่พอใจ ดังแสดงในรูปที่ 1



งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาลที่มีต่อระดับสินค้าคงคลังและพัฒนาแนวทางการบริหารสินค้าคงคลังที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้โปรแกรม FlexSim โดยการประเมินนโยบายการสั่งซื้อซ้ำที่แตกต่าง การศึกษานี้มุ่งหาค่า ROP ที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถป้องกันการขาดสต็อกได้ในขณะที่ลดสินค้าคงเหลือให้น้อยที่สุด นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังนำเสนอแนวทางการใช้โปรแกรม FlexSim ในการตั้งค่าการควบคุมการปิดและเปิดพอร์ตเพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลองอีกด้วย



รูปที่ 1 ช่วงเวลาที่ความต้องการสินค้าหรือบริการเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงฤดูกาลหรือเหตุการณ์พิเศษ

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

1.1 เพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำ (Reorder Point: ROP) สำหรับร้านจำหน่ายเสื้อฟุตบอลในจังหวัดปทุมธานี โดยคำนึงถึงความผันผวนของความต้องการทั้งในช่วงปกติและช่วงฤดูกาลแข่งขัน

1.2 เพื่อพัฒนาและประเมินกลยุทธ์การบริหารสินค้าคงคลังด้วยการจำลองในโปรแกรม FlexSim เพื่อปรับปรุงความพร้อมของสินค้า ลดปัญหาสินค้าขาดสต็อก และลดสินค้าคงเหลือส่วนเกิน

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดการสินค้าคงคลังเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของการดำเนินงานในธุรกิจค้าปลีก เพื่อให้มั่นใจว่าสินค้ามีเพียงพอสำหรับตอบสนองความต้องการของลูกค้า ในขณะที่เดียวกันก็ลดปริมาณสินค้าส่วนเกินให้น้อยที่สุด กลยุทธ์การควบคุมสินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและความพึงพอใจของลูกค้า โดยเฉพาะในธุรกิจที่ประสบกับความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาล [1] แนวทางจุดสั่งซื้อซ้ำ (Reorder Point: ROP) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานบริหารสินค้าคงคลังเพื่อกำหนดเวลาที่เหมาะสมในการเติมสินค้าใหม่ ซึ่งช่วยป้องกันปัญหาสินค้าขาดสต็อกและลดสถานการณ์สินค้าล้นคลัง [2]

### 2.1 ความต้องการตามฤดูกาลและการเพิ่มประสิทธิภาพของจุดสั่งซื้อซ้ำ

ความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาลส่งผลกระทบต่อจัดการสินค้าคงคลัง เนื่องจากธุรกิจต้องปรับกลยุทธ์การเติมสินค้าเพื่อหลีกเลี่ยงการขาดแคลนหรือการมีสินค้าคงคลังส่วนเกิน การศึกษาหลายฉบับได้วิเคราะห์วิธีการที่กลยุทธ์ ROP ที่แตกต่างกันสามารถช่วยลดความเสี่ยงที่เกิดจากความผันผวน ตัวอย่างเช่น งานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการพยากรณ์ความต้องการ เช่น การวิเคราะห์อนุกรมเวลา (time-series analysis) และแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (machine learning models) สามารถช่วยปรับปรุงการวางแผนสินค้าคงคลังในช่วงฤดูกาลที่มีความต้องการสูงได้ [3]

งานวิจัยหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลังในธุรกิจแฟชั่นพบว่า การเพิ่มปริมาณการสั่งซื้อในช่วงที่มีความต้องการสูงสามารถลดการขาดสต็อกได้ แต่ต้องอาศัยการคาดการณ์ความต้องการที่แม่นยำเพื่อหลีกเลี่ยงต้นทุนการเก็บสินค้าคงคลังที่สูงเกินไป [4]

นอกจากนี้ งานวิจัยอื่น ๆ ยังได้สำรวจแนวทางในการปรับระดับสินค้าสำรองเพื่อความปลอดภัย (dynamic safety stock levels) ให้เหมาะสมกับฤดูกาล เพื่อลดความเสี่ยงจากการหยุดชะงักของห่วงโซ่อุปทาน [5] อีกทั้งงานวิจัยล่าสุดยังเสนอว่าการผสมผสานระหว่างแบบจำลองสินค้าคงคลังแบบดั้งเดิมกับแนวทางที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลสมัยใหม่ เช่น การวิเคราะห์เชิงคาดการณ์ (predictive analytics) และการเรียนรู้แบบเสริมกำลัง (reinforcement learning) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมสินค้าคงคลังในธุรกิจที่มีความผันผวนตามฤดูกาลสูงได้ [6-7]

## 2.2 การเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลังโดยใช้การจำลอง

เครื่องมือจำลอง เช่น FlexSim ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการสร้างแบบจำลองและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการจัดการสินค้าคงคลัง วิธีการที่ใช้การจำลองช่วยให้ธุรกิจสามารถประเมินนโยบายสินค้าคงคลังที่หลากหลายและกำหนดกลยุทธ์จุดสั่งซื้อที่มีประสิทธิภาพที่สุด งานวิจัยหลายฉบับได้แสดงให้เห็นว่า FlexSim สามารถจำลองระบบสินค้าคงคลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถปรับจุดสั่งซื้อ ประเมินระยะเวลาการจัดส่งของซัพพลายเออร์ และวิเคราะห์ความผันแปรของความต้องการได้ [8]

ในบริบทของธุรกิจค้าปลีกเสื้อผ้า แบบจำลองการจำลองถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมสินค้าคงคลังโดยการปรับปริมาณการสั่งซื้อแบบพลวัตตามการเปลี่ยนแปลงของความต้องการ ซึ่งนำไปสู่การปรับปรุงความพร้อมของสินค้าและลดต้นทุนการถือครองสินค้า [9] นอกจากนี้ งานวิจัยเพิ่มเติมยังชี้ให้เห็นว่าการผสมผสาน FlexSim เข้ากับปัญญาประดิษฐ์สามารถเพิ่มความสามารถในการคาดการณ์ ทำให้สามารถปรับสินค้าคงคลังได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของความต้องการแบบเรียลไทม์ [10-11]

## 2.3 การประยุกต์ใช้ FlexSim ในการควบคุมสินค้าคงคลัง

FlexSim เป็นแพลตฟอร์มที่มีความสามารถสูงในการจำลองสถานการณ์สินค้าคงคลังที่ซับซ้อน รวมถึงการเปิดและปิดพอร์ตของห่วงโซ่อุปทานเพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบจำลอง งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าการรวมการปรับเปลี่ยนนโยบายสินค้าคงคลังโดยอิงจากการจำลองสามารถทำให้การจัดการระดับสินค้าคงคลังมีความแม่นยำมากขึ้น ลดการสูญเสียยอดขาย และเพิ่มระดับการให้บริการ [12] นอกจากนี้ ความสามารถของแบบจำลองการจำลองในการทดสอบสถานการณ์ต่าง ๆ ยังช่วยให้ธุรกิจสามารถปรับแต่งกลยุทธ์สินค้าคงคลังได้โดยไม่ต้องเสี่ยงในสถานการณ์จริง [13]

งานวิจัยหลายฉบับยังได้เน้นถึงประสิทธิภาพของการผสมผสานแนวทางการจำลองกับแนวคิดสินค้าคงคลังแบบลีน (lean inventory practices) เพื่อช่วยลดของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพด้านต้นทุน [14] อย่างไรก็ตาม แม้งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการใช้ FlexSim อย่างกว้างขวางในด้านการจัดการคลังสินค้าและโลจิสติกส์ของห่วงโซ่อุปทาน แต่ยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้ในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมเสื้อผ้า [15]

## 2.4 ช่องว่างของงานวิจัย

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของสินค้าคงคลัง แต่ยังคงมีช่องว่างในด้านการประยุกต์ใช้กลยุทธ์การจำลองในเชิงปฏิบัติสำหรับธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็กที่ประสบกับความต้องการตามฤดูกาล งานวิจัยหลายชิ้นได้ศึกษาเรื่องการปรับค่า ROP และการวิเคราะห์เชิงคาดการณ์แล้ว แต่ยังมีจำนวนน้อยที่วิเคราะห์ว่า FlexSim สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของนโยบายสินค้าคงคลังได้อย่างไรในธุรกิจอย่างร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอล ซึ่งมีความต้องการที่เพิ่มขึ้นจากเหตุการณ์ภายนอก เช่น การแข่งขันกีฬา

นอกจากนี้ งานวิจัยก่อนหน้านี้นั้นส่วนใหญ่เน้นไปที่การดำเนินงานของธุรกิจค้าปลีกขนาดใหญ่หรืออุตสาหกรรมการผลิต โดยละเลยความท้าทายเฉพาะของผู้ค้าปลีกเสื้อผ้าขนาดเล็กในการจัดการความผันผวนของสินค้าคงคลังตามฤดูกาล ผลกระทบของกลไกควบคุมแบบไดนามิกที่ใช้การจำลอง เช่น การปรับจุดสั่งซื้อแบบอัตโนมัติและการตั้งค่าการเปิดพอร์ตในโปรแกรม FlexSim ยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างครอบคลุมในบริบทของธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก

การศึกษานี้มุ่งหวังที่จะเชื่อมช่องว่างดังกล่าวโดยการใช้โปรแกรม FlexSim เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกลยุทธ์ ROP สำหรับร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอลที่ประสบกับความต้องการตามฤดูกาล โดยการผสมผสานการควบคุมสินค้าคงคลังแบบใช้การจำลองเข้ากับข้อมูลความต้องการจริง งานวิจัยนี้จะให้ข้อมูลเชิงลึกในการปรับปรุงการจัดการสต็อก ลดการขาดสต็อก และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก

## วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และเพิ่มประสิทธิภาพของจุดสั่งซื้อซ้ำ (Reorder Point: ROP) สำหรับร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอลในจังหวัดปทุมธานี โดยพิจารณาทั้งความต้องการในช่วงปกติและช่วงฤดูกาลที่มีความผันผวน งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม FlexSim เพื่อจำลองพลวัตของสินค้าคงคลังและทดสอบกลยุทธ์ ROP ที่แตกต่างกัน เพื่อช่วยลดปัญหาสินค้าขาดสต็อกในขณะที่ลดปริมาณสินค้าคงเหลือให้เหลือน้อยที่สุด

### 1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลยอดขายในช่วงระยะเวลา 2 เดือน เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของความต้องการระหว่างช่วงปกติและช่วงฤดูกาล เดือนแรกและเดือนที่สองแทนช่วงความต้องการปกติ ซึ่งยอดขายเสื้อผ้าฟุตบอลเกิดขึ้นในอัตราที่คงที่ ในขณะที่เดือนที่สามเป็นช่วงความต้องการสูงเนื่องจากการแข่งขันฟุตบอล ข้อมูลที่เก็บรวบรวมประกอบด้วยจำนวนเสื้อที่ขายต่อวัน และเวลาระหว่างการขายแต่ละครั้ง (หน่วยเป็นนาที่ต่อชิ้นต่อวัน) ซึ่งแสดงถึงเวลาเฉลี่ยระหว่างการซื้อสองครั้งในแต่ละวันดังแสดงในสมการที่ (1) โดยเวลาระหว่างการมาถึง (Interarrival Time) ถูกคำนวณจากการนำจำนวนเวลาทั้งหมดในหนึ่งวัน (นาที่) หารด้วยจำนวนเสื้อที่ขายในวันนั้น ซึ่งช่วยให้เห็นความถี่ของการขายในแต่ละวัน

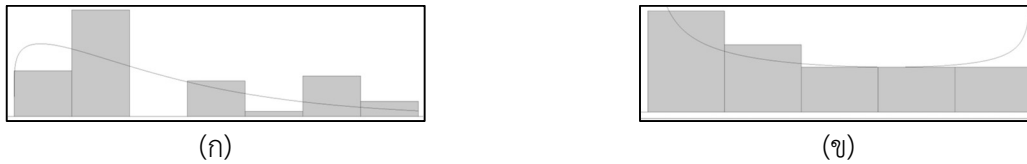
$$\text{เวลาระหว่างการมาถึง} = \frac{24 \text{ ชั่วโมง} \times 60 \text{ นาที}}{\text{จำนวนเสื้อที่ขายในวันนั้น}} \quad (1)$$

### 2. การวิเคราะห์การแจกแจงข้อมูลและการเลือกแบบจำลองการกระจาย

เพื่อจำลองรูปแบบความต้องการอย่างแม่นยำในโปรแกรม FlexSim ข้อมูลยอดขายในอดีตถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Input Analyzer เพื่อหาการแจกแจงความน่าจะเป็นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเวลาระหว่างการมาถึงทั้งในช่วงปกติและช่วงฤดูกาล สำหรับช่วงความต้องการปกติ การแจกแจงแบบ Weibull เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นสมการ  $90 + \text{WEIB}(74.5, 1.15)$  ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) โดยมีค่าเวลาฐานระหว่างการมาถึงเท่ากับ 90 นาที และส่วนที่เป็นการแจกแจงแบบ Weibull ใช้แสดงความผันผวนของการมาถึงของลูกค้า ซึ่งสะท้อนรูปแบบการกระจายที่เอียงไปทางขวา โดยมีช่วงเวลากการมาถึงที่ยาวขึ้นและบางครั้งมีช่องว่างสั้น ๆ

สำหรับช่วงความต้องการตามฤดูกาล พบว่าการแจกแจงแบบ Beta เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยแสดงได้เป็นสมการ  $41 + 31 \times \text{BETA}(0.571, 0.753)$  ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) โดยมีค่าเวลาฐานระหว่างการมาถึงเท่ากับ 41 นาที ซึ่งแสดงถึง

ความถี่ในการซื้อที่สูงขึ้นในช่วงเดือนการแข่งขัน การแจกแจงแบบ Beta สะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของความต้องการและช่วงเวลาการมาถึงที่สั้นลง ซึ่งสะท้อนถึงความเร่งรีบในการซื้อสินค้า



รูปที่ 2 การฟิตข้อมูล (ก) ยอดขายปกติ (ข) ยอดขายช่วงที่มีการแข่งขัน

### 3. การออกแบบแบบจำลอง

แบบจำลองถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม FlexSim โดยมีวัตถุทั้งหมด 5 ชิ้น ได้แก่ แหล่งกำเนิด (Source) 1 จุด, แถวรอ (Queue) 1 จุด, ตัวประมวลผล (Processor) 2 จุด (สำหรับความต้องการปกติและตามฤดูกาล) และจุดสิ้นสุด (Sink) 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3(ก)

หลังจากวิเคราะห์การแจกแจงของความต้องการแล้ว ได้ทำการออกแบบแบบจำลองการจำลองในโปรแกรม FlexSim เพื่อจำลองขั้นตอนการดำเนินงานของร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอล โดยรวมถึงการมาถึงของลูกค้า การติดตามสินค้าคงคลัง และกลยุทธ์การเติมสินค้าใหม่ โดยความต้องการปกติใช้การแจกแจงแบบ Weibull ( $90 + WEIB(74.5, 1.15)$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) ส่วนความต้องการตามฤดูกาลใช้การแจกแจงแบบ Beta ( $41 + 31 \times BETA(0.571, 0.753)$ ) เพื่อให้เกิดรูปแบบความต้องการที่สมจริง

นอกจากนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1 ได้มีการตั้งค่าทริกเกอร์ในพอร์ตความต้องการปกติและพอร์ตความต้องการตามฤดูกาล เพื่อเปิดหรือปิดการทำงานตามเวลาจำลอง สำหรับช่วงความต้องการปกติ ได้ตั้งค่า On Entry trigger เพื่อปิดการป้อนข้อมูลเข้าสู่พอร์ตความต้องการตามฤดูกาลเมื่อเวลาจำลอง  $\geq 7,603,200$  วินาที เพื่อให้แน่ใจว่าการมาถึงของลูกค้าจะอยู่ในช่วงความต้องการปกติ ในทางกลับกัน ได้ตั้งค่า On Exit trigger เพื่อเปิดพอร์ตความต้องการตามฤดูกาลเมื่อ  $4,233,600 \leq$  เวลาจำลอง  $\leq 7,603,200$  วินาที เพื่อเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงความต้องการตามฤดูกาลในช่วงเดือนการแข่งขัน

ในทำนองเดียวกัน พอร์ตความต้องการตามฤดูกาลถูกตั้งค่า On Entry trigger เพื่อปิดการป้อนข้อมูลไปยังพอร์ตความต้องการปกติเมื่อถูกเปิดใช้งาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทับซ้อนของความต้องการทั้งสองประเภท และเมื่อช่วงฤดูกาลสิ้นสุดลง ได้ตั้งค่า On Exit trigger เพื่อเปิดพอร์ตความต้องการปกติอีกครั้งเมื่อเวลาจำลอง  $\geq 4,233,600$  วินาที เพื่อกลับสู่รูปแบบความต้องการปกติ นอกจากนี้ ในตอนเริ่มต้นของการจำลอง ได้มีการตั้งค่า On Simulation Start trigger เพื่อปิดการป้อนข้อมูลไปยังพอร์ตที่ทำงานอยู่ในขณะนั้น เพื่อให้แน่ใจว่าความต้องการถูกควบคุมตั้งแต่เริ่มต้นการจำลอง



รูปที่ 3 (ก) การสร้างโมเดลการจำลองสถานการณ์ (ข) การตั้งค่าการระยะเวลาการเติมสินค้าใหม่

ตารางที่ 1 ความต้องการและเวลาระหว่างการมาถึงของลูกค้าในแต่ละวัน

ช่วงปกติ		ช่วงการแข่งขัน	
ความต้องการ (ชิ้น)	เวลาระหว่างการมาถึง (นาทีต่อชิ้น)	ความต้องการ (ชิ้น)	เวลาระหว่างการมาถึง (นาทีต่อชิ้น)
12	120.0000	31	46.4516
11	130.9091	27	53.3333
8	180.0000	30	48.0000
6	240.0000	27	53.3333
8	180.0000	25	57.6000
11	130.9091	35	41.1429
13	110.7692	32	45.0000
12	120.0000	30	48.0000
12	120.0000	31	46.4516
5	288.0000	29	49.6552
12	120.0000	26	55.3846
10	144.0000	30	48.0000
12	120.0000	34	42.3529
11	130.9091	34	42.3529
5	288.0000	25	57.6000
11	130.9091	32	45.0000
11	130.9091	25	57.6000
6	240.0000	20	72.0000
6	240.0000	31	46.4516
11	130.9091	20	72.0000
6	240.0000	23	62.6087
6	240.0000	20	72.0000
5	288.0000	22	65.4545
8	180.0000	21	68.5714
13	110.7692	22	65.4545
10	144.0000	33	43.6364
14	102.8571	23	62.6087
12	120.0000		
10	144.0000		
12	120.0000		
11	130.9091		
7	205.7143		
6	240.0000		
13	110.7692		
13	110.7692		
14	102.8571		
11	130.9091		
8	180.0000		
14	102.8571		
12	120.0000		
8	180.0000		
6	240.0000		

8	180.0000
11	130.9091
8	180.0000
6	240.0000
11	130.9091
16	90.0000
13	110.7692

#### 4. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการจำลอง ได้ทำการทดสอบแบบ t-test แบบจับคู่ (Paired t-test) เพื่อเปรียบเทียบค่าจำนวนสินค้าคงคลังจริงกับค่าจำลองในช่วงเวลา 13 สัปดาห์ สมมติฐานศูนย์ (Null Hypothesis) กำหนดว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าเฉลี่ย ในขณะที่สมมติฐานทางเลือก (Alternative Hypothesis) กำหนดว่ามีความแตกต่าง โดยใช้ระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) เท่ากับ 0.05 ค่า t ที่คำนวณได้ (-0.7944) อยู่ในช่วงค่าการยอมรับ (-2.179 ถึง 2.179) ส่งผลให้ยอมรับสมมติฐานศูนย์ตามตารางที่ 2 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองการจำลองสามารถแทนค่าจำนวนสินค้าจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบมูลค่าสินค้าคงคลังในแต่ละสัปดาห์

การทดลองที่	ค่าจริง	จำลอง	Diff	Hypothesis Testing
1	231	237	-6	$\bar{x}_d = -6.2308$ $SD_d = 28.2788$ $n_d = 13$
2	157	171	-14	
3	101	112	-11	
4	33	47	-14	
5	261	284	-23	$H_0: \mu - \bar{x}_d = 0$ $H_1: \mu - \bar{x}_d \neq 0$ df = 12 $\alpha = 0.05$ p-value = 2.179 t = -0.7944  $\therefore -2.179 \geq -0.7944 \leq 2.179$ (ยอมรับ $H_0$ )
6	188	221	-33	
7	115	159	-44	
8	0	0	0	
9	478	496	-18	
10	269	262	7	
11	98	23	75	
12	0	0	0	
13	0	0	0	

#### 5. สถานการณ์การจำลอง

เพื่อหาค่าจุดสั่งซื้อซ้ำ (ROP) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอล ได้ทำการทดสอบสถานการณ์การเติมสินค้าหลายรูปแบบในโปรแกรม FlexSim การจำลองนี้ประเมินผลกระทบของค่าการสั่งซื้อซ้ำที่แตกต่างกันต่อความพร้อมของสินค้าและการตอบสนองต่อคำสั่งซื้อ ทั้งในช่วงเดือนปกติ (ก่อนฤดูกลาง) และช่วงเดือนฤดูกลาง (ระหว่างการแข่งขัน) ซึ่งมีความต้องการเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก

สถานการณ์พื้นฐาน (Scenario C) แสดงถึงนโยบายสินค้าคงคลังปัจจุบันของร้าน โดยสั่งซื้อ 300 หน่วยในเดือนปกติและ 600 หน่วยในเดือนฤดูกลาง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของสินค้าคงคลังและลดการขาดสต็อก จึงได้จำลองสถานการณ์เพิ่มเติมโดย

เพิ่มค่า ROP ในช่วงฤดูกาลขึ้นที่ระดับ ขณะที่กำลังซื้อในช่วงเดือนปกติคือที่ 300 หน่วย อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า ROP ในช่วงฤดูกาลถึงขีดจำกัด (1000 หน่วย) การปรับปรุงเพิ่มเติมจะมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มค่า ROP ในช่วงเดือนปกติเพื่อชดเชยการขาดสินค้า และรับประกันการมีสินค้าพร้อมจำหน่ายอย่างต่อเนื่อง

## 6. ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกลยุทธ์การจัดการสินค้าคงคลังที่แตกต่างกัน ได้มีการติดตามตัวชี้วัดหลักในโปรแกรม FlexSim ตัวชี้วัดเหล่านี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญเกี่ยวกับความพร้อมของสินค้า รูปแบบการขาดสต็อก และประสิทธิภาพของกลยุทธ์จุดสั่งซื้อ (ROP) ในการป้องกันการขาดสต็อก โดยการติดตามตัวชี้วัดเหล่านี้ช่วยให้สามารถระบุแนวโน้มของสินค้าคงคลังได้ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสมดุลระหว่างอุปทานและอุปสงค์ พร้อมทั้งลดการสูญเสียยอดขายและสินค้าคงคลังส่วนเกิน ตัวชี้วัด Inventory Status จัดระดับสถานะสินค้าคงคลังออกเป็นสองประเภทหลัก คือ Releasing และ Empty สถานะ Releasing หมายถึงสินค้าที่กำลังถูกจ่ายออกไปกับลูกค้า แสดงถึงการตอบสนองคำสั่งซื้อได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนสถานะ Empty หมายถึงสินค้าหมดสต็อก ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้ การติดตามสถานะทั้งสองนี้ช่วยให้เข้าใจช่วงเวลาที่เกิดการขาดสต็อกและสาเหตุ เพื่อปรับปรุงเวลาการเติมสินค้าให้เหมาะสม

อีกตัวชี้วัดที่สำคัญคือ Last Stock ซึ่งแสดงถึงระดับสินค้าคงเหลือสุดท้ายก่อนการสั่งสินค้าใหม่ ตัวชี้วัดนี้มีความสำคัญต่อการระบุว่าจะระบบเข้าใกล้จุดสินค้าหมดสต็อกมากเพียงใด และระดับสินค้าสำรองมีความเพียงพอหรือไม่ โดยการวิเคราะห์แนวโน้มของ Last Stock สามารถนำไปสู่การปรับนโยบายสินค้าคงคลังให้เหมาะสมยิ่งขึ้น เพื่อให้ระดับสินค้าเพียงพอต่อความต้องการโดยไม่ก่อให้เกิดต้นทุนการเก็บสินค้าที่เกินจำเป็น

## 7. การเพิ่มประสิทธิภาพและการตัดสินใจ

กระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพในโปรแกรม FlexSim มุ่งเน้นไปที่การระบุกลยุทธ์การจัดการสินค้าคงคลังที่ให้ค่าการจ่ายสินค้า (Releasing) สูงที่สุด ค่าไม่มีสินค้า (Empty) ต่ำที่สุด และค่า Last Stock ต่ำที่สุด โดยการปรับค่าจุดสั่งซื้อ (ROP) และปริมาณการสั่งซื้อ ได้ทำการทดสอบสถานการณ์ที่หลากหลายเพื่อหาวิธีการขาดสต็อกในขณะที่ใช้สินค้าคงคลังอย่างมีประสิทธิภาพ เป้าหมายคือการรักษาการไหลของสินค้าคงคลังอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการได้โดยไม่ก่อให้เกิดต้นทุนการเก็บสินค้าส่วนเกิน

## ผลการวิจัย

ผลลัพธ์จากการจำลองให้การวิเคราะห์เปรียบเทียบของกลยุทธ์จุดสั่งซื้อ (Reorder Point: ROP) ที่แตกต่างกันภายใต้เงื่อนไขความต้องการปกติและตามฤดูกาล ตารางที่ 3 สรุปผลลัพธ์จากหลายสถานการณ์ โดยเน้นตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลัก ได้แก่ Releasing (ร้อยละของความต้องการที่ตอบสนองได้), Empty (ร้อยละของเหตุการณ์สินค้าหมดสต็อก), และ Last Stock (สินค้าคงเหลือในเวลาสั่งซื้อใหม่)

ตารางที่ 3 สถานะสินค้าคงคลังและสินค้าคงเหลือสุดท้ายของแต่ละสถานการณ์

สถานการณ์ที่	ปริมาณการสั่งซื้อ ROP		ค่าในคลังสินค้า		ยอดคลังสุทธิ
	ช่วงปกติ	ช่วงการ แข่งขัน	สถานะมีของ	สถานะว่าง	
C	300	600	79.39	20.61	0
1	300	650	81.07	18.93	0
2	300	700	82.77	17.23	0
3	300	750	84.48	15.52	0
4	300	800	86.02	13.98	0
5	300	850	87.64	12.36	0
6	300	900	89.24	10.76	0
7	300	950	90.84	9.16	0
8	300	1000	93.04	6.96	32
9	350	1000	94.58	5.42	36
10	400	1000	96.21	3.79	36
11	450	1000	97.8	2.2	37
12	500	1000	99.38	0.62	37
13	550	1000	100	0	72
14	550	950	99.87	0.13	0

### 1. ผลกระทบของการเพิ่มค่า Seasonal ROP

ในสถานการณ์พื้นฐาน (Scenario C) ที่ตั้งค่า ROP เป็น 300 หน่วยสำหรับความต้องการปกติ และ 600 หน่วยสำหรับความต้องการตามฤดูกาล อัตรา Releasing อยู่ที่ 79.39% ขณะที่เหตุการณ์ Empty อยู่ที่ 20.61% แสดงให้เห็นปัญหาการขาดสต็อกอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่า Seasonal ROP ถูกเพิ่มขึ้นทีละขั้นตั้งแต่ 650 ถึง 1000 หน่วย (Scenarios 1–8) ร้อยละของ Releasing เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเหตุการณ์ Empty ลดลง ตัวอย่างเช่น ที่ 850 หน่วย (Scenario 5) ค่า Releasing เพิ่มขึ้นเป็น 87.64% และ Empty ลดลงเหลือ 12.36% เมื่อค่า Seasonal ROP ถึง 1000 หน่วย (Scenario 8) อัตรา Releasing สูงสุดที่ 93.04% แต่มี Last Stock 32 หน่วยเกิดขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงของสินค้าคงคลังเกิน

### 2. ผลของการเพิ่มค่า Normal ROP

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสินค้าคงคลังต่อไป ค่า Normal ROP ถูกเพิ่มเกินกว่า 300 หน่วย ในขณะที่คงค่า Seasonal ROP ที่ 1000 หน่วย (Scenarios 9–13) การเพิ่มค่า Normal ROP เป็น 350 หน่วย (Scenario 9) ส่งผลให้อัตรา Releasing อยู่ที่ 94.58% ในขณะที่เหตุการณ์ Empty ลดลงเหลือ 5.42% การเพิ่มค่า Normal ROP ต่อไปเป็น 450 และ 500 หน่วย



(Scenarios 11–12) ส่งผลให้เกิดการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า Releasing เพิ่มขึ้นเป็น 99.38% และเหตุการณ์ Empty ลดลงเหลือ 0.62%

### 3. กลยุทธ์ ROP ที่เหมาะสมที่สุด

สถานการณ์ที่ให้ผลดีที่สุด (Scenario 13) ซึ่งค่า Normal ROP เป็น 550 หน่วย และค่า Seasonal ROP เป็น 1000 หน่วย สามารถทำค่า Releasing ได้ 100% โดยไม่มีเหตุการณ์ Empty เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม พบ Last Stock 72 หน่วย แสดงถึงสินค้าคงคลังเกิน เพื่อสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพของสินค้าคงคลังกับอัตราการตอบสนองที่สูง Scenario 14 (Normal ROP: 550, Seasonal ROP: 950) เป็นทางเลือกที่ดี โดยได้ค่า Releasing 99.87%, มี Empty เพียง 0.13% และไม่มีสินค้าคงคลังเกิน สถานการณ์นี้ช่วยลดการขาดสต็อกและป้องกันการสะสมสินค้าคงคลังเกิน ทำให้เป็นนโยบายสินค้าคงคลังที่เหมาะสมที่สุด

### อภิปรายผล

ผลการศึกษานี้ยืนยันความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำ (Reorder Point: ROP) ในการจัดการความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีอยู่เกี่ยวกับการควบคุมสินค้าคงคลัง งานวิจัยก่อนหน้านี้นั้นเน้นว่าการเพิ่มปริมาณการสั่งซื้อในช่วงที่ความต้องการสูงสุดสามารถลดการขาดสต็อกได้ แต่ต้องมีการพยากรณ์ความต้องการที่แม่นยำเพื่อหลีกเลี่ยงการเก็บสินค้าคงคลังเกิน [4] งานวิจัยนี้สนับสนุนข้อกล่าวดังกล่าว โดยแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า Seasonal ROP จาก 600 เป็น 1000 หน่วย สามารถปรับปรุงการตอบสนองความต้องการได้อย่างมีนัยสำคัญ ลดเหตุการณ์ขาดสต็อกจาก 20.61% (Scenario C) เป็น 6.96% (Scenario 8) อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตใน Scenario 8 พบว่าสินค้าคงคลังเกิน 32 หน่วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ROP ช่วยปรับปรุงความพร้อมของสต็อก แต่ยังคงมีปัญหการสะสมสินค้าคงคลังเกินอยู่

การจัดการสินค้าคงคลังโดยอาศัยการจำลอง โดยเฉพาะผ่าน FlexSim ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการเพิ่มประสิทธิภาพของสินค้าคงคลังโดยการปรับค่า ROP ตามความผันผวนของความต้องการแบบเรียลไทม์ [8] ผลการจำลองของการศึกษานี้ยืนยันแนวทางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า ROP ทั้งปกติและตามฤดูกาลช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของสินค้าคงคลังได้มากขึ้น ตัวอย่างเช่น Scenario 13 (ROP 550/1000) สามารถทำค่า Releasing ได้ 100% โดยไม่มีเหตุการณ์ Empty เกิดขึ้น ซึ่งยืนยันผลการศึกษาก่อนหน้าที่ว่าเครื่องมือการจำลองสามารถลดการขาดสต็อกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] อย่างไรก็ตาม ข้อเสียคือมีสินค้าคงคลังเกิน 72 หน่วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ระบุว่าค่า ROP สูงจำเป็นต้องมีการปรับสมดุลอย่างรอบคอบเพื่อหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายในการเก็บสินค้าคงคลังที่ไม่จำเป็น [4]

ช่องว่างทางงานวิจัยที่สำคัญที่พบในงานวิจัยก่อนหน้าคือการขาดการประยุกต์ใช้ FlexSim ในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก โดยเฉพาะในธุรกิจที่มีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเหตุการณ์ภายนอก เช่น การแข่งขันกีฬา [15] งานวิจัยนี้ตอบโจทย์ช่องว่างดังกล่าวโดยแสดงให้เห็นว่า Scenario 14 (ROP 550/950) ให้โซลูชันสินค้าคงคลังที่สมดุลมากขึ้น โดยรักษา Releasing ไว้ที่ 99.87%, มี Empty เพียง 0.13% และไม่มีสินค้าคงคลังเกิน สถานการณ์ที่เหมาะสมนี้เน้นประโยชน์ของการปรับสินค้าคงคลังโดยใช้การจำลองแบบไดนามิก สนับสนุนงานวิจัยล่าสุดที่แนะนำการใช้ AI-enhanced predictive analytics เพื่อปรับปรุงกลยุทธ์สินค้าคงคลังในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก [10-11]

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้เน้นย้ำความสำคัญของการเพิ่มประสิทธิภาพจุดสั่งซื้อซ้ำ (Reorder Points: ROP) เพื่อจัดการกับความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาลในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก โดยเฉพาะร้านขายเสื้อผ้าฟุตบอลที่มีความต้องการเพิ่มสูงในช่วงเดือนการแข่งขัน โดยใช้การจำลอง FlexSim สถานการณ์สินค้าคงคลังต่าง ๆ ถูกทดสอบเพื่อหากลยุทธ์ ROP ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดซึ่ง

สามารถสร้างสมดุลระหว่างการตอบสนองความต้องการและประสิทธิภาพของสินค้าคงคลัง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มค่า Seasonal ROP ช่วยปรับปรุงเปอร์เซ็นต์ Releasing อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมทั้งลดเหตุการณ์ขาดสต็อก (Empty) อย่างไรก็ดีตาม ค่า ROP ที่สูงเกินไปทำให้เกิดการสะสมสินค้าคงคลัง (Last Stock) ซึ่งย้ำถึงความจำเป็นของการใช้แนวทางที่สมดุล

ผลการศึกษายืนยันว่า Scenario 14 (ROP 550/950) ให้กลยุทธ์สินค้าคงคลังที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถทำค่า Releasing ได้ 99.87%, มี Empty เพียง 0.13% และไม่มีสินค้าคงคลังเกิน ทำให้เป็นแนวทางที่ดีที่สุดในการลดทั้งการขาดสต็อก และการเก็บสต็อกเกิน ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่เน้นความสำคัญของการปรับสินค้าคงคลังโดยใช้ข้อมูลและการตัดสินใจโดยอาศัยการจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระดับสต็อก

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังช่วยเติมเต็มช่องว่างงานวิจัยสำคัญโดยการประยุกต์ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลังโดยใช้ การจำลองในธุรกิจค้าปลีกขนาดเล็ก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีถูกละเลยในงานวิจัยก่อนหน้า การรวมกลไกควบคุมอัตโนมัติใน FlexSim เช่น การตั้งค่าเปิด-ปิดพอร์ต เพิ่มความแม่นยำของโมเดล ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีคุณค่าสำหรับการจัดการสินค้าคงคลังแบบไดนามิก งานวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพสินค้าคงคลังโดยการรวมการพยากรณ์ความต้องการด้วย AI ซึ่ง ช่วยให้ทำนายความผันผวนตามฤดูกาลได้แม่นยำยิ่งขึ้นและปรับปรุงกลยุทธ์ ROP การขยายการศึกษาสู่การจัดการสินค้าคงคลัง หลายผลิตภัณฑ์จะให้ข้อมูลเชิงลึกมากขึ้นเกี่ยวกับการจัดการความต้องการที่หลากหลาย ขณะเดียวกัน การรวมเวลานำสินค้าที่ เปลี่ยนแปลงได้ของผู้จัดจำหน่ายในโมเดลจำลองสามารถเพิ่มความเหมาะสมต่อสถานการณ์จริงและความยืดหยุ่นของห่วงโซ่ อุปทาน นอกจากนี้ การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์จะช่วยให้ธุรกิจสร้างสมดุลระหว่างประสิทธิภาพทางการเงินและประสิทธิภาพ ของสินค้าคงคลัง สุดท้าย การทดสอบการควบคุมสินค้าคงคลังโดยใช้การจำลองในภาคค้าปลีกอื่น ๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ ของชำ หรือเภสัชภัณฑ์ สามารถยืนยันประสิทธิภาพของ FlexSim ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และพัฒนากลยุทธ์การจัดการสินค้าคงคลังให้ ครอบคลุมการประยุกต์ใช้ในวงกว้างยิ่งขึ้น

## ข้อเสนอแนะ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารสินค้าคงคลังในอนาคต งานวิจัยแนะนำให้พิจารณาการบูรณาการการพยากรณ์ความต้องการด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อทำนายความผันผวนของความต้องการตามฤดูกาลได้แม่นยำยิ่งขึ้น รวมถึงการ ขยายการศึกษาไปยังสินค้าหลายรายการ (multi-product inventory) เพื่อให้สามารถจัดการกับรูปแบบความต้องการที่ หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การรวมเวลาการส่งมอบจากผู้จัดจำหน่ายที่มีความผันผวนเข้าในแบบจำลองการ จำลองจะช่วยเพิ่มความสมจริงและความยืดหยุ่นของระบบ ในระยะยาว การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนร่วมกับการปรับปรุง ประสิทธิภาพสินค้าคงคลังจะช่วยให้ธุรกิจสามารถตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ที่เหมาะสม และการทดสอบระบบในธุรกิจค้าปลีกประเภท อื่น เช่น อิเล็กทรอนิกส์ หรืออาหาร จะช่วยยืนยันความสามารถในการปรับใช้ FlexSim ในหลากหลายอุตสาหกรรม ทำให้ได้แนว ทางการบริหารสินค้าคงคลังที่มีประสิทธิภาพและสามารถปรับใช้ได้กว้างขวางยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Adams, M., & Wilson, C. (2023). Lean inventory practices enhanced by simulation-based decision support systems. *Journal of Supply Chain Management Research*, 30(3), 178–192.
- [2] Chen, L. (2023). FlexSim applications in apparel retail inventory management. *Computational Logistics Review*, 7(4), 132–145.
- [3] Davis, J. (2022). Reducing inventory waste with simulation-based strategies. *Journal of Industrial Management*, 21(3), 98–112.
- [4] Johnson, M. (2021). Reorder point strategies for seasonal demand. *Journal of Supply Chain Optimization*, 29(4), 278–290.
- [5] Kim, A., & Thompson, R. (2022). Integrating AI with FlexSim for predictive inventory management. *Journal of Artificial Intelligence in Business*, 14(2), 76–92.

- [6] Kumar, R., & Singh, B. (2022). Using simulation for supply chain optimization. *Industrial Engineering Journal*, 25(1), 66–80.
- [7] Lee, K. (2020). Forecasting methods for seasonal demand in inventory management. *Journal of Business Analytics*, 10(1), 55–70.
- [8] Lopez, T., & Green, E. (2023). FlexSim in small-scale retail: A case study. *Retail Operations and Logistics Journal*, 8(4), 135–150.
- [9] Martin, H., & Rogers, G. (2021). Scenario analysis in inventory management using FlexSim. *Journal of Operational Research*, 12(2), 49–65.
- [10] Patel, S., & Gupta, N. (2023). Dynamic safety stock management for seasonal demand variability. *Operations Research Letters*, 23(4), 89–101.
- [11] Roberts, A. (2023). Predictive analytics for retail inventory management. *Decision Support Systems Journal*, 19(2), 210–225.
- [12] Smith, J., & Brown, A. (2022). Inventory control and demand management in retail businesses. *International Journal of Logistics Management*, 34(2), 145–160.
- [13] Thompson, B. (2022). Reinforcement learning for adaptive inventory control. *Journal of Artificial Intelligence Applications in Business*, 14(2), 45–62.
- [14] Williams, P., & Carter, T. (2021). Managing apparel inventory: Challenges and solutions. *Fashion Retail Journal*, 15(3), 112–125.
- [15] Zhao, D. (2022). Simulation-based optimization of reorder policies in retail inventory management. *Journal of Simulation and Modelling*, 19(2), 88–104.

## การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น The Development of Training Programmable Logic Controller Control Ac Servo Motor and Vision System

ยันต์ศรี สมสีท่า<sup>1</sup>, ทรงศักดิ์ นิลทิณ<sup>1</sup> ชัยพล จันทรประดิษฐ์<sup>1</sup>, ศิริวรรณ พลเศษ<sup>1\*</sup>, กิตติศักดิ์ วาดสันทัด<sup>1</sup>, ชุมพล ปทุมมาเกษร<sup>1</sup>,  
ปรัชญ์ ใจกว้าง<sup>1</sup>, ธีรนนท์ ไชยคุณ<sup>1</sup> และ ชัยชโย ช่อตรง<sup>1</sup>

Yansri Somsrithum<sup>1</sup>, Songsak Ninthithin<sup>1</sup>, Chaipol Junpradit<sup>1</sup>, Siriwan Polset<sup>1\*</sup>, Kititsak Wadsuntud<sup>1</sup>,  
Chumpon Patummakason<sup>1</sup>, Prach Jaikwang<sup>1</sup>, Theeranon Chaiyakun<sup>1</sup> and Chaichayo Suetrong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และยานยนต์ไฟฟ้า, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,  
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Mechatronics and Electric Vehicle Engineering Department, Faculty of Industrial Technology,  
Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: siriwan@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : November 13, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 22, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น เพื่อยกระดับทักษะการบูรณาการควบคุมการเคลื่อนที่กับการรับรู้ภาพในบริบทอุตสาหกรรมยุค 4.0 โดยตั้งเป้าหมายการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้ที่ผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมเซอร์โวและเรียกใช้วิชั่นเพื่อตัดสินใจคัดแยกชิ้นงานได้จริง วิธีดำเนินการประกอบด้วย (1) ออกแบบสถาปัตยกรรมและลำดับขั้นทำงาน (step diagram) พร้อมผังสายไฟและ I/O mapping (2) พัฒนาโปรแกรมควบคุมด้วย GX Works2 (ladder diagram) เชื่อมกับโปรแกรมภาษา Python บน Raspberry Pi สำหรับการประมวลผลภาพจากเว็บแคม และส่งผลจำแนกรูปทรงวงกลมและสี่เหลี่ยมเพื่อสั่งการเซอร์โวและชุดนิวแมติกส์ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (3) ทดสอบการทำงานทริกเกอร์กล้อง การแลกเปลี่ยนสัญญาณ และวงจรความปลอดภัย โดยมีการประเมินความเหมาะสมเชิงการใช้งานด้วยแบบประเมินมาตรฐาน 5 ระดับ ครอบคลุม 4 มิติ ได้แก่ การติดตั้งอุปกรณ์ การออกแบบระบบควบคุม ความเหมาะสมต่อการฝึกปฏิบัติ และความเหมาะสมต่อการใช้งาน ผลการทดลองพบว่าคะแนนเฉลี่ย 4.14 ระดับดีมาก จุดที่โดดเด่นคือการติดตั้งอุปกรณ์และความมั่นคงแข็งแรง โดยที่ความสะดวกในการใช้งาน ยังอยู่ในระดับปานกลางคือเฉลี่ย 3.35 และจึงถูกระบุเป็นข้อปรับปรุงเพิ่มเติม สรุปได้ว่าชุดฝึกที่พัฒนามีประสิทธิภาพและความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสื่อการสอนด้านพีแอลซี เซอร์โวมอเตอร์ และแมชชีนวิชั่นช่วยให้ผู้เรียนเชื่อมโยงทฤษฎีกับการปฏิบัติได้จริง และพร้อมต่อยอดสู่การเพิ่มความสะดวกใช้งาน การเชื่อมต่อเครือข่ายอุตสาหกรรมและการประเมินสมรรถนะเชิงปริมาณเพิ่มเติมในงานอนาคต

**คำสำคัญ :** โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์, เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, ระบบวิชั่น, การควบคุมการเคลื่อนที่, ชุดฝึกปฏิบัติการ

## Abstract

This paper presents the design and development of a Programmable Logic Controller (PLC) training kit for AC-servo motion control integrated with a machine-vision subsystem. The kit is designed to enhance learners' ability to integrate high-precision motion control with visual perception for Industry 4.0 applications. The primary objective is to provide a hands-on instructional instrument that allows users to develop PLC programs for commanding servo axes and executing vision-based decisions for real-time automated sorting. The methodology followed a three-phase approach: (1) Architectural design and sequence specification, including comprehensive wiring diagrams and I/O mapping; (2) System implementation, utilizing ladder logic within GX Works2 interfaced with a Python-based Raspberry Pi application for image processing (shape classification of circles and squares) to drive servo and pneumatic actuators; and (3) System verification, encompassing camera triggering, signal handshaking, and safety circuit validation. A usability evaluation was conducted using a five-point Likert scale across four dimensions: hardware installation, control-system design, laboratory suitability, and practical applicability. Results yielded an overall mean score of 4.14 (Very Good). While hardware installation and structural robustness were identified as primary strengths, ease of use received a moderate score (mean 3.35), highlighting an area for iterative improvement. Ultimately, the training kit serves as an effective instructional aid for PLC, AC-servo, and machine-vision integration, successfully bridging the gap between theoretical concepts and industrial practice. Future work will focus on enhancing user interface (UI) accessibility, SCADA connectivity, and expanded quantitative performance metrics.

**Keywords :** PLC, AC-Servo, Machine Vision, Motion Control, Training Kit

## บทนำ

ในยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 ประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในภาคการผลิตและอุตสาหกรรม โดยเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการทดแทนแรงงานมนุษย์ในกระบวนการผลิตต่างๆ การนำระบบอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ไม่เพียงแต่ช่วยลดต้นทุนการจ้างแรงงานและต้นทุนการผลิตเท่านั้น แต่ยังสามารถลดอัตราการสูญเสียของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากข้อผิดพลาดของมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมทางเทคโนโลยียังได้รับการส่งเสริมให้เติบโตเป็นวิสาหกิจเริ่มต้นทางเทคโนโลยี (Tech Startup) ซึ่งถือเป็นรากฐานสำคัญของเศรษฐกิจใหม่ที่ขับเคลื่อนประเทศในอนาคต อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าเทคโนโลยีหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติที่มีมูลค่าสูงจากต่างประเทศเป็นหลัก ทำให้เกิดความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างความเข้มแข็งและความพร้อมในการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวภายในประเทศ [1]

ระบบอัตโนมัติในบริบทของอุตสาหกรรมสมัยใหม่หมายถึงเครื่องจักรกลและอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้สามารถปฏิบัติงานแทนมนุษย์ในภารกิจต่างๆ [2] ที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง โดยระบบเหล่านี้มีความสามารถในการทำงานด้วยคำสั่งที่กำหนดไว้ล่วงหน้าแบบซ้ำๆ พร้อมทั้งยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานตามความต้องการ เครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติมีความสามารถในการเคลื่อนไหว การตัดสินใจ และการตอบสนองต่อข้อมูลหรือสัญญาณจากสภาพแวดล้อม โดยสามารถปรับเปลี่ยนโปรแกรมการทำงานเพื่อให้สามารถปฏิบัติหน้าที่ได้หลากหลายตามลำดับขั้นตอนที่ได้รับการตั้งโปรแกรมไว้ ระบบเหล่านี้จึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม [3]

การศึกษาและการถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเตรียมบุคลากรให้มีความพร้อมสำหรับการปฏิวัติอุตสาหกรรม การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซี (Programmable Logic Controller) ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น (Machine Vision) [4][5]จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพสูงในการสร้างเครื่องมือการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาและทำความเข้าใจการเขียนโปรแกรมระบบควบคุมอัตโนมัติ ชุดฝึกนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ผู้เรียนได้ฝึกฝนทักษะในการเขียนโปรแกรม Programmable Logic Controller เพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์เท่านั้น[6] แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้ระบบวิชั่นในการตรวจสอบและจำแนกลักษณะของวัตถุได้อีกด้วย การพัฒนาเครื่องมือการเรียนรู้ดังกล่าวจะช่วยให้ผู้เรียนได้รับประสบการณ์จริงและเข้าใจหลักการทำงานของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ซึ่งจะเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาศักยภาพและความสามารถของบุคลากรทางเทคนิคให้สอดคล้องกับความต้องการของอุตสาหกรรมในอนาคต

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อพัฒนาการใช้ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับและระบบวิชั่น
- 1.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับและระบบวิชั่น

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุเมธ เฉลิมพันธ์ (2560) [7] การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดฝึกระบบนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล (PLC) การวิจัยนี้กล่าวถึงการวิจัยเชิงทดลอง(Experimental Research) ประเภท One-Group Pretest-Posttest Design มีวัตถุประสงค์ของการวิจัย เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพชุดฝึกระบบนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล (PLC) และเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน จากค่าคะแนนเฉลี่ยระหว่างการทำแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน โดยสมมติฐานของการวิจัย คือ ชุดฝึกระบบนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล (PLC) ที่ผู้วิจัยได้จัดสร้างขึ้น สามารถนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอนใน วิชานิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์

ศุภเชษฐ์ไชยวุฒิ (2557) [8] การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบโดยใช้ระบบวิชั่น การวิจัยนี้กล่าวถึง การลดการใช้แรงงานคนและทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงานของแผนกตรวจสอบคุณภาพของแผ่นซิปสเตอร์ในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นการคัดแยกกระหว่างงานดีกับงานเสียและยังใช้แรงงานคนในการตรวจสอบคุณภาพดังกล่าวอยู่ทางแผนกจึงได้นำเสนอที่จะนำเทคโนโลยีระบบวิชั่นเข้ามาใช้เพื่อทำการตรวจสอบและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบแผ่นซิปสเตอร์ให้ได้จำนวนงานที่เพิ่มขึ้นและได้งานที่มีคุณภาพนอกจากนี้ยังนำเอากระบวนการประมวลผลภาพมาใช้โดยนำเอารูปภาพมาทำการวิเคราะห์รวมถึงใช้โปรแกรมในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของระบบวิชั่นผลการศึกษพบว่าหลังจากนำระบบวิชั่นเข้ามาใช้

ธนิศร์ พันธุ์ประยูร (2563) [9] การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ด้วย Programmable Logic Controller การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ด้วย Programmable Logic Controller วิชาระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม ตามหลักสูตร ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2557 ของสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา ผู้วิจัยได้ออกแบบ และสร้างชุดทดลองให้ตรงตามหลักสูตร จำนวน 9 ใบงาน การทดลองครอบคลุมเนื้อหาการเรียน จำนวน 6 หัวข้อ เรื่อง ประกอบด้วย การสตาร์ทมอเตอร์โดยตรง การกลับทางหมุนของมอเตอร์ การควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน เรียงกันตามลำดับ การสตาร์ทมอเตอร์แบบสตาร์ท-เดลต้า การควบคุมมอเตอร์สองความเร็ว และการประยุกต์ใช้ เซนเซอร์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ นักศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ชั้นปีที่ 2 แผนกช่างไฟฟ้า วิทยาลัยการอาชีพเขียงราย ปีการศึกษา 2560 ที่ลงทะเบียนเรียนวิชา

ระบบควบคุมในงาน อุตสาหกรรม ทำการศึกษาและทดลองโดยใช้ชุดทดลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่าชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ด้วย Programmable Logic Controller ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพ 82.4/85.89 ซึ่งเป็นไปตาม เกณฑ์ที่ตั้งไว้

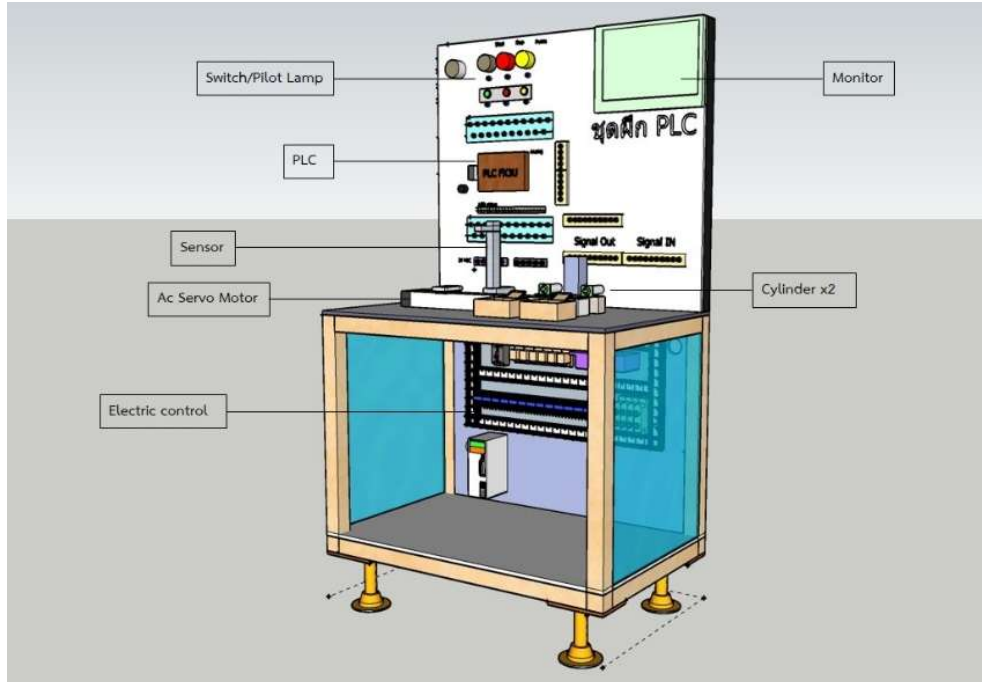
วิโรจน์ บัวงาม และกำพล พูลผล (2558) [10] ตู้เก็บของอัตโนมัติโดยใช้ระบบนิวแมติกส์งานวิจัยนี้แนะนำเสนอการควบคุมการทำงานของระบบจัดเก็บอุปกรณ์เข้าตู้เก็บของโดยระบบอัตโนมัติซึ่งเป็น การจำลองรูปแบบการทำงานของระบบจัดเก็บอุปกรณ์อัตโนมัติที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการศึกษาและออกแบบ ควบคุมการทำงานของระบบจัดเก็บอุปกรณ์เข้าตู้เก็บของโดยระบบอัตโนมัติประกอบไปด้วย ระบบควบคุมตำแหน่งของ บอลสกรูด้วยเซอร์โวมอเตอร์โดยมีแกนตั้งและแกนนอน และระบบนิวแมติกส์โดยมีลูกสูบหมุนกระบอกลูกสูบสองทางและกระบอกลูกสูบแบบหนีบ ในการควบคุมการจัดเก็บอุปกรณ์มีการเขียนโปรแกรมพีแอลซีเพื่อควบคุมการทำงานให้สามารถควบคุม การทำงานได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบสั่งงานด้วยมือ นอกจากนั้นยังสามารถแสดงผลและควบคุมการทำงานได้ด้วยระบบจอสัมผัส

## วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์หาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในการตรวจสอบโดยใช้ระบบวิชั่นเพื่อทำการตรวจสอบจำแนกชนิดวัตถุด้วยการนำระบบวิชั่นมาใช้งาน และลำเรียงวัตถุไปตามตำแหน่งที่โปรแกรมไว้ โดยจะอธิบายถึงรายละเอียดและขั้นตอนในการศึกษารวมถึง ในกระบวนการทำงานของชุดฝึกกำหนดขั้นตอนในการดำเนินงานดังนี้

### 1. ขั้นตอนการการพัฒนาชุดฝึกการเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ออกแบบกระบวนการทำงานของต้นแบบชุดฝึกโดยครอบคลุมหัวข้อการฝึกได้แก่ ฝึกเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) โปรแกรมพื้นฐาน โปรแกรมประยุกต์ ฝึกต่ออินพุต/เอาต์พุต(Input/Output) โปรแกรมภาษา Python ควบคุมการทำงานของระบบแมคซีวิชั่น จากนั้นทำการออกแบบวงจรเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับระบบดังกล่าวซึ่งได้เป็นกระบวนการของการลำเรียงวัตถุและคัดแยก ออกแบบกระบวนการทำงานเนื่องจากต้นแบบชุดฝึกการเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มีลักษณะในการทำงานประเภทลำเรียงชิ้นงานตามแนวแกน ทำให้กระบวนการทำงานนั้นจะทำงานซ้ำไปซ้ำมาแบบเดิมๆจึงเขียนเป็น Step Diagram หลังจากได้กระบวนการและวงจรที่สมบูรณ์แล้วจึงทำการออกแบบโดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบและสร้างต้นแบบชุดฝึก ดังนี้รูปที่ 1 รูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 1 การออกแบบโครงสร้าง



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 การประกอบติดตั้งโครงสร้าง (ก) การติดตั้งชุดเซอร์โวมอเตอร์และชุดคัตแยก (ข) การติดตั้งชุดเซอร์โวมอเตอร์และชุดกล่องเว็บแคม





รูปที่ 3 ภาพประกอบชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์

จากรูปที่ 1 รูปที่ 2 และรูปที่ 3 นั้นเป็นการพัฒนาชุดฝึกการเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมีขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ต้นกำลัง โดยมีเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ (V) เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังและมีเซ็นเซอร์ชนิดใช้แสง (photo sensor) ระบุตำแหน่งต่างๆ กล้องส่องชิ้นงาน ควบคุมผ่านบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi) โดยจะจับภาพตรวจสอบลักษณะชิ้นงานจากนั้นให้ทำการส่งสัญญาณไปยังพีแอลซีเพื่อระบุตำแหน่งการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ ครอบคลุมตัวป้อนชิ้นงาน เป็นครอบคลุมสองทางมีช่วงชัก 150 มิลลิเมตร ทำงานร่วมกับโซลินอยด์วาล์วลม วาล์วควบคุมทิศทางลมนิวแมติกส์ประกอบไปด้วยวาล์วนิวแมติกส์แบบ 5/3 จำนวน 2 ตัว และการติดตั้งบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi) เป็นระบบแมชชีนวิชัน (Machine Vision System) โดยทำการเชื่อมต่อกับกล้องเว็บแคม จากนั้นดำเนินการทดลองด้วยการเขียนโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์

## 2. วิธีการทดสอบระบบชุดฝึกการเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

ขั้นตอนการทดสอบชุดฝึกการเขียนโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ดำเนินการทดลองด้วยการเขียนโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย โปรแกรม GX work 2 และ โปรแกรมภาษา Python โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย โปรแกรม GX work 2 และ โปรแกรมภาษาไพธอน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ (1) กำหนดอินพุต/เอาต์พุตแล้วเขียนแลตเตอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram) ดังตารางที่ 1 (2) เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน

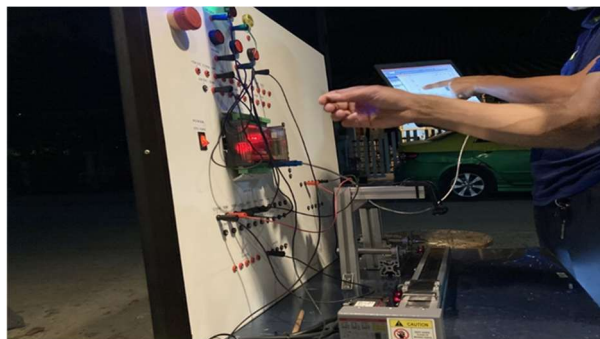
### 2.1 กำหนดอินพุต/เอาต์พุตแล้วเขียนแลตเตอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram)

การออกแบบและสร้างชุดทดลองพีแอลซีเพื่อใช้เป็นสื่อการสอน ประกอบด้วย แลตเตอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram) ควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์และสำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ทำงานโดยอัตโนมัติ ดังตารางที่ 1

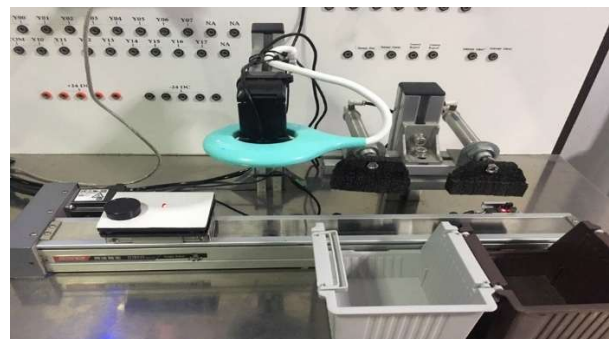
ตารางที่ 1 การกำหนดอินพุต/เอาต์พุตแล้วเขียนแลดเดอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram)

Device Name	Comment
M0	Station
M1	Home
X000	Start
X001	Stop
X002	Station1
X003	Home
X004	Reset System
Y000	PLUSE
Y001	System on
Y002	DIR
Y003	Station Off
Y004	Home
T1	timer1
T2	timer2

2.2 การโปรแกรมควบคุมการทำงานของโปรแกรมพีแอลซีควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับสร้างไฟล์แลดเดอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram) ลงในโปรแกรม GX Works2 และเขียนโปรแกรมภาษาไพธอนลงในบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบแมชชีนวิชันโดยการดาวน์โหลดโปรแกรมพีแอลซีลงชุดทดลอง และทำการต่อวงจรตามที่ได้กำหนดไว้ ดังรูปที่ 4



(ก)



(ข)

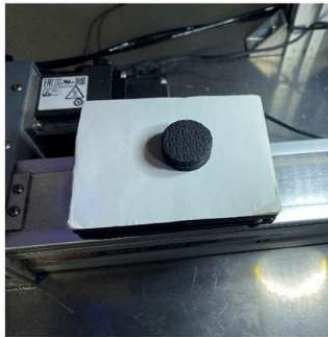
รูปที่ 4 การโปรแกรมพีแอลซีลงชุดทดลอง (ก) การทดสอบการทำงานของชุดฝึก (ข) การทดลองระบบวิชัน คัดแยกลักษณะของวัสดุ

จากรูปที่ 4 เป็นการทดสอบโปรแกรมผ่านบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi) ที่ใช้ในการทดสอบระบบแมชชีนวิชัน (Machine Vision System) การมองเห็นของเครื่องจักร การตรวจสอบลักษณะโดยปราศจากการสัมผัสกับชิ้นงานตรวจสอบด้วยการใช้การมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ในการประมวลผลภาพ (Image Processing) จากกล้องถ่ายภาพ

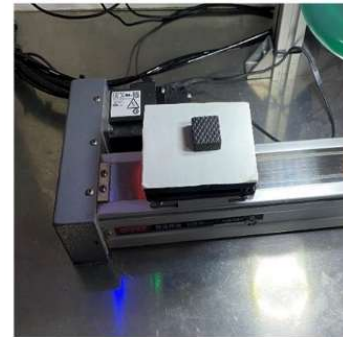
ดิจิทัลหรือกล้องถ่ายภาพดิจิทัลฉลาด (Smart Camera) ที่ส่งไปยังโรงงาน และจะกำหนดลักษณะการวางวัตถุลงบนถาดสำหรับวางชิ้นงาน ดังรูปที่ 5



(ก)



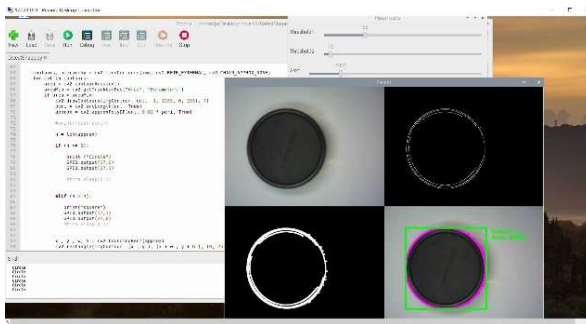
(ข)



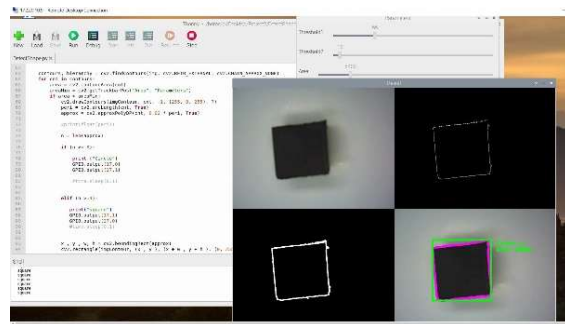
(ค)

รูปที่ 5 การวางวัตถุลงบนถาดสำหรับวางชิ้นงาน (ก) จุดเซนเซอร์จะทำการตรวจจับชิ้นงาน (ข) ทดสอบวางชิ้นงานทรงกลม (ค) ทดสอบวางชิ้นงานทรงสี่เหลี่ยม

จากภาพที่ 5 ขั้นการทดสอบโดยเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมโดยกดปุ่มสวิทช์สตาร์ทระบบจะทำงานอัตโนมัติ เมื่อหยิบชิ้นงานวางลงบนถาดสำหรับวางชิ้นงาน เซนเซอร์จะทำการตรวจจับชิ้นงานเมื่อมีวัตถุเซอร์ไวโมเตอร์จะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งของกล้อง จากนั้นกล้องเว็บแคมจะทำการถ่ายภาพส่งต่อการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์และตีความหมายของภาพเพื่อตัดสินใจลักษณะรูปภาพการทำงานดังภาพที่ 6 หากวัตถุมีลักษณะเป็นวงกลม เซอร์ไวโมเตอร์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของกระบอกกลมนิวเมติกส์ตัวที่ 1 หากวัตถุมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม เซอร์ไวโมเตอร์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของกระบอกกลมนิวเมติกส์ตัวที่ 2 ดังภาพที่ 7



(ก)

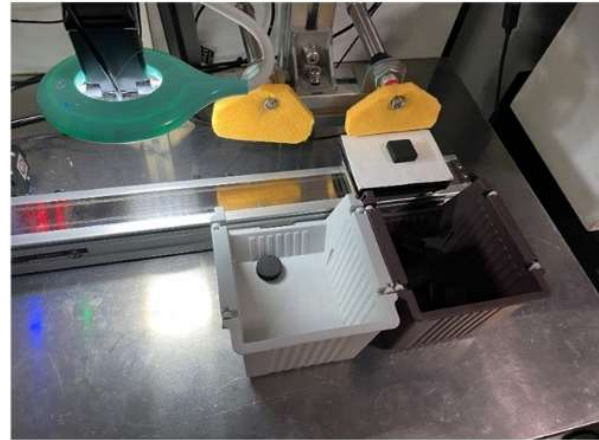


(ข)

รูปที่ 6 การทดลองระบบวิชั่น คัดแยกลักษณะของวัสดุ (ก) พบภาพทรงกลม (ข) พบภาพทรงสี่เหลี่ยม



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การที่วัตถุเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของกระบอกลมนิวเมติกส์ (ก) เคลื่อนที่ไปยังจุด 1 (ข) เคลื่อนที่ไปยังจุด 2

จากกระบวนการทำงานดังภาพที่ 4 ถึง ภาพที่ 7 เป็นทดลองการทำงานของชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับ ตรวจสอบอุปกรณ์แต่ละตัว ทดลองการทำงานเบื้องต้น รวมทั้งต้องวงจรการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ ตามที่ออกแบบไว้ ทดสอบการเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์แต่ละตัว นำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับชุดทดลองที่มีการใช้งานอยู่ ตรวจสอบและแก้ไขจุดที่บกพร่องจนเกิดความสมบูรณ์แบบ และสามารถนำไปทดลองตามใบงานที่ได้กำหนดไว้ต่อไปได้

### ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล จากการพัฒนาประสิทธิภาพชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนฝึกทักษะการเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลและบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ จึงได้จัดทำแบบการประเมินเพื่อใช้ในการประเมินความเหมาะสมของชุดฝึกแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวิชั่น

#### 1. ผลการประเมินความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดฝึก

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดฝึก

หัวข้อการประเมิน	ผลการประเมิน		ระดับ
	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	
<b>1. ความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ของชุดฝึก</b>			
1.1 การออกแบบกระบวนการทำงาน	4.3	0.73	ดีมาก
1.2 การติดตั้งอุปกรณ์ เช่น เซอร์โวมอเตอร์ กัล้อง กระบอกสูบ เซนเซอร์	4.35	0.67	ดีมาก
1.3 ความเรียบร้อยในการ Wiring ท่อลม สายไฟ	4.25	0.63	ดีมาก
<b>รวมด้านที่ 1</b>	<b>4.3</b>	<b>0.68</b>	<b>ดีมาก</b>

จากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตารางของผลการประเมินความเหมาะสมในการใช้ประกอบการเรียนการสอนฝึกทักษะการเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลและบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ ในหัวข้อการประเมินที่ 1 ด้านความเหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ชุดฝึกผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามีเหมาะสมในภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.3

และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.68 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดและมากเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ 1.2 การติดตั้งอุปกรณ์ เช่น มอเตอร์ กล้อง กระจบokus เซนเซอร์ 1.1 การออกแบบกระบวนการทำงาน และ 1.3 ความเรียบร้อยในการต่อต่อลมหสายไฟ

**ตารางที่ 3** ผลการประเมินความเหมาะสมของการออกแบบระบบควบคุม

หัวข้อการประเมิน	ผลการประเมิน		ระดับ
	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	
<b>2. ความเหมาะสมของการออกแบบระบบควบคุม</b>			
2.1 สวิตซ์ไฟฟ้า/ไฟแสดงสถานะ	4.5	0.51	ดีมาก
2.2 พีแอลซี	4.1	0.71	ดีมาก
2.3 บอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi)	3.9	0.91	ดีมาก
2.4 ช่องอินพุต/เอาต์พุต	3.7	0.97	ดีมาก
<b>รวมด้านที่ 2</b>	<b>4.05</b>	<b>0.78</b>	<b>ดีมาก</b>

จากตารางที่ 3 ซึ่งเป็นตารางของผลการประเมินความเหมาะสมในการใช้ประกอบการเรียนการสอนฝึกทักษะการเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลและบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ ในหัวข้อการประเมินที่ 2 ความเหมาะสมของการออกแบบกล่องควบคุมผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามีเหมาะสมในภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.05 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.78 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดข้อเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ 2.1 สวิตซ์ไฟฟ้า/ไฟแสดงสถานะ 2.2 พีแอลซี 2.3 บอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi) 2.4 ช่องอินพุต/เอาต์พุต

**ตารางที่ 4** ผลการประเมินความเหมาะสมในการฝึกปฏิบัติ

หัวข้อการประเมิน	ผลการประเมิน		ระดับ
	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	
<b>3. ความเหมาะสมในการฝึกปฏิบัติ</b>			
3.1 การฝึกใช้ทักษะ Wiring (การต่อ Input/Output)	4.15	0.67	ดีมาก
3.2 การฝึกใช้คำสั่งพื้นฐาน (LD AND OR OUT SET)	3.9	0.78	ปานกลาง
3.3 การฝึกใช้คำสั่งประยุกต์ (BCD BIN MOVE CMP)	4.5	0.51	ดีมาก
3.4 การฝึกเขียนโปรแกรมแบบ แลตเตอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram)	4.15	0.81	ดีมาก
3.5 การฝึกเขียนโปรแกรม PLC ติดต่อกับบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi)	3.6	0.82	ปานกลาง
<b>รวมด้านที่ 3</b>	<b>4.06</b>	<b>0.72</b>	<b>ดีมาก</b>

จากตารางที่ 5 ซึ่งเป็นตารางของผลการประเมินความเหมาะสมในการใช้ประกอบการเรียนการสอนฝึกทักษะการเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลและบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ ในหัวข้อการประเมินที่ 3 ความเหมาะสมในการฝึกปฏิบัติผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามีเหมาะสมในภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.06 มีค่าเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.72 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าอยู่ในระดับความเหมาะสมมากและมีบางข้ออยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ 3.3 การฝึกใช้คำสั่งประยุกต์ 3.1 การฝึกใช้ทักษะ Wiring (การต่อ Input/Output) 3.4 การฝึกเขียนโปรแกรมแบบ Ladder Diagram 3.2 การฝึกใช้คำสั่งพื้นฐาน 3.5 การฝึกเขียนโปรแกรม PLC ติดต่อกับบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ (Raspberry Pi)

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความเหมาะสมในการใช้งาน

หัวข้อการประเมิน	ผลการประเมิน		ระดับ
	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	
<b>4. ความเหมาะสมในการใช้งาน</b>			
4.1 การใช้ประกอบการเรียนการสอน	4.5	0.51	ดีมาก
4.2 ความปลอดภัยในการใช้งาน	4.15	0.74	ดีมาก
4.3 การเคลื่อนย้าย	4.35	0.58	ดีมาก
4.4 ขนาดของชุดฝึก	4.15	0.81	ดีมาก
4.5 ความมั่นคง/แข็งแรงของชุดฝึก	4.4	0.75	ดีมาก
4.6 ความสะดวกในการใช้งาน	3.35	0.81	ปานกลาง
<b>รวมด้านที่ 4</b>	<b>4.15</b>	<b>0.70</b>	<b>ดีมาก</b>

จากตาราง 5 ซึ่งเป็นตารางของผลการประเมินความเหมาะสมในการใช้ประกอบการเรียนการสอนฝึกทักษะการเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลและบอร์ดไมโครโปรเซสเซอร์ ในหัวข้อการประเมินที่ 4 ความเหมาะสมในการใช้งานผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นสอดคล้องกันว่ามีความเหมาะสมในภาพรวมอยู่ในระดับความเหมาะสมมากมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.15 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.70 เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่าอยู่ในระดับความเหมาะสมมากทุกข้อเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้แก่ 4.1 การใช้ประกอบการเรียนการสอน 4.5 ความมั่นคงแข็งแรงของชุดฝึก 4.3 การเคลื่อนย้าย 4.2 ความปลอดภัยในการใช้งาน 4.4 ขนาดของชุดฝึกและสุดท้าย 4.6 ความสะดวกในการใช้งาน

ตารางที่ 6 ผลรวมการประเมิน

รวมทั้ง 4 ด้าน	ผลการประเมิน		ระดับ
	ค่าเฉลี่ย	ค่า S.D.	
		4.14	0.72

จากตารางที่ 6 เมื่อนำค่าเฉลี่ยของผลการประเมินทั้ง 4 ด้านมารวมกันจะได้ค่าเฉลี่ยรวมทั้ง 4 ด้านซึ่งมาค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.14 อยู่ในระดับความเหมาะสมมากที่สุดและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.72 ซึ่งเป็นค่าความเหมาะสมที่อยู่ในระดับที่ผู้จัดทำตั้งไว้ในวัตถุประสงค์

## อภิปรายผล

จากการทดลองใช้งานชุดฝึกในการเขียนโปรแกรมควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับ ทำการตัดแยกวัตถุ นั้นพบว่าระบบวิชั่นและระบบพีแอลซีสามารถทำงานได้ถูกต้องตามเงื่อนไขที่ได้วางแผนไว้ มีแบบฝึกหัดสำหรับผู้เริ่มใช้งาน เพื่อเป็น

ประโยชน์ในการศึกษา และทำไปประยุกต์ใช้งานหรือปรับปรุงการทำงานของระบบในอนาคตให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เมื่อนำพีแอลซีมาใช้ในกระบวนการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับ และระบบวิชั่นมาใช้ในการตรวจสอบแยกวัตถุ ได้ผลอยู่ในระดับดีมากถึง 100% ซึ่งทำให้เข้าใจระบบการทำงานต่างๆได้เป็นอย่างดี ส่งผลดีในเรื่องการศึกษาเรียนรู้ระบบอัตโนมัติและยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมการผลิต หรือองค์กรอื่นๆที่ต้องการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันทางธุรกิจ ทั้งในด้านการใช้แรงงานคน ลดต้นทุนการผลิตและผลิตประสิทธิภาพในการผลิตมากยิ่งขึ้นด้วย

## สรุปผลการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ การสร้างและพัฒนาหาประสิทธิภาพชุดฝึกระบบเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับ ร่วมกับระบบวิชั่น ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (PLC) และบอร์ดราสเบอร์รี่พาย ประกอบการเรียนรู้โดยใช้สำหรับเป็นต้นแบบในการหัดเขียนโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ สามารถเขียนควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับให้เคลื่อนที่ตามแกน และระบบวิชั่นใช้ในการตรวจสอบวัตถุ ผู้จัดทำได้ทำการค้นคว้าศึกษาข้อมูลและระดมสมองกับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เพื่อหาเครื่องมือที่ทันสมัยเข้ามาช่วยในการสร้างชุดฝึกเป็นการพัฒนาการศึกษาเรียนรู้ เพื่อให้ได้ชุดฝึกที่มีประสิทธิภาพต่อการทำมา เป็นสื่อการสอนให้กับผู้ที่สนใจ เกี่ยวกับการออกแบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ และระบบวิชั่นในการคัดแยกประเภทวัตถุ ให้ได้สัมผัสการใช้งานอุปกรณ์จริง ส่งเสริมการศึกษาระบบอัตโนมัติให้ดียิ่งขึ้น จากที่ได้พัฒนาชุดฝึกโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับ ร่วมกับระบบวิชั่น ที่ผู้วิจัยได้จัดสร้างขึ้นนั้น เป็นการพัฒนาชุดฝึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้เป็นสื่อการเรียนรู้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ และระบบวิชั่นคัดแยกวัตถุ ผู้ใช้สามารถออกแบบโปรแกรมตามความคิดของผู้ใช้ได้ พร้อมทั้งมีอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น สวิตซ์ ไฟแสดงสถานะ กล้องตรวจจับ กระจกอบูบนิวมติก เซนเซอร์ เป็นต้น และมีคู่มือแบบฝึกเบื้องต้นสำหรับผู้เริ่มต้นเรียนรู้ระบบโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ อีกทั้งตัวชุดฝึกยังมีระบบเซฟตี้ฉุกเฉินเพื่อป้องกันการเสียหายของตัวระบบเอง สรุปได้ว่าชุดฝึกโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับร่วมกับระบบวิชั่น ทางคณะผู้จัดทำได้สร้างขึ้นมานั้นพบว่าได้ผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ทุกประการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในการเป็นสื่อการสอนได้อย่างเป็นดี

## ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการพัฒนาการทดสอบประสิทธิภาพของชุดทดลองการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสลับและระบบวิชั่นเพิ่มเติม ด้วย โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้กับนักศึกษาที่เรียนระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรม ผู้วิจัย มีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ในการสร้างการชุดทดลอง จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้น และตรวจสอบ วงจรไฟฟ้าอย่างละเอียดเพื่อให้เกิดความปลอดภัย
2. การออกแบบสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลอง ต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ของเนื้อหา ที่จะได้รับจากการใช้ชุดทดลองกับวัตถุประสงค์ของหลักสูตรให้มีความสอดคล้องกัน
3. ในการสร้างสื่อการเรียนการสอนประเภทชุดทดลองที่มีการใช้งานเกี่ยวกับไฟฟ้ากระแสสลับนี้ ต้องคำนึงถึง ความปลอดภัยของผู้เรียนเป็นสำคัญ
4. ความร่วมมือของกลุ่มตัวอย่าง มีผลอย่างยิ่งต่อการหาประสิทธิภาพของชุดทดลองผู้วิจัย และครูผู้สอน ต้องร่วมกันใช้เทคนิคและวิธีการสนับสนุนให้กลุ่มตัวอย่างร่วมมือในการทำวิจัยด้วยความเต็มใจ

5. การทดลองโดยใช้ชุดทดลอง 1 ชุด ต่อผู้เรียน 2 คน ทำให้ผู้เรียนมีโอกาสช่วยกันเสนอความคิดเห็น และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง แต่ถ้าผู้เรียนบางคนไม่สนใจอาจไม่ลงมือปฏิบัติ เป็นผลให้การวิจัย ได้ข้อมูลไม่ตรงกับสภาพเป็นจริง ดังนั้นครูผู้สอนจึงควรควบคุมดูแลผู้เรียนขณะปฏิบัติงานอย่างใกล้ชิด

6. การเลือกใช้วัสดุสำหรับประกอบเป็นชุดทดลอง ควรเลือกวัสดุต่าง ๆ ให้เป็นชนิดที่มีความผิดพลาดต่ำ และสามารถหาซื้อได้ทั่วไปในประเทศ ต่างจังหวัด เพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษาชุดทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนิกันต์ มุสิกทอง, (2562), การจัดทำแผนพัฒนาด้านเครื่องจักรและเทคโนโลยีเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสู่ระบบดิจิทัล, Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 9683
- [2] ศิริวรรณ พลเศษ. (2568). การเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมโหลดไฟฟ้ากระแสตรงด้วยระบบพีไอดีเชิงพยากรณ์และเทคโนโลยี อาร์เอฟไอดี. สหวิทยาการและความยั่งยืนปริทรรศน์ไทย, 14(1), บทความที่ 20
- [3] ทองพันซัง พงษ์ วารินทร์. (2021). การเพิ่มผลิตภาพสำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม. วารสารพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม, 1(3), 91-97
- [4] ศุภชัย หอวิมานพร. (2025). การพัฒนาชุดการเรียนรู้พีแอลซีสำหรับการควบคุมตำแหน่ง. Journal of Digital Education and Learning Engineering, 1(1), 58-69
- [5] Arisariyawong, T., Khumset, T., & Prommueang, T. (2024). Open-Source Embedded Vision System for Industry 4.0 Applications. Srinakharinwirot University Engineering Journal, 20(1), 14-22
- [6] ยนต์ศรี สมสีท่า, ทรงศักดิ์ นิลทิถิน, และ ชัยพล จันทร์ประดิษฐ์. (2563). การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับร่วมกับระบบวีซี. โครงการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [7] สุเมธ เฉลิมพันธ์. (2560). การสร้างและหาประสิทธิภาพของชุดฝึกระบบนิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์ ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล (รายงานผลการวิจัย). นครสวรรค์ : วิทยาลัยเทคนิคนครสวรรค์.
- [8] ศุภเชษฐ์ ไชยวุฒิ (2557). การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบโดยใช้ระบบวีซี (รายงานผลการวิจัย). ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [9] ธนิศร์ พันธุ์ประยูร. (2563). การสร้างและหาประสิทธิภาพชุดทดลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า ด้วย Programmable Logic Controller (รายงานผลการวิจัย). เชียงราย : วิทยาลัยการอาชีพเชียงราย.
- [10] วิโรจน์ บัวงาม และกำพล พูลผล (2558). ตู้เก็บของอัตโนมัติโดยใช้ระบบนิวแมติกส์ (รายงานผลการวิจัย). นครปฐม : มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม



## การประยุกต์ TreeNet® Regression ในการสร้างเส้นมาตรฐานของการทดสอบการอัดแน่นดิน Application of TreeNet® Regression for Generating a Standard Line in Soil Compaction Testing

รัตนโชติ ทองป่อง<sup>1\*</sup>, ปวีณา ชุนเกาะ<sup>1</sup>, ธรรมศ เสถียรนาม<sup>1</sup>, ภาวิณี มากทอง<sup>1</sup> และ ธารพงษ์ พัฒนศักดิ์ภิญโญ<sup>1</sup>

Rattanachot Thongpong<sup>1\*</sup>, Paweena Chunko<sup>1</sup>, Trust Satiennam<sup>1</sup>,

Pawinee Markthong<sup>1</sup> and Tarapong Patanasakpinyo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Civil Engineering Technology Program, Faculty of Industrial Technology,

Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: Rattanachot.thong@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : November 19, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 20, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) สำหรับการพยากรณ์ตัวแปรทางปฐพีกลศาสตร์ (Dry Density : DD) โดยอาศัยตัวแปรพยากรณ์หลักคือ Moisture content (MC) ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองกลุ่มต้นไม้ (Tree-based ensemble model) กับชุดข้อมูลจำนวน 600 ตัวอย่าง และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดผ่านกระบวนการตรวจสอบไขว้ 5 ส่วน (5-fold cross-validation) โดยประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared) และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมพัทธ์ (MAPE) ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองสุดท้ายที่ประกอบด้วยต้นไม้ 296 ต้น มีความสามารถในการทำนายบนชุดข้อมูลทดสอบได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยมีค่า R-squared เท่ากับ 48.73% และ MAPE เท่ากับ 12.14% โดยไม่พบปัญหาการเรียนรู้ที่มากเกินไป (Overfitting) ที่สำคัญแบบจำลองสามารถจับความสัมพันธ์ที่มีความซับซ้อนและไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear) ระหว่างตัวแปร MC และ DD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ MC ต่อค่าพยากรณ์มีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงค่า โดยสรุป การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในการสร้างแบบจำลองพยากรณ์สำหรับปัญหาทางปฐพีกลศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ซับซ้อน และยืนยันว่า MC เป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งในการทำนายผลลัพธ์

**คำสำคัญ :** การเรียนรู้ของเครื่อง, การพยากรณ์, ความสัมพันธ์ที่ไม่เชิงเส้นตรง, แบบจำลองกลุ่มต้นไม้

### Abstract

This research aims to develop and evaluate a machine learning framework for predicting Dry Density (DD) based on Moisture Content (MC), a fundamental relationship in geotechnical engineering. Utilizing a dataset of 600 samples, a tree-based ensemble model was developed and optimized through 5-fold cross-validation.

The model's predictive performance was quantified using the coefficient of determination ( $R^2$ ) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The optimized model, comprising 296 trees, achieved an  $R^2$  of 48.73% and a MAPE of 12.14% on the test dataset. Results indicate that the model generalized well to unseen data without exhibiting signs of overfitting. Notably, the ensemble approach effectively captured the complex, non-linear, and non-monotonic relationship between MC and DD, demonstrating that the sensitivity of dry density to moisture fluctuations varies significantly across different ranges. This study concludes that machine learning techniques offer a robust alternative for modeling intricate geotechnical behaviors where traditional linear methods may fail, reaffirming moisture content as a primary predictor of soil compaction outcomes.

**Keywords :** Machine Learning, Prediction, Non-linear Relationship, Tree-based Ensemble Model

## บทนำ

การทดสอบการอัดแน่นดินมีบทบาทสำคัญในวิศวกรรมฐานราก เพื่อสร้างความมั่นคงและความทนทานของโครงสร้างพื้นฐาน กระบวนการนี้มักเกี่ยวข้องกับการหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของดินและปริมาณน้ำ เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง (Maximum Dry Density, MDD) ที่ความชื้นเหมาะสมที่สุด (Optimum Moisture Content, OMC) กราฟการอัดแน่นที่ได้จากการทดสอบให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของดิน อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนในการทดสอบการอัดแน่น ไม่ว่าจะเกิดจากความแตกต่างของผู้ปฏิบัติงาน การปรับเทียบเครื่องมือ หรือปัจจัยสิ่งแวดล้อม สามารถทำให้กราฟการอัดแน่นมีความแตกต่าง ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของการประเมินคุณสมบัติของดิน งานวิจัย เช่น [1-3] ได้เน้นถึงความหลากหลายขององค์ประกอบดิน สภาพแวดล้อม และความคลาดเคลื่อนจากผู้ปฏิบัติงาน ที่ส่งผลต่อผลลัพธ์การอัดแน่น จึงเน้นย้ำความจำเป็นในการพัฒนาวิธีการทดสอบที่มีความเสถียรมากขึ้น

เพื่อแก้ไขความไม่สอดคล้องเหล่านี้ วิธีการในปัจจุบันมักมุ่งเน้นไปที่การสร้าง เส้นมาตรฐาน เพื่อแทนชุดกราฟการอัดแน่นให้เป็นโปรไฟล์เดียวที่สอดคล้องกัน วิธีนี้มีความสำคัญต่อการทำให้ผลลัพธ์การอัดแน่นเป็นมาตรฐานระหว่างการทดสอบและปฏิบัติงานที่แตกต่างกัน วิธีที่ใช้บ่อยในการสร้างเส้นมาตรฐาน ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ยของกราฟการอัดแน่นและการสร้างสมการพหุนามเพื่อแทนข้อมูล นอกจากนี้วิธีการหาค่าเฉลี่ยตามงานวิจัย [4] จะสร้างเส้นฐานโดยคำนวณค่าเฉลี่ยของกราฟการอัดแน่นหลายครั้ง ขณะที่การสร้างสมการพหุนามตามงานวิจัย [5-6] พยายามแทนแนวโน้มโดยรวมของข้อมูลการอัดแน่นผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะให้ภาพรวมที่เรียบง่าย แต่ก็อาจไม่สามารถสะท้อนความหลากหลายและรายละเอียดของข้อมูลการอัดแน่นได้อย่างครบถ้วน งานวิจัยล่าสุด เช่น [7-9] ได้ศึกษาวิธีทางสถิติและเชิงคำนวณในการสร้างเส้นมาตรฐาน แต่ยังมีข้อจำกัดในการจัดการกับชุดข้อมูลที่หลากหลายอย่างมีประสิทธิภาพ

ในปัจจุบัน การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถของการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมโยธาและธรณีกลศาสตร์ โดยเฉพาะการนำมาใช้จัดการกับข้อมูลที่มีความซับซ้อนและมีความสัมพันธ์เชิงไม่เชิงเส้น (Non-linear Relationship) ซึ่งวิธีการทางสถิติแบบดั้งเดิมอาจไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมได้อย่างครอบคลุม

ในบรรดาเทคนิคต่างๆ ของ ML นั้น วิธีการ แบบรวมกลุ่ม (Ensemble Learning) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่าให้ความแม่นยำสูงกว่าการใช้โมเดลเดี่ยว เนื่องจากการรวมจุดแข็งของหลายแบบจำลองเข้าด้วยกันเพื่อลดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยด้านวิศวกรรมฐานราก [10-12] ที่พบว่าการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของดินมีความท้าทายจากความผันแปรของข้อมูลสูง

ด้วยเหตุนี้ TreeNet® Regression ซึ่งเป็นอัลกอริทึมในกลุ่ม Gradient Boosting จึงเป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมและมีแนวโน้มที่ดีมากสำหรับการนำมาใช้สร้างเส้นมาตรฐานของกราฟการอัดแน่นดิน (Soil Compaction Curve) เนื่องจาก

ความสามารถที่โดดเด่นในการสร้างแบบจำลองจากชุดข้อมูลที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการฝึกฝนโมเดล TreeNet® ด้วยข้อมูลจากการทดสอบการอัดแน่น จะช่วยให้สามารถสร้างเส้นมาตรฐานที่สะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของดินได้แม่นยำกว่าวิธีพหุนาม (Polynomial) หรือวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนและรองรับความหลากหลายของข้อมูลจากการทดสอบซ้ำหลายครั้งได้อย่างน่าเชื่อถือ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการประยุกต์ใช้ TreeNet® Regression เพื่อสร้างเส้นมาตรฐานของการทดสอบการอัดแน่นดิน และประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติพื้นฐาน เช่น  $R^2$ , RMSE และ MAE วิธีการนี้มุ่งเน้นการเพิ่มความแม่นยำ ความเชื่อถือได้ และการสร้างมาตรฐานในการประเมินการอัดแน่นดิน เพื่อสนับสนุนการปฏิบัติทางวิศวกรรมฐานรากที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการสร้างแบบจำลองในการสร้างเส้นมาตรฐานของกราฟการอัดแน่นดิน จากข้อมูลการทดสอบหลายชุด
- 1.2 เพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเส้นมาตรฐานที่สร้างขึ้น โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติพื้นฐาน เช่น  $R^2$ , RMSE และ MAE

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบการอัดแน่นดินเป็นกระบวนการสำคัญในวิศวกรรมฐานราก โดยความน่าเชื่อถือของผลการทดสอบอาจได้รับผลกระทบจากหลายปัจจัย Zhang et al. (2021) [1] ได้ระบุถึงความแตกต่างขององค์ประกอบดิน โดยแสดงให้เห็นว่าความแปรผันของแร่ธาตุและขนาดอนุภาคส่งผลต่อผลลัพธ์ของการทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกัน Mahajan et al. (2020) [2] ได้ศึกษาผลกระทบของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ต่อการวัดค่าการอัดแน่นดิน และพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของสภาวะแวดล้อมสามารถทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อนได้ งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาความหลากหลายของดินและปัจจัยภายนอกในการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

นอกเหนือจากความแตกต่างตามธรรมชาติ ปัจจัยจากผู้ปฏิบัติงานยังมีผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ โดย Miller et al. (2019) [3] ได้ศึกษาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผู้ปฏิบัติงาน และเน้นย้ำว่าความแตกต่างในการดำเนินขั้นตอนการทดสอบรวมถึงการตัดสินใจเฉพาะหน้า สามารถสร้างความไม่สอดคล้องระหว่างชุดข้อมูลได้ งานวิจัยดังกล่าวนำเสนอความจำเป็นในการใช้มาตรฐานการทดสอบเพื่อลดความคลาดเคลื่อน และสะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดของวิธีการดั้งเดิมที่อาศัยการปฏิบัติงานด้วยมือ ร่วมกับการหาค่าเฉลี่ยทางสถิติแบบพื้นฐาน โดยสรุปแล้ว แหล่งที่มาของความแปรปรวนอันประกอบด้วย คุณสมบัติของดิน สภาพแวดล้อม และพฤติกรรมของผู้ปฏิบัติงาน ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้การตีความและการเปรียบเทียบกราฟการอัดแน่นดินทำได้ยาก

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นไปที่การสร้าง "เส้นมาตรฐาน" (Baseline Curve) เพื่อรวมชุดกราฟการอัดแน่นหลายชุดให้เป็นโปรไฟล์เดียว โดย Singh et al. (2021) [4] ได้ศึกษาวิธีการทางสถิติ เช่น เทคนิคการหาค่าเฉลี่ยและการสร้างแบบจำลองเชิงถดถอย เพื่อสร้างกราฟตัวแทนที่สะท้อนความแตกต่างระหว่างการทดสอบ ต่อมา Kim et al. (2020) [5] ได้พัฒนาวิธีการเชิงคำนวณเพื่อบริหารจัดการความแตกต่างของกราฟ โดยแสดงให้เห็นว่าวิธีการเชิงอัลกอริทึมสามารถตรวจจับแนวโน้มเชิงไม่เชิงเส้นและความแตกต่างเพียงเล็กน้อยระหว่างการทดสอบได้ดีกว่าการหาค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว งานวิจัยเหล่านี้สะท้อนถึงแนวโน้มการใช้เครื่องมือเชิงคำนวณขั้นสูงเพื่อปรับปรุงมาตรฐานและความน่าเชื่อถือของข้อมูล

อย่างไรก็ตาม การรวมกราฟการอัดแน่นจากชุดข้อมูลที่หลากหลายยังคงเป็นความท้าทาย Arshad et al. (2019) [6] ได้ระบุถึงข้อจำกัดของวิธีการในปัจจุบันและความยากลำบากในการจัดการกับดินประเภทต่างๆ รวมถึงมาตรฐานการทดสอบที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เน้นว่าแม้การสร้างเส้นมาตรฐานจะช่วยเพิ่มความสอดคล้องของข้อมูลได้ แต่จำเป็นต้องเลือกเทคนิคการ

สร้างแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและสามารถประยุกต์ใช้ได้ทั่วไป ซึ่งถือเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองพยากรณ์ขั้นสูง เช่น TreeNet® Regression เพื่อสร้างเส้นมาตรฐานที่มีความแข็งแกร่ง (Robust) และรองรับความหลากหลายของสภาพดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. ข้อมูลดินและขั้นตอนการทดลอง

ดินที่ใช้ในการศึกษานี้จัดอยู่ในประเภท GW (Well-Graded Gravel) ตามระบบการจำแนกดินเอกภาพ (USCS) และจัดเป็น A-2-5 (Clayey Gravel) ตามระบบของ AASHTO โดยลักษณะทางกายภาพเป็นกรวดคละชั้นดี มีปริมาณตะกอนดินเหนียวปนเล็กน้อย ซึ่งยืนยันได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางตามมาตรฐานงานทางหลวง สมบัติพื้นฐานของดินประกอบด้วย ค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid Limit) เท่ากับ 49.16 ดัชนีความเหนียว (Plasticity Index) เท่ากับ 3.89 และความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) อยู่ในช่วง 2.65–2.70

สำหรับการเตรียมตัวอย่าง ดินถูกร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานหมายเลข 4 (4.75 มม.) และปรับเพิ่มความชื้นตามลำดับก่อนการอัดแน่น การทดลองใช้วิธีการอัดแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน (Modified Proctor Test) ตามข้อกำหนด ASTM D1557 โดยใช้แม่พิมพ์ทรงกระบอก แบ่งดินออกเป็น 5 ชั้น และอัดด้วยลูกตุ้มน้ำหนัก 4.54 กก. ตกจากความสูง 457 มม. เพื่อหาค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density: MDD) และปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (Optimum Moisture Content: OMC)

การวิเคราะห์ที่ใช้ฐานข้อมูลจากการทดสอบทั้งหมด 120 ชุด โดยแต่ละชุดมีการทดสอบย่อย 5 ระดับความชื้น (2%, 4%, 6%, 8% และ 10%) รวมเป็นข้อมูลทั้งหมด 600 ตัวอย่าง ดำเนินการโดยกลุ่มผู้ปฏิบัติงาน 3 กลุ่ม เพื่อสร้างความหลากหลายของข้อมูลและสะท้อนความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจริงในภาคสนาม ข้อมูลจำนวน 600 ตัวอย่างนี้ ถือว่ามีความเพียงพอสำหรับการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในงานเฉพาะด้านปฐพีวิศวกรรม เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ได้จากการควบคุมสภาพแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ (Experimental Data) ซึ่งมีความหนาแน่นของสารสนเทศสูงกว่าข้อมูลทั่วไป ช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ได้โดยไม่เกิดปัญหาการขาดแคลนข้อมูล

ตารางที่ 1 ข้อมูลทางสถิติจากการทดลอง

รายละเอียด	มากที่สุด	น้อยที่สุด	ลำดับกลุ่มข้อมูลหรือช่วงของการทดสอบ				ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
			Q1	Q2	Q3	Q4			
ความหนาแน่นแห้งของดิน (Dry Density : DD)	2%	1.67	0.69	0.80	0.97	1.03	1.67	0.95	0.40
	4%	1.88	1.21	1.38	1.49	1.60	1.88	1.51	0.25
	6%	1.96	1.41	1.55	1.67	1.80	1.96	1.67	0.20
	8%	1.64	1.14	1.26	1.32	1.43	1.64	1.35	0.19
	10%	1.58	0.96	1.04	1.12	1.19	1.58	1.14	0.25
ปริมาณความชื้นในดิน (Moisture Content : MC)	2%	18.15	4.45	5.01	8.87	13.12	18.15	9.19	5.68
	4%	25.63	9.93	11.79	13.07	16.76	25.63	14.39	6.43
	6%	27.09	12.50	15.66	20.61	22.96	27.09	19.60	5.48
	8%	34.77	14.51	20.01	25.95	29.21	34.77	24.84	7.45

	10%	48.07	15.54	22.96	36.65	40.08	48.07	32.78	12.24
ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum Dry Density : MDD)		1.9552	1.96	1.41	1.55	1.68	1.81	1.96	1.68
ปริมาณความชื้นที่ เหมาะสมในการอัดแน่น (Optimum Moisture Content : OMC)		27.0851	27.09	9.93	13.80	16.98	22.07	27.09	17.89
ค่าพลังงาน		1478.2900	1478.29	782.65	992.41	1077.75	1182.86	1478.29	1092.70

## 2. การวิเคราะห์โดยใช้ TreeNet® Regression

TreeNet® Regression เป็นเทคนิคการสร้างแบบจำลองเชิงพยากรณ์ที่พัฒนามาบนพื้นฐานของอัลกอริทึมต้นไม้ตัดสินใจแบบเพิ่มระดับความชัน (Gradient Boosting Decision Tree: GBDT)

ความเหมาะสมของอัลกอริทึมกับงานวิจัย: สาเหตุที่เลือกใช้ TreeNet® สำหรับการสร้างเส้นมาตรฐานการอัดแน่นดิน เนื่องจากพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและความหนาแน่นของดินมีความซับซ้อนและเป็นเชิงไม่เชิงเส้น (Non-linear) อีกทั้งข้อมูลจากการทดสอบมักมีความคลาดเคลื่อน (Noise) จากปัจจัยสภาพแวดล้อมและผู้ปฏิบัติงาน TreeNet® มีจุดเด่นในการสร้างชุดต้นไม้ตัดสินใจหลายต้นแบบต่อเนื่อง โดยต้นไม้ลำดับถัดไปจะถูกสร้างขึ้นเพื่อประมาณค่าความคลาดเคลื่อนสะสม (Residuals) จากต้นไม้ลำดับก่อนหน้า ทำให้สามารถขจัดข้อผิดพลาดและจัดรูปแบบข้อมูลที่ละเอียดอ่อนได้ดีกว่าโมเดลเชิงเส้นทั่วไป

กระบวนการของอัลกอริทึมดังนี้

- 1) การกำหนดค่าเริ่มต้น: กำหนดค่าพยากรณ์แรกเริ่มจากค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นดินในชุดข้อมูล
- 2) การคำนวณค่าส่วนต่าง: คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดจริงกับค่าที่พยากรณ์ได้
- 3) การสร้างต้นไม้ลำดับถัดไป: สร้างต้นไม้ตัดสินใจขนาดเล็กเพื่อเรียนรู้และพยากรณ์ค่าความคลาดเคลื่อนนั้น
- 4) การปรับปรุงโมเดล: รวมผลลัพธ์ของต้นไม้ใหม่เข้ากับโมเดลเดิม โดยใช้ อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate) เพื่อควบคุมความเร็วในการปรับปรุง ป้องกันไม่ให้โมเดลยึดติดกับข้อมูลชุดฝึกสอนมากเกินไป (Overfitting)
- 5) การทำซ้ำ: ดำเนินการวนซ้ำจนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนลดลงจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

## 3. ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ

ในการประเมินความแม่นยำของเส้นมาตรฐานที่สร้างขึ้นจาก TreeNet® Regression งานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวชี้วัดทางสถิติเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้แก่

- 1) สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ): เพื่อวัดระดับความสามารถในการอธิบายความแปรผันของข้อมูล
- 2) รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE): เพื่อวัดค่าความคลาดเคลื่อนในหน่วยเดียวกับข้อมูลจริง
- 3) ค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAE): เพื่อดูขนาดของความผิดพลาดเฉลี่ยจากการพยากรณ์

## ผลการวิจัย

จากการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองการพยากรณ์โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลอง (ดังแสดงในภาพ) โดยใช้ฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss function) เป็น Squared error และเลือกจำนวนต้นไม้ที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากค่า Maximum R-squared ผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยวิธี 5-fold cross-validation ทั้งนี้ ได้กำหนด

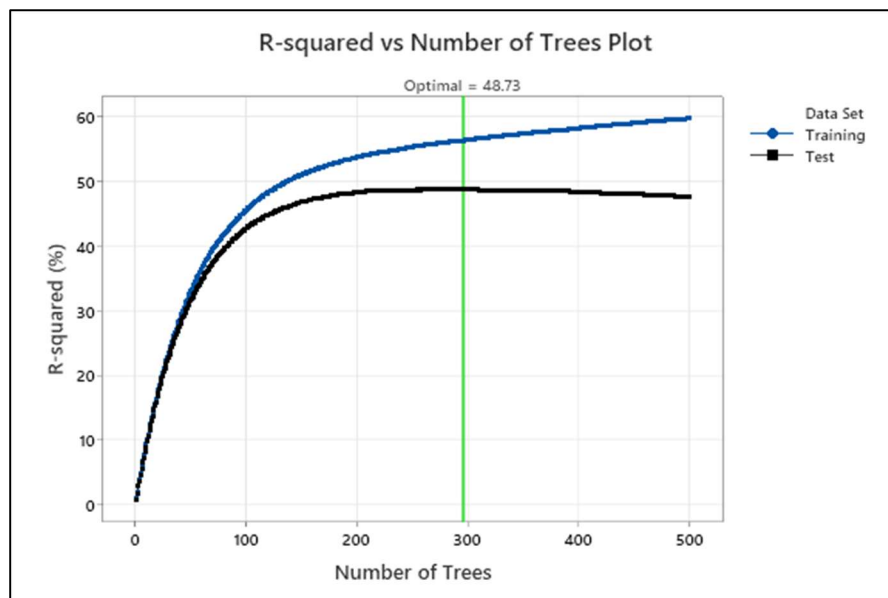
ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ Learning rate เท่ากับ 0.01, Subsample fraction เท่ากับ 0.5, Maximum terminal nodes per tree เท่ากับ 6 และ Minimum terminal node size เท่ากับ 3 โดยแบบจำลองดังกล่าวสร้างขึ้นจากข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จำนวนทั้งสิ้น 600 แถว

จากผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของตัวแปรตาม (Response Information) พบว่าข้อมูลมีค่าเฉลี่ย (Mean) อยู่ที่ 1.325 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เท่ากับ 0.293 ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย โดยมีค่ามัธยฐาน (Median) ซึ่งเป็นค่ากลางของข้อมูลอยู่ที่ 1.319 และมีพิสัยของข้อมูลตั้งแต่ค่าต่ำสุด (Minimum) ที่ 0.695 ไปจนถึงค่าสูงสุด (Maximum) ที่ 1.955

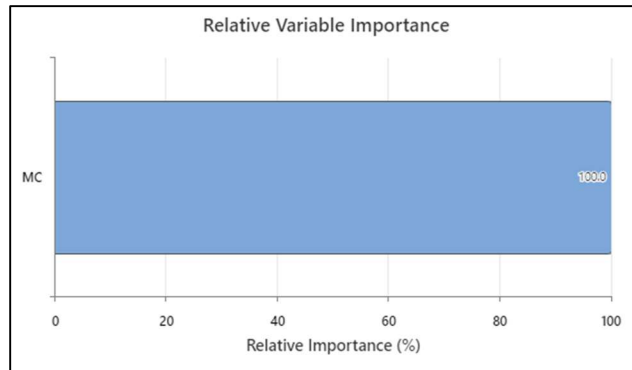
จากรูปที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อหาจำนวนต้นไม้ (Number of Trees) ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared) ของชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงสุดที่ 48.73% เมื่อจำนวนต้นไม้มีค่าประมาณ 280-300 ต้น หลังจากจุดดังกล่าว การเพิ่มจำนวนต้นไม้เข้าไปอีกไม่ได้ช่วยให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและมีแนวโน้มคงที่ ในขณะที่ค่า R-squared ของชุดข้อมูลฝึกฝน (Training set) ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกจำนวนต้นไม้ที่เหมาะสมที่สุด (Optimal) สำหรับการสร้างแบบจำลองนี้ที่ประมาณ 300 ต้น ซึ่งเป็นจุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการพยากรณ์ข้อมูลใหม่

จากสรุปผลการสร้างแบบจำลอง (Model Summary) พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดประกอบด้วยจำนวนต้นไม้ 296 ต้น (Optimal number of trees) และใช้ตัวพยากรณ์ที่สำคัญ 1 ตัว เมื่อนำแบบจำลองไปทดสอบกับชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) พบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ร้อยละ 48.73 (R-squared = 48.73%) และมีความคลาดเคลื่อนในการทำนายโดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 12.14 (MAPE = 0.1214) โดยมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 0.2094 ซึ่งเป็นค่าสถิติที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ในชุดข้อมูลฝึกฝน (Training set) ซึ่งให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพและมีความสามารถในการนำไปใช้พยากรณ์กับข้อมูลชุดใหม่ได้ดี

จากรูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญสัมพัทธ์ของตัวแปร (Relative Variable Importance) ที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลอง พบว่าตัวแปร MC เป็นตัวพยากรณ์เพียงตัวเดียวที่มีความสำคัญสูงสุด โดยมีค่าความสำคัญสัมพัทธ์คิดเป็น 100% ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าความสามารถในการพยากรณ์ทั้งหมดของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปร MC เพียงตัวเดียว



รูปที่ 1 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง (Model Summary)



รูปที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความสำคัญสัมพัทธ์ของตัวแปร (Relative Variable Importance)

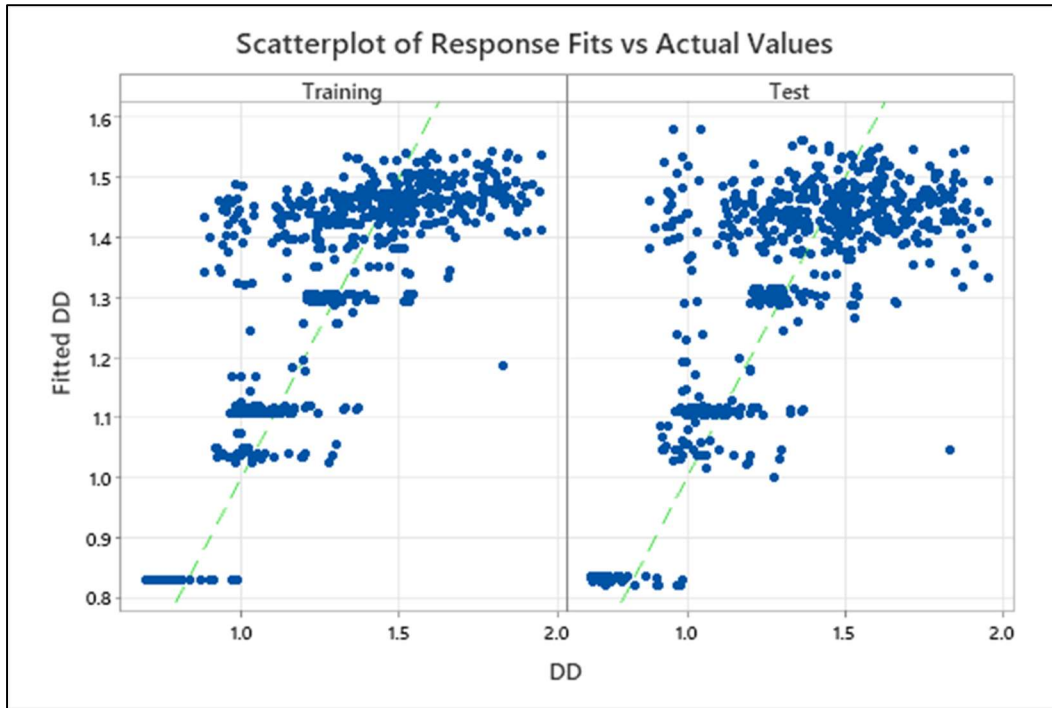
จากรูปที่ 3 แสดงผลการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองด้วยแผนภาพการกระจาย (Scatterplot) ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำนายได้ (Fitted DD) กับค่าจริง (DD) ดังแสดงในภาพ พบว่าจุดข้อมูลทั้งในชุดข้อมูลฝึกฝน (Training) และชุดข้อมูลทดสอบ (Test) มีการกระจายตัวเกาะกลุ่มตามแนวเส้นทแยงมุม ซึ่งเป็นแนวที่ค่าทำนายและค่าจริงมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ยังพบการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร โดยมีลักษณะการเกาะกลุ่มของข้อมูลเป็นแถบในแนวนอน ทั้งนี้ รูปแบบการกระจายของข้อมูลในชุดข้อมูลทดสอบมีความคล้ายคลึงกับชุดข้อมูลฝึกฝนอย่างมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นไม่มีปัญหาการเรียนรู้ที่มากเกินไป (Overfitting) และมีความสามารถในการสรุปผลเพื่อนำไปใช้ทำนายข้อมูลชุดใหม่ได้ดีในระดับหนึ่ง

จากรูปที่ 4 แสดงแผนภาพการพึ่งพาบางส่วน (Partial Dependence Plot) ซึ่งแสดงอิทธิพลของตัวแปร MC ต่อค่าเฉลี่ยของค่าพยากรณ์ (Fitted DD) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองมีลักษณะที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรง (Non-linear) อย่างชัดเจน โดยในช่วงที่ค่า MC เพิ่มขึ้นจากประมาณ 5 ถึง 10 ส่งผลให้ค่าพยากรณ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงระดับสูงสุด หลังจากนั้นค่าพยากรณ์จะค่อนข้างคงที่เมื่อ MC อยู่ในช่วง 10 ถึง 25 ก่อนจะลดลงอย่างรวดเร็วและกลับมามีค่าคงที่อีกครั้งที่ประมาณ 1.1 เมื่อค่า MC มากกว่า 32 ขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของตัวแปร MC ต่อผลลัพธ์ของแบบจำลองนั้นมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละช่วงค่าของตัวมันเอง

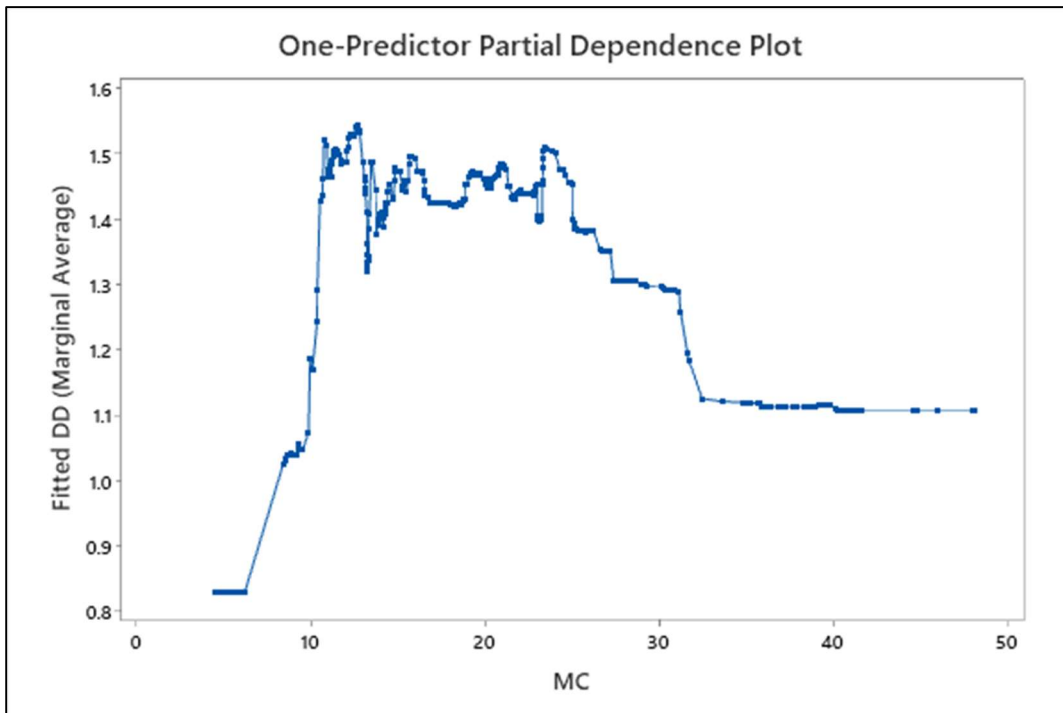
## อภิปรายผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อทำนายตัวแปรตาม (DD) จากตัวแปรอิสระ (MC) ซึ่งผลการวิเคราะห์ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ความรู้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการอธิบายความผันแปรของข้อมูลในชุดข้อมูลทดสอบได้ร้อยละ 48.73 (R-squared) และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์เฉลี่ยร้อยละ 12.14 (MAPE) ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในระดับปานกลางที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในทางปฏิบัติ จุดแข็งที่สำคัญของแบบจำลองนี้คือ ความสามารถในการสรุปผลไปยังข้อมูลใหม่ (Generalization) ดังจะเห็นได้จากค่าสถิติและลักษณะการกระจายตัวในแผนภาพ Scatterplot (รูปที่ 4) ของชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) ที่มีความคล้ายคลึงกับชุดข้อมูลฝึกฝน (Training set) อย่างมาก สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองไม่ได้เกิดภาวะการเรียนรู้ที่มากเกินไป (Overfitting) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในแบบจำลองที่ซับซ้อน และสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองได้เรียนรู้รูปแบบที่แท้จริงของข้อมูล ไม่ใช่เพียงการท่องจำข้อมูลฝึกฝนเท่านั้น



รูปที่ 3 แผนภาพการกระจาย (Scatterplot) เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำนายได้ (Fitted DD) กับค่าจริง (DD)



รูปที่ 4 แผนภาพการพึ่งพาบางส่วนที่แสดงอิทธิพลของตัวแปร MC ต่อค่าเฉลี่ยของค่าพยากรณ์



ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปร (Relative Variable Importance) ยืนยันว่า MC เป็นตัวแปรพยากรณ์เพียงตัวเดียวที่มีนัยสำคัญ (100%) ในการทำนายค่า DD การค้นพบนี้เน้นย้ำถึงความจำเป็นในการวัดค่า MC ให้มีความแม่นยำสูงสุด เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยของตัวแปรนี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang, X., et al. (2021) [1], Mahajan, R., et al. (2020) [2] และ Miller, T., et al. (2019) [3] ที่ชี้ให้เห็นว่าความแปรปรวนของผลการทดสอบการบดอัดดินมักเกิดจากปัจจัยต่างๆ เช่น ส่วนประกอบของดิน สภาพแวดล้อม หรือแม้กระทั่งผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งตัวแปร MC ในงานวิจัยนี้อาจเป็นตัวแทนของปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้

ประเด็นที่น่าสนใจที่สุดคือ ความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรง (Non-linear Relationship) ระหว่าง MC และ DD ดังที่แสดงในแผนภาพการพึ่งพาบางส่วน (Partial Dependence Plot) รูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ MC ต่อค่า DD นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงค่าต่างๆ อย่างซับซ้อน ทั้งช่วงที่ส่งผลให้ค่าพยากรณ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว, ช่วงที่คงที่ และช่วงที่ลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ลักษณะนี้ยากที่จะอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางสถิติแบบดั้งเดิม เช่น การถดถอยพหุนาม (Polynomial Regression) ที่กล่าวถึงในงานวิจัยของ Chen, W., et al. (2020) [5] และ Gupta, N., et al. (2019) [6] หรือวิธีที่อิงค่าเฉลี่ยของ Zhou, X., et al. (2021) [4] การใช้เทคนิค Machine Learning ในงานวิจัยนี้จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่ง เพราะสามารถจับรูปแบบที่ซับซ้อนเหล่านี้ได้ดีกว่า

การประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับแนวโน้มสมัยใหม่ในสาขาวิศวกรรมปฐพีที่เริ่มนำแบบจำลองขั้นสูงมาใช้ในการแก้ปัญหา ดังเช่นงานวิจัยของ Li, J., et al. (2022) [10], Alam, M., et al. (2021) [11] และ Kumar, R., et al. (2020) [12] ที่ประสบความสำเร็จในการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) ในการทำนายคุณสมบัติการบดอัดของดิน การศึกษานี้ได้ช่วยเสริมองค์ความรู้ในด้านนี้โดยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองกลุ่มต้นไม้ (Tree-based ensemble model) ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและให้ผลลัพธ์ที่สามารถตีความความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ง่ายผ่านเครื่องมืออย่าง Partial Dependence Plot แม้ว่าแบบจำลองจะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่น่าพอใจ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการ ประการแรกคือ แบบจำลองอาศัยตัวแปร MC เพียงตัวเดียว ซึ่งทำให้ค่า R-squared อยู่ในระดับปานกลาง (48.73%) และหมายความว่ายังมีความผันแปรอีกกว่า 50% ที่แบบจำลองยังไม่สามารถอธิบายได้ การวิจัยในอนาคตจึงควรพิจารณา การนำตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมีผลกระทบเข้าร่วมในการวิเคราะห์ เช่น ดัชนีพลาสติก (Plasticity Index), ปริมาณส่วนละเอียด หรือคุณสมบัติทางเคมีของดิน เพื่อเพิ่มความสามารถในการอธิบายและความแม่นยำของแบบจำลองให้สูงขึ้น ประการที่สอง การศึกษานี้ใช้แบบจำลอง Machine Learning เพียงประเภทเดียว งานวิจัยในอนาคตอาจทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองหลายๆ ประเภท เช่น การเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ANN ที่ใช้ในงานวิจัยของ Li, J., et al. (2022) [10] หรือ Support Vector Machines เพื่อค้นหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับชุดข้อมูลประเภทนี้โดยเฉพาะ

## สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อพยากรณ์ค่า DD โดยใช้ตัวแปร MC เป็นตัวแปรพยากรณ์หลักเพียงตัวเดียว แบบจำลองสุดท้ายที่ประกอบด้วยจำนวนต้นไม้ 296 ต้น มีประสิทธิภาพในการทำนายบนชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) ในระดับที่น่าพอใจ โดยสามารถอธิบายความผันแปรของข้อมูลได้ 48.73% (R-squared) และมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 12.14% (MAPE) จุดเด่นที่สำคัญคือแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสูง สามารถสรุปผลไปยังข้อมูลใหม่ได้โดยไม่เกิดภาวะการเรียนรู้ที่มากเกินไป (Overfitting) ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองได้เรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงของข้อมูล

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร MC และค่าพยากรณ์ DD มีลักษณะที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรง (Non-linear) ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถจับรูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันเป็นข้อได้เปรียบเหนือกว่าวิธีการทางสถิติแบบดั้งเดิม โดยสรุป การศึกษานี้ไม่เพียงแต่ยืนยันว่า MC เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการทำนาย แต่ยังมี

นำเสนอแบบจำลองที่มีศักยภาพเป็นเครื่องมือช่วยในการพยากรณ์ที่เชื่อถือได้ ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มความแม่นยำในอนาคตได้โดยการพิจารณาตัวแปรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมในการวิเคราะห์ต่อไป

### ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ในอนาคตมีความแม่นยำและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาการนำเข้าตัวแปรพยากรณ์เพิ่มเติม นอกเหนือจากตัวแปร MC เพียงอย่างเดียว เช่น คุณสมบัติพื้นฐานทางปฐพีกลศาสตร์ (Atterberg limits, การกระจายขนาดคละ) เพื่อเพิ่มความสามารถในการอธิบายความผันแปรของข้อมูลและเพิ่มค่า R-squared ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนานี้กับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องประเภทอื่นๆ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) และควรมีการทดสอบความทนทานของแบบจำลอง (Robustness) กับชุดข้อมูลที่มีความหลากหลายมากขึ้นทั้งในแง่ของชนิดดินและสภาพแวดล้อม เพื่อยืนยันถึงความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในวงกว้างและเพิ่มความน่าเชื่อถือของแบบจำลองต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhang, X., et al. (2021). Variability in soil composition and its impact on compaction test results. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- [2] Mahajan, R., et al. (2020). Impact of environmental conditions on soil compaction testing. *International Journal of Civil Engineering*.
- [3] Miller, T., et al. (2019). Operator-induced errors in compaction testing and standardization. *Geotechnical Testing Journal*.
- [4] Zhou, X., et al. (2021). Mean-based methods for generating standard compaction lines. *Journal of Soil Mechanics*.
- [5] Chen, W., et al. (2020). Polynomial fitting techniques in soil compaction analysis. *International Journal of Civil Engineering*.
- [6] Gupta, N., et al. (2019). Mathematical modeling of compaction curves using polynomial regression. *Soil and Foundation Journal*.
- [7] Singh, P., et al. (2021). Standard line generation for compaction curves: Statistical approaches. *Soil Mechanics Journal*.
- [8] Kim, H., et al. (2020). Computational methods for representing compaction curve variability. *Journal of Applied Soil Mechanics*.
- [9] Arshad, N., et al. (2019). Unifying compaction curves: Challenges and techniques. *Engineering Geology*.
- [10] Li, J., et al. (2022). ANN-based prediction of soil compaction properties. *Computers and Geotechnics*.
- [11] Alam, M., et al. (2021). Machine learning approaches for soil mechanics. *Artificial Intelligence in Civil Engineering*.
- [12] Kumar, R., et al. (2020). Nonlinear modeling of soil compaction using artificial neural networks. *International Journal of Geotechnical Engineering*.
- [13] Agarap, A. F. (2018). Deep Learning Using Rectified Linear Units (ReLU). *arXiv preprint arXiv:1803.08375*.

## การออกแบบและประเมินประสิทธิภาพระบบการจัดลำดับแบบผสมผสานในสายการประกอบ ยานยนต์ด้วยเทคนิคการจำลองดิจิทัล

### Design and Performance Evaluation of a Hybrid Sequencing System in an Automotive Assembly Line Using Digital Simulation Techniques

อนุศักดิ์ อุ่นแทน<sup>1\*</sup>

Anusak Ounthan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ผู้จัดการโครงการ, บริษัท อินเตอร์รอยแอล เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด (มหาชน),

กรุงเทพมหานคร, 10700, ประเทศไทย

<sup>1</sup>Project Manager, Interroyal Engineering Public Company Limited,

Bangkok, 10700, Thailand

\*Corresponding Author E-mail: anusakounthan@gmail.com

รับบทความ (Received) : November 27, 2025 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : December 22, 2025 /ตอบรับบทความ (Accepted) : December 25, 2025

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเก็บสินค้าคงคลังสำรอง (Buffer) ที่มากเกินไปในสายการประกอบยานยนต์ โดยนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ เพื่อพยากรณ์ขนาดพื้นที่พักคอยที่เหมาะสม ควบคู่ไปกับการปรับปรุงจำนวนพนักงานและกลยุทธ์การจัดลำดับการผลิต งานวิจัยเริ่มต้นจากการสร้างแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเทียบกับข้อมูลจริง จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตและเวลาการผลิต ผลการศึกษาพบว่า กลยุทธ์การจัดลำดับการผลิตแบบคละรุ่นในอัตราส่วน 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ เป็นกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถลดขนาดพื้นที่พักคอยลงได้ถึงร้อยละ 46.6 (จาก 15 เหลือ 8 ช่อง) โดยยังคงรักษาอัตราการผลิตที่ 48 คันต่อกะ ในกรณีไม่เพิ่มพนักงาน และสามารถเพิ่มยอดการผลิตเป็น 58 คันต่อกะ เมื่อมีการเพิ่มพนักงาน 1 คน นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ หลักการปิดกั้นหลังสถานีแบบปรับปรุง (Modified Blocking After Station: MBAS) ยังช่วยเพิ่มความแม่นยำในการกำหนดความต้องการพื้นที่พักคอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงเป็นเครื่องมือวางแผนที่มีคุณค่าสำหรับการจัดการความซับซ้อนของการผลิต

**คำสำคัญ :** สายการประกอบ, การผลิต, การจำลองสถานการณ์, ขนาดสินค้าคงคลังสำรอง, กลยุทธ์การจัดลำดับ

#### Abstract

This research addresses the challenge of excessive buffer inventory within an automotive assembly line by integrating discrete-event simulation (DES) with workforce optimization and production sequencing strategies. The study initially involved the development and validation of a simulation model against empirical production data to analyze throughput and cycle time efficiency. Results demonstrate that a mixed-model

sequencing strategy, utilizing a 2:1 ratio (standard vs. new model), is optimal. This configuration achieved a 46.6% reduction in buffer capacity (decreasing from 15 to 8 slots) while maintaining a consistent throughput of 48 units per shift without increasing labor requirements. Further analysis indicates that throughput can be scaled to 58 units per shift with the strategic addition of a single operator. Additionally, the application of the Modified Blocking After Service (MBAS) protocol significantly refined the accuracy of buffer requirement calculations by accounting for downstream constraints. This study provides a robust decision-support framework for managing production complexity and minimizing work-in-process (WIP) inventory in high-variability manufacturing environments.

**Keywords :** Assembly line, Manufacturing, Simulation, Buffer size, Sequencing strategies

## บทนำ

สายการประกอบยานยนต์ คือกระบวนการผลิตที่นำส่วนประกอบและชุดประกอบย่อยต่าง ๆ มาประกอบกันอย่างเป็นระบบเพื่อสร้างรถยนต์สำเร็จรูป กระบวนการนี้โดยทั่วไปเกี่ยวข้องกับชุดของ สถานีงาน (Workstations) โดยแต่ละสถานีรับผิดชอบงานเฉพาะอย่าง และตัวยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปตามสายพานลำเลียงหรือระบบอัตโนมัติอื่น ๆ เพื่อดำเนินผ่านขั้นตอนการประกอบต่าง ๆ สายการประกอบถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการผลิตรถยนต์หลายรุ่นหรือหลายรูปแบบ ซึ่งเป็นเรื่องปกติในการผลิตยานยนต์สมัยใหม่ เนื่องจากความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตรุ่นที่หลากหลายบนสายการผลิตเดียวกันถือเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการตอบสนองความต้องการของตลาดที่แตกต่างกัน

ในการผลิตยานยนต์ร่วมสมัย การบูรณาการรุ่นรถยนต์ใหม่เข้าสู่สายการผลิตที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการตอบสนองความต้องการของตลาดและการรักษาขีดความสามารถในการแข่งขัน อย่างไรก็ตาม ความท้าทายที่สำคัญเกิดขึ้นเมื่อมีการนำรุ่นใหม่ที่มีเวลาในการดำเนินการเพิ่มขึ้นเข้ามา โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพนักงานประกอบไม่คุ้นเคยเพียงพอกับรายละเอียดที่ซับซ้อนของรุ่นใหม่ ความท้าทายนี้แสดงให้เห็นในความจำเป็นที่ต้องมีขนาด สิ้นค้าคงคลังสำรอง (Buffer) ที่ใหญ่ขึ้นภายในสายการผลิต เพื่อรองรับเวลาการดำเนินการที่ยืดเยื้อและบรรเทาความหยุดชะงักที่อาจเกิดขึ้น ปัญหาที่กำลังเผชิญอยู่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์แบบพลวัตระหว่างขนาดสิ้นค้าคงคลังสำรอง ความคุ้นเคยของพนักงาน และความสำเร็จในการบูรณาการรุ่นรถยนต์ใหม่เข้าสู่กระบวนการผลิต เมื่อพนักงานเผชิญกับงานที่ไม่คุ้นเคย เวลาในการดำเนินการสำหรับการประกอบรุ่นใหม่มักจะเกินกว่ารุ่นที่จัดตั้งไว้แล้ว ซึ่งส่งผลให้จำเป็นต้องมีการปรับขนาดสิ้นค้าคงคลังสำรองเพื่อป้องกัน ภาวะคอขวด (Bottlenecks) ความล่าช้าในการผลิต และการหยุดชะงักที่อาจเกิดขึ้นต่อการไหลของการผลิตโดยรวม

กรณีศึกษานี้มุ่งเน้นที่โรงงานประกอบยานยนต์ที่เชี่ยวชาญในการผลิตรถยนต์สี่รุ่น โดยมีเป้าหมายด้านประสิทธิภาพอยู่ที่ 68 คันต่อกะ ในการดำเนินงานประจำวัน โดยทั่วไปมีการผลิตรุ่นมาตรฐานสองรุ่นเป็นคู่ (ตามที่แสดงในรูปที่ 1(ก)) ในอัตราที่คงที่ที่ 6.5 นาทีต่อคัน (ดังรูปที่ 2 (ก)) อย่างไรก็ตาม การนำรุ่นใหม่เข้ามาในรูปแบบคู่ (ตามที่แสดงในรูปที่ 1(ข)) ได้ขัดขวางอัตราการผลิตทำให้เกิดกระบวนการทำงานที่ไม่เสถียร (ดังรูปที่ 2 (ข))

สาเหตุหลักของการหยุดชะงักนี้อยู่ที่กระบวนการประกอบ ณ สถานี A1 ซึ่งรับผิดชอบการประกอบฝากระโปรงหน้าและฝากระโปรงท้าย และสถานี A2 ซึ่งจัดการการประกอบประตูและ การขันแน่นซ้ำ (Retorque) ทั้งสองสถานีจำเป็นต้องใช้เวลาเพิ่มเติมเนื่องจากความไม่คุ้นเคยกับงานใหม่ที่เกี่ยวข้องกับรุ่นที่นำเข้ามา ส่งผลให้ปริมาณงานที่ผลิตได้โดยรวมของสายการประกอบลดลงเหลือ 48 คันต่อกะ ซึ่งจำเป็นต้องมีการรวมสิ้นค้าคงคลังสำรองระหว่างสายหลักกับสถานี A1

ตามข้อมูลที่ได้รับจากบริษัทกรณีศึกษา ขนาดสินค้าคงคลังสำรองถูกกำหนดไว้ที่ 10 คัน อย่างไรก็ตาม การจำลองสถานการณ์เบื้องต้น (ตามรายละเอียดในตารางที่ 1) เปิดเผยว่าพื้นที่สินค้าคงคลังสำรองถูกใช้งานเต็ม 10 คันอย่างสม่ำเสมอ คิดเป็นร้อยละ 56 ของเวลา (เทียบเท่ากับ 7 ชั่วโมง 36 นาที) ยิ่งไปกว่านั้น ยังมีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่เพิ่มเติมอีก 3 ช่อง ซึ่งนำไปสู่การขยายเวลาออกไป 72.96 นาที ซึ่งเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการตรวจสอบและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตต่อไป

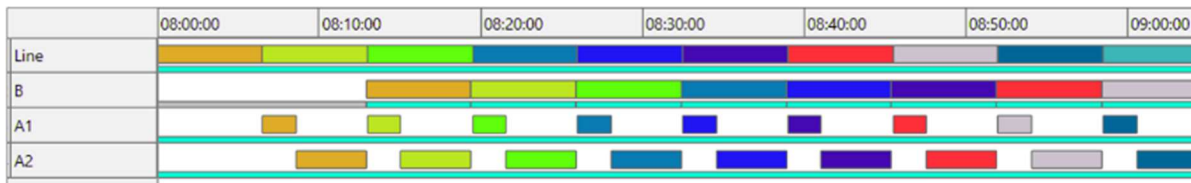
การศึกษานี้ได้อธิบายระเบียบวิธีที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองที่สะท้อนคุณลักษณะของสายการประกอบยานยนต์ คุณลักษณะเหล่านี้ครอบคลุมถึง การควบคุมการไหลแบบดั้งเดิม (Classic Flow Line Control) การกำหนด อุปทานแบบมีให้ตลอดเวลา (Saturated Supply) และ การแจกแจงความน่าจะเป็นของเวลาการทำงาน (Processing Time Distribution) โดยไม่รวมประเภทการปิดกั้นจากอุปสงค์ แต่รวมเอาแนวคิดของ สายการผลิตที่เชื่อถือได้ (Reliable Line) เข้าไปด้วย โดยกำหนดให้อุปสงค์เป็นแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated) เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกลยุทธ์การจัดลำดับที่หลากหลาย

เพื่อเพิ่มความสมจริงของแบบจำลอง ประเภทการปิดกั้นซึ่งเดิมคือ หลักการปิดกั้นหลังให้บริการ (Blocking After Service: BAS) ถูกปรับเปลี่ยนผ่านการเพิ่ม พื้นที่พักคอยจำลอง (Dummy Buffer) ซึ่งเรียกว่า สินค้าคงคลังสำรองแบบผันแปร (Variable Buffer) สินค้าคงคลังสำรองแบบผันแปรนี้มีบทบาทสำคัญในการกำหนดความต้องการพื้นที่พักคอย นอกจากนี้ยังมีการนำแนวคิดของสายการผลิตที่เชื่อถือได้เข้ามาใช้ โดยมีการรวมการทดลองที่เกี่ยวข้องกับกลยุทธ์การจัดลำดับและขนาดพนักงาน

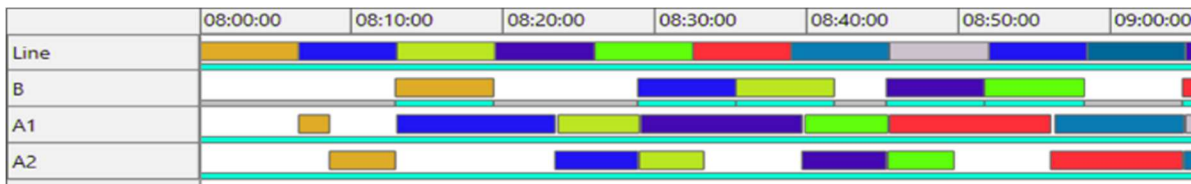
วัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือการนำเสนอข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าเกี่ยวกับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างกลยุทธ์การจัดลำดับและขนาดพนักงานและผลกระทบต่อขนาดสินค้าคงคลังสำรอง ปริมาณผลผลิต และอัตราการผลิต สิ่งนี้สำเร็จได้ผ่านแนวทางจำลองสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดปริมาณผลผลิตให้คงที่ ขณะที่อนุญาตให้อัตราการผลิตเป็นพลวัต และการกำหนดอัตราการผลิตให้คงที่ ขณะที่นำเสนอความแปรปรวนในปริมาณผลผลิต



รูปที่ 1 สายการประกอบยานยนต์ (ก) กรณีไม่มีรุ่นใหม่ (ข) กรณีมีรุ่นใหม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 อัตราการผลิต (ก) ที่เสถียร (ข) ไม่เสถียร

**ตารางที่ 1** การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายการประกอบโดยมีและไม่มีรุ่นใหม่

กรณี	ปริมาณงานที่ผลิตได้ (คัน)	การใช้สถานีงาน เปอร์เซ็นต์ (%)				สินค้าคงคลังสำรอง		สินค้าคงคลังสำรอง ที่ต้องการ (ช่อง)
		Main	A1	A2	B	ที่ใช้ (ช่อง)	Avg (%)	
ไม่มีรุ่นใหม่	68	100	100	100	98	0	0	0
มีรุ่นใหม่	48	100	100	100	68	10	56	3

## 1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อออกแบบและประเมินประสิทธิภาพของกลยุทธ์การจัดลำดับการผลิต
- 1.2 เพื่อพัฒนารอบแนวทางในการพยากรณ์และกำหนดความต้องการสินค้าคงคลังสำรอง

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมการไหลแบบดั้งเดิม (Classic Flow Line Control: FC) หมายถึงการจัดการและการประสานงานกิจกรรมต่าง ๆ ในสายการผลิตแบบไหลหรือสายการประกอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของวัสดุและชิ้นงานอย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพตลอดขั้นตอนการผลิต [1-5]

CONWIP (Constant Work-In-Process) ย่อมาจากงานระหว่างทำคงที่ เป็นระบบควบคุมการผลิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อจัดการและควบคุมการไหลของงานระหว่างทำ (WIP) ในสายการผลิตเป็นระบบแบบดึง (pull-based system) ที่มุ่งเป้าไปที่การรักษาระดับงานระหว่างทำให้คงที่ตลอดสายการผลิต [6-9]

อุปทานอิ่มตัว (Saturated Supply) หมายถึงสถานการณ์ที่มีวัตถุดิบหรือทรัพยากรป้อนเข้าจำนวนมากและโดยพื้นฐานแล้วมีไม่จำกัด ณ จุดก่อนหน้าสถานีแรกหรือจุดเริ่มต้นของสายการผลิต [2,3] สำหรับบางกรณี สถานีแรกอาจเกิดภาวะวัตถุดิบขาดแคลน (starve) เนื่องจากขาดแคลนวัตถุดิบ [10,11] หรือเนื่องจากนโยบายการสั่งซื้อที่จัดการการมาถึงของชิ้นงาน [1]

อุปสงค์อิ่มตัว (Saturated Demand) หมายถึงสถานการณ์ที่ความต้องการผลิตภัณฑ์หรือบริการสูงอย่างต่อเนื่องและถึงหรือเกินขีดความสามารถในการผลิตของระบบ [2,3] สำหรับบางกรณี สถานการณ์อุปสงค์ไม่อิ่มตัว (unsaturated demand) เทียบเท่ากับกรณีของสินค้าคงคลังสำรองที่มีความจุแบบเอ็กซีโปเนนเชียลหรือล็อกอินมอลอยู่ด้านหลังสถานีสุดท้าย [12,13]

Blocking After Service (BAS) เกิดขึ้นเมื่อสินค้าคงคลังสำรองเต็มและสถานีต้นน้ำยังคงดำเนินการกับชิ้นงานเพิ่มเติมต่อไป อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์แล้วไม่สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ เนื่องจากไม่มีพื้นที่ว่างในสินค้าคงคลังสำรองปลายน้ำ [1,2]

Blocking Before Service (BBS) หมายถึงการดำเนินการกับชิ้นงานจะสามารถเริ่มได้ก็ต่อเมื่อมีพื้นที่ว่างในสินค้าคงคลังสำรองปลายน้ำเท่านั้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือสถานีต้นน้ำจะตรวจสอบความพร้อมของสินค้าคงคลังสำรองก่อนที่จะเริ่มดำเนินการกับชิ้นงานใหม่ [3,14]

สายการผลิตที่เชื่อถือได้ (Reliable Line) หมายถึงสายการผลิตที่มีลักษณะเด่นคือประสิทธิภาพที่สม่ำเสมอ เวลาการทำงานของอุปกรณ์สูง ปริมาณงานที่ผลิตได้ที่คาดการณ์ได้ การใช้ทรัพยากรที่เหมาะสมและการวางแผนการผลิตที่มีประสิทธิภาพ [3,14,2,1]

สายการผลิตที่ไม่น่าเชื่อถือ (Unreliable Line) หมายถึงสายการผลิตที่มีลักษณะเด่นคือประสิทธิภาพที่ไม่สม่ำเสมอ มีการหยุดทำงานบ่อยครั้ง ปริมาณงานที่ผลิตได้ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ ความท้าทายในการใช้ทรัพยากร ปัญหาความแปรปรวนและความยากลำบากในการวางแผนการผลิต [5,15,10]

การกระจายเวลาในการดำเนินการ (Processing Time Distribution) หมายถึงรูปแบบทางสถิติหรือแบบจำลองที่อธิบายว่าเวลาในการดำเนินการของงาน/งานย่อย/การดำเนินการมีการกระจายตัวอย่างไรภายในระบบหรือกระบวนการ [1-5,14]

การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Event Simulation) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงปริมาณงานที่ผลิตได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองของระบบและจำลองการดำเนินงานเพื่อระบุคอขวดและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร [16-18] ปริมาณงานที่ผลิตได้หมายถึงอัตราที่ระบบสามารถประมวลผลหรือผลิตผลลัพธ์ได้ ด้วยการจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง นักวิจัยสามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความน่าเชื่อถือของระบบสินค้าคงคลังสำรอง เวลาว่างรอบ และเวลาการผลิตต่อปริมาณงานที่ผลิตได้

นอกจากนี้การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่องยังสามารถใช้เพื่อลดเวลาการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เมื่อพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตใหม่ การใช้การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่องพร้อมกับระเบียบวิธีที่ปรับปรุงแล้วสามารถให้ข้อมูลป้อนกลับที่มีคุณค่าและช่วยในการประเมินการลงทุนในเทคโนโลยีใหม่ [19] ยิ่งไปกว่านั้นในระบบโลจิสติกส์ เช่น คลังสินค้า การจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่องได้ถูกใช้เพื่อสร้างแบบจำลองและประเมินการดำเนินการหยิบสินค้า ซึ่งส่งผลให้เวลาการดำเนินงานและระยะทางการเดินของผู้หยิบสินค้าลดลง [20]

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การสร้างแบบจำลองระบบการผลิต

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ครอบคลุมคุณลักษณะสำคัญของการควบคุมสายการผลิตแบบไหลตามลำดับ (Classic Flow Line Control) โครงสร้างของระบบประกอบด้วย สายการผลิตหลัก (Main-line) พื้นที่พักคอยจำนวน 10 ช่อง สถานีงาน A1 พื้นที่พักคอยย่อยจำนวน 1 ช่อง และสถานีงาน A2 ตามลำดับ โดยมีแหล่งกำเนิดชิ้นงาน (Source) ทำหน้าที่ป้อนงานเข้าสู่สายการผลิตหลักในรูปแบบอุปทานแบบมีให้ตลอดเวลา (Saturated Supply) โดยมีการสลับระหว่างรถยนต์รุ่นปกติและรุ่นใหม่ในอัตราส่วน 1:1 นอกจากนี้ ความน่าเชื่อถือของสายการผลิตในแบบจำลองถูกกำหนดให้ไม่มีความล้มเหลวของเครื่องจักร (Zero Failure) เพื่อมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบจากกระบวนการประกอบเพียงอย่างเดียว

ข้อสมมติฐานของแบบจำลองถูกกำหนดไว้ 2 ประการ ได้แก่ 1) การกำหนดจุดสิ้นสุดกระบวนการ (Drain) ให้เป็นแบบอุปสงค์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Demand) หรือสามารถรับของได้ตลอดเวลา โดยมีเกณฑ์การยุติแบบจำลองเมื่อผลิตรถยนต์รุ่นปกติครบ 24 คัน และรถยนต์รุ่นใหม่ 24 คัน และ 2) การกำหนดเงื่อนไขด้านเวลา โดยจะยุติการจำลองเมื่อเวลาการผลิตครบ 7 ชั่วโมง 36 นาที ซึ่งสอดคล้องกับเวลาทำงานจริงในหนึ่งกะ

### 2. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation)

เพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถเป็นตัวแทนของระบบจริงได้ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) ก่อนนำไปใช้ทดสอบสมมติฐาน โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองในสถานการณ์ปัจจุบัน (Baseline) กับข้อมูลจริงที่เก็บรวบรวมจากโรงงาน

### 3. การวิเคราะห์ข้อมูลเวลาการทำงาน

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลเวลาในการดำเนินการ (Processing Time) สำหรับรถยนต์รุ่นใหม่และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์การแจกแจงความน่าจะเป็น (Fitting Distribution) โดยใช้วิธีปัญหาคกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square Error) เพื่อหาตัวแทนข้อมูลที่เหมาะสมที่สุด ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของเวลาในการดำเนินการสำหรับรถยนต์รุ่นปกติในสถานีงาน A1 และ A2 โดยมีการกำหนดค่าที่แตกต่างกันสำหรับกรณีใช้พนักงาน 2 คนและ 3 คน สำหรับเวลาในการดำเนินการของรถยนต์รุ่นใหม่จะถูกกำหนดผ่านสมการทางคณิตศาสตร์ที่ระบุไว้อย่างชัดเจนภายในแบบจำลอง

#### 4. การกำหนดพื้นที่พักคอยและหลักการ MBAS

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ หลักการปิดกั้นหลังสถานีแบบปรับปรุง (Modified Blocking After Station: MBAS) ซึ่งจำแนกประเภทของพื้นที่พักคอย (Buffer) ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ พื้นที่พักคอยแบบคงที่ (Fixed Buffer) และพื้นที่พักคอยแบบผันแปร (Variable Buffer) พื้นที่พักคอยแบบคงที่หมายถึงขนาดพื้นที่พักคอยจริงที่มีอยู่ในสายการผลิต ในขณะที่พื้นที่พักคอยแบบผันแปรเป็นตัวบ่งชี้ถึงความต้องการพื้นที่พักคอยที่จำเป็น (Required Buffer) การจำแนกเช่นนี้มีความจำเป็นเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของสายการผลิตหลักที่ควบคุมด้วยระบบสายพานลำเลียงและหุ่นยนต์ที่มีข้อจำกัดด้านเวลาที่แน่นอน ทำให้ไม่สามารถหยุดการทำงานโดยสมบูรณ์ได้ในทันที

#### 5. การกำหนดสถานการณ์จำลอง

การทดลองด้วยแบบจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ได้กำหนดสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบร่วมกันระหว่างกลยุทธ์การจัดลำดับการผลิตและขนาดของกำลังคน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3 โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนด "กลยุทธ์การจัดลำดับแบบคละรุ่น" โดยอ้างอิงอัตราส่วนการผลิตที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) รุ่นปกติ 1 คันต่อรุ่นใหม่ 1 คัน (1:1), 2) รุ่นปกติ 2 คันต่อรุ่นใหม่ 1 คัน (2:1) และ 3) รุ่นปกติ 1 คันต่อรุ่นใหม่ 2 คัน (1:2) นอกจากนี้ ยังได้กำหนดตัวแปรด้านจำนวนพนักงานเพื่อแก้ปัญหาคอขวดตามวิธีดั้งเดิม โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้พนักงาน 2 คน และ 3 คน เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 2 เวลาในการดำเนินการของแต่ละสถานีงานและจำนวนพนักงานที่แตกต่างกัน

รุ่น	สถานีงาน			
	A1		A2	
	พนักงาน 2 คน	พนักงาน 3 คน	พนักงาน 2 คน	พนักงาน 3 คน
ปกติ	150	90	270	225
ใหม่	596 + EXPO(63.4)	332 + WEIB(56.1, 0.713)	535 + EXPO(54.5)	289 + EXPO(55.6)

ตารางที่ 3 การกำหนดสถานการณ์จำลองที่แตกต่างกันสำหรับการทดลอง

กลยุทธ์	สถานการณ์จำลอง											
	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
รุ่นปกติ	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
รุ่นใหม่	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2
พนักงานสถานี A1	2	2	2	3	3	3	2	2	2	3	3	3
พนักงานสถานี A2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3

#### 6. แนวทางการวิเคราะห์ข้อมูล

กรอบแนวคิดในการวิเคราะห์ผลการศึกษประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์เวลาการผลิต (Production Time Analysis) และ การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต (Throughput Analysis) โดยทั้งสองแนวทางมีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์อัตราการใช้งานและความต้องการพื้นที่พักคอย (Buffer) ที่เหมาะสม การวิเคราะห์เวลาการผลิตมุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่พักคอยกับเวลาที่ใช้ในการผลิตรวม ในขณะที่การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิตจะมุ่งเน้นอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างขนาดพื้นที่พักคอยกับยอดการผลิตที่ได้ การบูรณาการแนวทางทั้งสองเข้าด้วยกันช่วยให้ผู้วิจัยสามารถทำความเข้าใจพลวัตภายในแบบจำลองการประกอบได้อย่างครอบคลุมและแม่นยำ



## ผลการวิจัย

### 1. การวิเคราะห์เวลาการผลิต (Production Time Analysis)

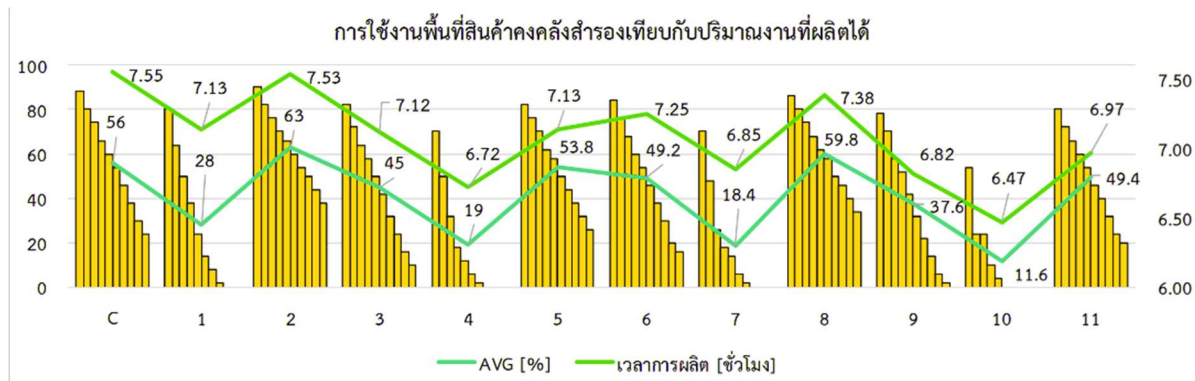
จากการทดลองจำลองสถานการณ์เพื่อเปรียบเทียบกลยุทธ์การจัดลำดับการผลิตและขนาดจำนวนพนักงานที่แตกต่างกัน ผลการวิเคราะห์ใน รูปที่ 3 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างการใช้พื้นที่พักคอย (Buffer Usage) กับเวลาในการผลิต (Production Time) โดยพบว่าสถานการณ์ที่มีอัตราการใช้พื้นที่พักคอยต่ำ จะใช้เวลาในการผลิตรวมที่สั้นกว่าด้วย

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกลยุทธ์ (ดังแสดงใน รูปที่ 4) พบว่า "กลยุทธ์การจัดลำดับแบบ 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ (2:1)" เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีรายละเอียดการเปรียบเทียบดังนี้:

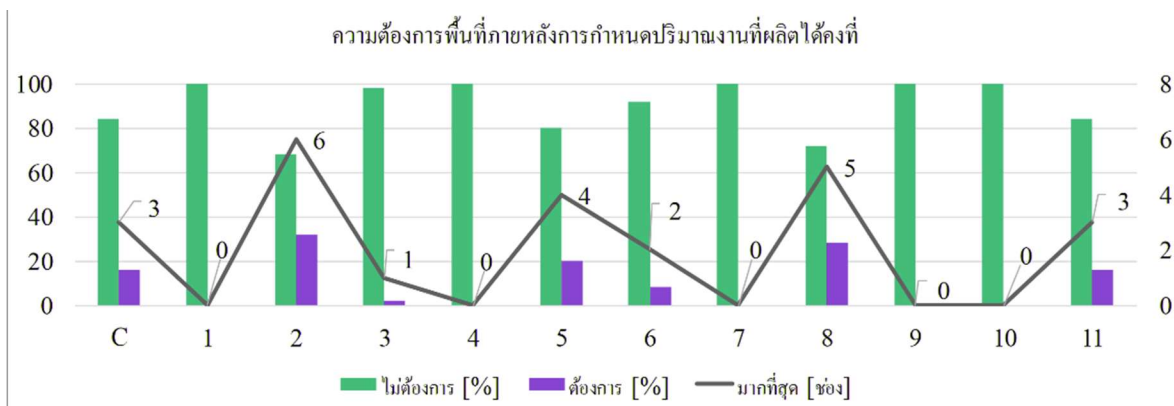
การเปรียบเทียบระหว่างกลยุทธ์: ในสถานการณ์จำลองที่ 1 (ใช้อัตราส่วน 2:1) มีประสิทธิภาพเหนือกว่าสถานการณ์จำลองที่ 2 (ใช้อัตราส่วน 1:2) อย่างชัดเจน โดยสถานการณ์ที่ 1 สามารถลดเวลาการผลิตและลดการใช้พื้นที่พักคอยได้ดีกว่า

การเปรียบเทียบด้านกำลังคน: แม้ว่าการเพิ่มจำนวนพนักงานในสถานการณ์จำลองที่ 3, 6 และ 9 จะช่วยลดการใช้พื้นที่พักคอยลงได้เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น (Baseline) แต่ผลลัพธ์ที่ได้ก็ ยังไม่ดีเท่ากับ ผลลัพธ์ในสถานการณ์จำลองที่ 1 ที่ใช้เพียงการปรับกลยุทธ์การจัดลำดับโดยไม่ต้องเพิ่มคน

จุดที่น่าสนใจที่สุดปรากฏใน รูปที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การใช้อัตราส่วน 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ (ดังปรากฏในสถานการณ์จำลองที่ 1, 4, 7 และ 10) ส่งผลให้ ความต้องการพื้นที่พักคอยลดลงจนเหลือศูนย์ (Zero Buffer Requirement) ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าการปรับปรุง "กลยุทธ์การจัดลำดับ" มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาคอขวดมากกว่าการมุ่งเน้นเพียง "การเพิ่มจำนวนพนักงาน" เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้งานพื้นที่สินค้าคงคลังสำรองกับเวลาการผลิต



## รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการพื้นที่กับเวลาการผลิต

### 2. การวิเคราะห์ปริมาณผลผลิต (Throughput Analysis)

จากการกำหนดเวลาการผลิตให้คงที่เพื่อวิเคราะห์ความแปรผันของปริมาณผลผลิต พบว่าการเลือกใช้ กลยุทธ์การจัดลำดับแบบ 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ มีประสิทธิภาพสูงอย่างเห็นได้ชัด โดยสามารถเพิ่มยอดการผลิตได้ 4 คันต่อกะ (จากเดิม 48 เป็น 52 คัน) ดังแสดงในรูปที่ 8(ก) และเมื่อนำกลยุทธ์นี้มาใช้ร่วมกับการเพิ่มจำนวนพนักงาน (ดังปรากฏในสถานการณ์จำลองที่ 4, 7 และ 10) จะสามารถเพิ่มยอดการผลิตได้สูงสุดถึง 10 คันต่อกะ (เป็น 58 คัน)

ผลการวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นประเด็นสำคัญว่า การเพิ่มจำนวนพนักงานเพียงอย่างเดียว ที่สถานี A1, A2 หรือทั้งสองสถานี โดยไม่ปรับกลยุทธ์การจัดลำดับ ไม่ส่งผล ให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น สถานการณ์จำลองที่ 4, 7 และ 10 จึงมีความโดดเด่นที่สุด เนื่องจากมีอัตราการใช้พื้นที่พักคอยต่ำที่สุด (รูปที่ 8(ข)) มีประสิทธิภาพการใช้สถานีงานสูงสุด (รูปที่ 8(ค)) และที่สำคัญคือ ไม่มีความต้องการพื้นที่พักคอย (Zero Buffer Requirement) ดังแสดงในรูปที่ 8(ง)

### 3. การวิเคราะห์แผนการผลิต (Production Plans)

ผู้วิจัยได้นำผลจากการจำลองสถานการณ์มาสังเคราะห์เป็นแผนการผลิตทางเลือก และวิเคราะห์เปรียบเทียบความคุ้มค่า ดังสรุปในตารางที่ 4 โดยจำแนกเป็น 5 แผนการดำเนินงานที่น่าสนใจดังนี้

แผนที่ 1 (อ้างอิงสถานการณ์จำลองที่ 1): เป็นแผนที่เน้นความประหยัดสูงสุด โดยใช้กลยุทธ์การจัดลำดับแบบ 2:1 และ ไม่มีการเพิ่มพนักงาน ผลลัพธ์ที่ได้คือยอดผลิต 52 คันต่อกะ โดยมีความต้องการใช้พื้นที่พักคอยเพิ่มเติมเพียง 5 ช่อง ในระยะเวลาสั้นๆ เพียง 0.47 ชั่วโมง (28 นาที) ส่วนเวลาที่เหลืออีก 7.13 ชั่วโมง ไม่มีความต้องการใช้พื้นที่พักคอย จุดเด่นของแผนนี้คือ ไม่มีต้นทุนค่าแรงงานเพิ่ม

แผนที่ 2 และ 3 (อ้างอิงสถานการณ์จำลองที่ 4 และ 7): ทั้งสองแผนใช้กลยุทธ์ 2:1 ร่วมกับการเพิ่มพนักงาน 1 คน (ที่สถานี A1 หรือ A2 อย่างใดอย่างหนึ่ง) ผลลัพธ์ที่ได้คือยอดผลิตสูงสุดที่ 58 คันต่อกะ โดยตลอดเวลาการทำงาน 7.6 ชั่วโมง ไม่มีความต้องการใช้พื้นที่พักคอยเลย แผนนี้มีต้นทุนเพิ่มขึ้นเพียงค่าแรงของพนักงาน 1 คนแลกกับยอดผลิตที่เพิ่มขึ้นสูงสุด

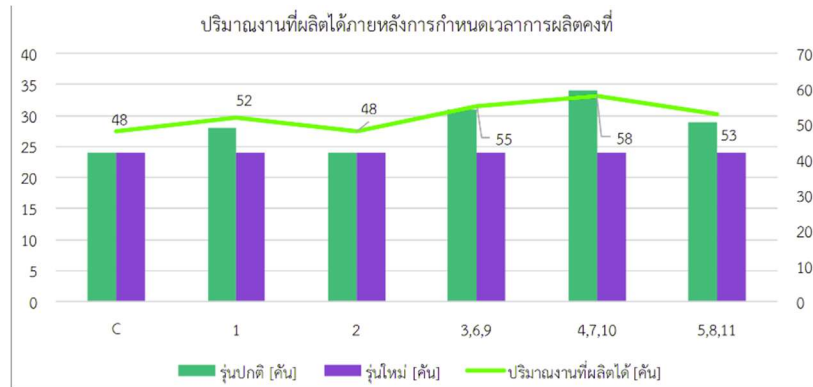
แผนที่ 4 (อ้างอิงสถานการณ์จำลองที่ 9): ใช้กลยุทธ์ 1:1 และเพิ่มพนักงาน 2 คน ได้ผลผลิต 55 คันต่อกะ ซึ่งถือว่าไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับแผนอื่น เนื่องจากใช้คนมากแต่ได้ผลผลิตน้อยกว่า และยังต้องมีการใช้พื้นที่พักคอยเพิ่มเติมอีก 0.78 ชั่วโมง

แผนที่ 5 (อ้างอิงสถานการณ์จำลองที่ 10): ใช้กลยุทธ์ 2:1 และเพิ่มพนักงาน 2 คน แม้จะได้ผลผลิตสูงสุดที่ 58 คันต่อกะ และไม่มีความต้องการพื้นที่พักคอย แต่ถือว่า มีความสูญเปล่า เมื่อเทียบกับแผนที่ 2 และ 3 เพราะใช้พนักงานมากกว่า 1 คนแต่ได้ผลลัพธ์เท่ากัน

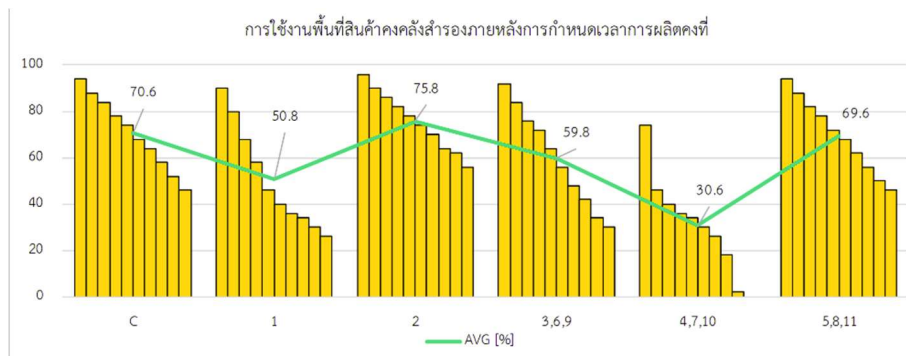
ตารางที่ 4 สรุปผลลัพธ์ของสถานการณ์จำลองต่าง ๆ

สถานการณ์จำลอง	กลยุทธ์		จำนวนพนักงาน		กำหนดปริมาณงานที่ผลิตได้คงที่ที่ 48 คัน				กำหนดเวลาการผลิตคงที่ที่ 7.6 ชั่วโมง			
					สินค้าคงคลังสำรอง		เวลาการผลิต (ชั่วโมง)	สินค้าคงคลังสำรอง		ปริมาณงานที่ได้ (คัน)		
	จริง	ที่ต้องการ (ช่อง)	จริง	ที่ต้องการ (ช่อง)								
	รุ่นปกติ	รุ่นใหม่	A1	A2	การใช้งาน (ช่อง)	Avg (%)	การใช้งาน (ช่อง)	Avg (%)				
C	1	1	2	2	10	56.0	3	7.55	10	70.6	9	48
1	2	1	2	2	8	28.0	0	7.13	10	50.8	5	52

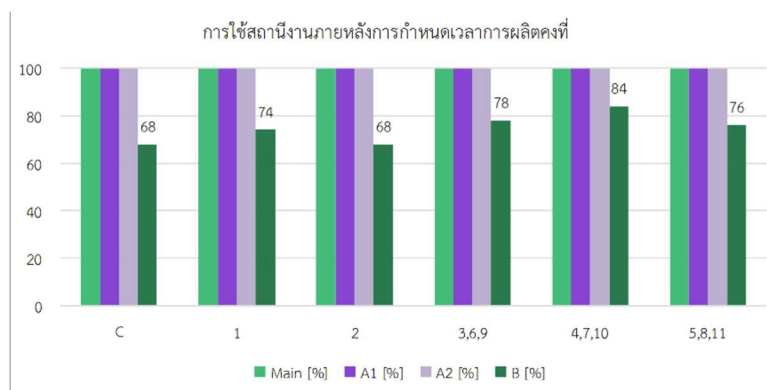
4	2	1	3	2	7	19.0	0	6.72	9	30.6	0	58
7	2	1	2	3	7	18.4	0	6.85	9	30.6	0	58
9	1	1	3	3	10	37.6	0	6.82	10	59.8	2	55
10	2	1	3	3	5	11.6	0	6.47	9	30.6	0	58



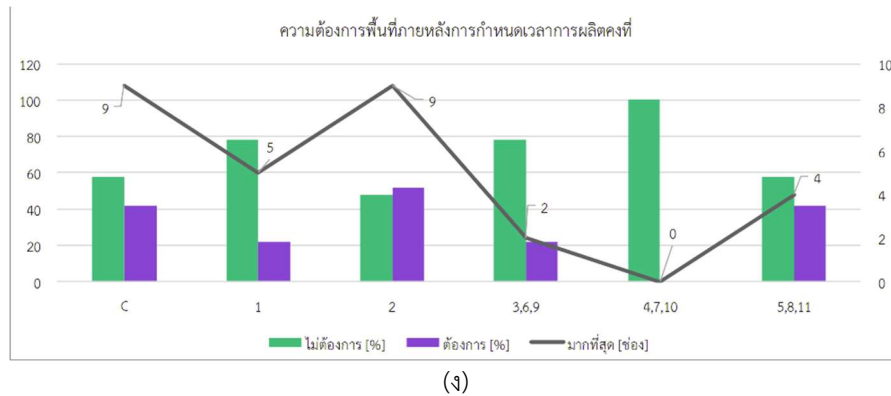
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ภายใต้การกำหนดเวลาการผลิตคงที่ (ก) ปริมาณงานที่ผลิตได้ (ข) การใช้งานพื้นที่สินค้าคงคลังสำรอง (ค) การใช้สถานีงาน (ง) ความต้องการพื้นที่

## อภิปรายผล

1. ประสิทธิภาพของกลยุทธ์การจัดลำดับการผลิตแบบคละรูน (Mixed-Model Sequencing Efficiency) จากผลการวิจัยที่พบว่า กลยุทธ์การจัดลำดับแบบ 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ (2:1) เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถอภิปรายได้ว่า ความสำเร็จนี้เกิดจากกลไก การเกลี่ยภาระงาน (Load Balancing) ที่เหมาะสมภายในสายการผลิต เนื่องจากการประกอบรถยนต์ "รุ่นใหม่" ต้องใช้เวลาในการดำเนินการ (Processing Time) ที่ยาวนานกว่าปกติ จนทำให้เกิดการสะสมงานและภาวะคอขวดสะสม (Cumulative Bottleneck) การจัดลำดับโดยแทรก "รุ่นปกติ" จำนวน 2 คัน ซึ่งใช้เวลาประกอบน้อยกว่า เข้าไประหว่างกลาง เปรียบเสมือนการสร้าง ช่วงเวลาพักฟื้น (Recovery Time) ให้กับสถานีงาน ช่วยให้พนักงานสามารถเคลียร์งานที่ค้างคั่งจากรุ่นใหม่ได้ทันเวลา ก่อนที่จะเริ่มประกอบรุ่นใหม่คันถัดไป กลยุทธ์นี้จึงช่วยลดการพึ่งพาสินค้าคงคลังสำรอง (Buffer) ลงได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลยุทธ์แบบ 1:1 หรือ 1:2 ที่ภาระงานหนักเกินไปจนระบบระบายไม่ทัน

2. ความคุ้มค่าระหว่างการเพิ่มพนักงานกับการปรับปรุงกระบวนการ (Cost-Benefit Analysis: Workforce vs. Process Optimization) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นประเด็นที่น่าสนใจด้านการบริหารจัดการต้นทุน โดยพบว่าการแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มจำนวนพนักงาน (Manpower Addition) ตามแนวทางดั้งเดิม แม้จะช่วยเพิ่มยอดการผลิตได้ แต่ก็แลกมาด้วยต้นทุนค่าแรงที่สูงขึ้นและยังคงมีความสูญเสียเปล่าในกระบวนการ ในทางตรงกันข้าม การปรับปรุงที่ "กลยุทธ์การจัดลำดับ" (Sequence Optimization) สามารถลดความต้องการพื้นที่พักคอยลงจนเหลือศูนย์และรักษาระดับผลผลิตได้โดย ไม่ต้องเพิ่มต้นทุนด้านแรงงาน ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า การจัดการปัญหาคอขวดที่มีสาเหตุจากความแปรปรวนของเวลาการทำงาน (Work Time Variation) ควรเริ่มต้นจากการจัดตารางการผลิตที่สอดคล้องกับขีดความสามารถของพนักงาน ก่อนที่จะพิจารณาลงทุนเพิ่มกำลังคน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการผลิตแบบลีน (Lean Manufacturing) ที่มุ่งเน้นการจัดความสูญเสียเปล่าก่อนการเพิ่มทรัพยากร

3. บทบาทของหลักการ MBAS ต่อความแม่นยำในการพยากรณ์ การนำ หลักการปิดกั้นหลังสถานีแบบปรับปรุง (Modified Blocking After Station: MBAS) มาใช้ร่วมกับแนวคิด สินค้าคงคลังสำรองแบบผันแปร (Variable Buffer) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถระบุขนาดพื้นที่พักคอยที่เหมาะสมที่สุดได้แม่นยำกว่าแบบจำลองทั่วไป แบบจำลองดั้งเดิม (Traditional BAS) มักกำหนดขนาดบัฟเฟอร์แบบตายตัว (Fixed Capacity) ซึ่งอาจนำไปสู่การจัดเตรียมพื้นที่เกินความจำเป็น (Over-design) แต่ MBAS ช่วยให้เห็นพฤติกรรมจริงของระบบว่าในแต่ละช่วงเวลาต้องการพื้นที่เท่าใด ทำให้ผู้วิจัยสามารถสรุปผลได้อย่างมั่นใจว่า การลดขนาดพื้นที่พักคอยจาก 15 ช่อง เหลือ 8 ช่อง (ลดลงร้อยละ 46.6) เป็นสิ่งที่ทำได้จริงและปลอดภัยต่อสายการผลิต การค้นพบนี้ช่วยยืนยันว่า MBAS เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงสายการประกอบที่มีความซับซ้อนสูง

4. เวลาในการดำเนินการ (Operation Time) เป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถของระบบการผลิต การแจกแจงของเวลานี้สะท้อนความไม่แน่นอนจากทั้งเครื่องจักร พนักงาน และสภาพแวดล้อมในการผลิต โดยทั่วไปการแจกแจงเวลาการดำเนินการมักอ้างอิงตามงานวิจัยก่อนหน้า [1-5,14] ซึ่งเสนอรูปแบบการแจกแจง เช่น Normal, Exponential, Gamma หรือ Weibull Distribution ขึ้นอยู่กับลักษณะของกระบวนการผลิต ในงานวิจัยนี้การแจกแจงเวลาการดำเนินการถูกใช้เพื่อจำลองสถานการณ์ของ การประกอบผลิตภัณฑ์รุ่นใหม่ (New Product Assembly) ซึ่งมักมีความไม่แน่นอนสูงจากการขาดประสิทธิภาพของพนักงานหรือการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ การใช้การแจกแจงเวลาที่เหมาะสมช่วยให้แบบจำลองสะท้อนสภาพการผลิตจริงได้ดียิ่งขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของเวลาเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้อย่างถูกต้อง

5. การวิเคราะห์ปริมาณงานที่ผลิตได้ (Throughput Analysis) ถือเป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินประสิทธิภาพของสายการผลิต โดยเฉพาะในระบบที่มีสินค้าคงคลังสำรอง (Buffer Inventory System) ซึ่งมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องในงานวิจัยหลายฉบับ [16-18] การวิเคราะห์นี้ช่วยให้สามารถระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการผลิต เช่น ความจุบัฟเฟอร์ ระดับการปิดกั้น (Blocking Level) และความไม่น่าเชื่อถือของสถานีงาน ในขณะเดียวกัน การวิเคราะห์เวลาการปฏิบัติการ (Operation Time Analysis) ใช้เพื่อประเมินเวลาที่ใช้ในการผลิตหนึ่งหน่วยผลิตภัณฑ์หรือเวลารวมของกระบวนการทั้งหมดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด เช่น ปริมาณงานคงที่หรือกลยุทธ์การทำงานแบบต่อเนื่อง [20] การผสมผสานการวิเคราะห์ทั้งสองแนวทางเข้าด้วยกันช่วยให้สามารถสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบ รวมถึงการวางแผนปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดคอขวด (Bottleneck) และเพิ่มผลผลิตโดยรวมของสายการผลิตได้อย่างเป็นระบบ

## สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อแก้ไขปัญหาการจัดเก็บสินค้าคงคลังสำรอง (Buffer) ที่มากเกินไปในสายการประกอบยานยนต์ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) เพื่อพยากรณ์ความต้องการพื้นที่พักคอยที่เหมาะสม ควบคู่ไปกับการพัฒนา หลักการปิดกั้นหลังสถานีแบบปรับปรุง (Modified Blocking After Station: MBAS) ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์และจำแนกความต้องการพื้นที่พักคอยจริงและพื้นที่พักคอยแฝงได้อย่างแม่นยำ

ผลการศึกษาพบว่า กลยุทธ์การจัดลำดับการผลิตแบบคละรูนในอัตราส่วน 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ (2:1) เป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากสามารถเกลี่ยภาระงาน (Workload Balancing) และลดเวลาที่เสียไปจากการประกอบรุ่นใหม่ได้ดีที่สุด โดยผลลัพธ์เชิงปริมาณชี้ให้เห็นว่า กลยุทธ์นี้สามารถลดขนาดพื้นที่พักคอยลงได้ถึง ร้อยละ 46.6 (ลดลงจาก 15 ช่อง เหลือเพียง 8 ช่อง) โดยไม่กระทบต่ออัตราการผลิตเป้าหมาย ในกรณีไม่เพิ่มพนักงาน สามารถผลิตได้ 48 คันต่อกะ และหากมีการเพิ่มพนักงาน 1 คน จะสามารถเพิ่มยอดการผลิตได้สูงสุดเป็น 58 คันต่อกะ โดยที่ ความต้องการพื้นที่พักคอยลดลงจนเหลือศูนย์ (Zero Buffer Requirement) งานวิจัยนี้จึงยืนยันได้ว่า การปรับปรุงกลยุทธ์การจัดลำดับมีความคุ้มค่ามากกว่าการมุ่งเน้นเพิ่มทรัพยากรบุคคลเพียงอย่างเดียว และแบบจำลองที่นำเสนอนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือสำหรับผู้บริหารในการวางแผนรับมือกับความซับซ้อนของการผลิตรุ่นใหม่ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปปฏิบัติและพัฒนาต่อยอด ดังนี้ การปรับปรุงกระบวนการทันที: โรงงานกรณีศึกษาควรเปลี่ยนมาใช้กลยุทธ์การจัดลำดับแบบ 2 รุ่นปกติ ต่อ 1 รุ่นใหม่ เป็นมาตรฐานหลักในการปฏิบัติการทันที เพื่อลดพื้นที่พักคอยส่วนเกินและลดต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลัง การเพิ่มกำลังการผลิต: หากโรงงานมีความจำเป็นต้องเพิ่มยอดการผลิตให้ถึงระดับสูงสุดที่ 58 คันต่อกะ ควรพิจารณาเพิ่มพนักงานที่มีความเชี่ยวชาญเพียง 1 คน ณ สถานี A1 หรือ A2 (ตามผลการทดลองในสถานการณ์จำลองที่ 4 หรือ 7) ซึ่งเป็นการลงทุนที่คุ้มค่าที่สุดและขจัดปัญหาคอขวดได้อย่างสมบูรณ์ การนำไปขยายผล: ควรนำ

หลักการ MBAS ไปประยุกต์ใช้กับสายการผลิตอื่นๆ ที่มีลักษณะการผลิตแบบคละรูน (Mixed-Model Line) เพื่อตรวจสอบและลดขนาดพื้นที่พักคอยที่เกินความจำเป็น ซึ่งจะช่วยให้พื้นที่ใช้สอยภายในโรงงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Weiss, S., Matta, A., & Stolletz, R. (2018). Optimization of buffer allocations in flow lines with limited supply. *IIE Transactions*, 50(3), 191–202.
- [2] Li, L., Qian, Y., Du, K., & Yang, Y. (2016). Analysis of approximately balanced production lines. *Int. J. Prod. Res.*, 54(3), 647–664.
- [3] Alfieri, A., Matta, A., & Pastore, E. (2016). A column generation algorithm for the Buffer Allocation Problem approximated by the Time Buffer concept. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 739–744.
- [4] Costa, A., Alfieri, A., Matta, A., & Fichera, S. (2015). A parallel tabu search for solving the Primal Buffer Allocation Problem in serial production systems. *Comput. Oper. Res.*, 64, 97–112.
- [5] Weiss, S. & Stolletz, R. (2015). Buffer allocation in stochastic flow lines via sample-based optimization with initial bounds. *OR Spectrum*, 37(4), 869–902.
- [6] Smith, J. M. (2016). Joint optimization of buffers and network population for closed finite queueing systems. *Int. J. Prod. Res.*, 54(17), 5111–5135.
- [7] Tsadiras, A. K., Papadopoulos, C. T., & O’Kelly, M. E. J. (2013). An ANN-based decision support system for solving the Buffer Allocation Problem. *Comput. Ind. Eng.*, 66(4), 1150–1162.
- [8] Staley, D. R. & Kim, D. S. (2012). Experimental results for the allocation of buffers in closed serial production lines. *Int. J. Prod. Econ.*, 137(2), 284–291.
- [9] Vergara, H. A. & Kim, D. S. (2009). A new method for the placement of buffers in serial production lines. *Int. J. Prod. Res.*, 47(16), 4437–4456.
- [10] Smith, J. & Daskalaki, S. (1988). Performance analysis of production systems with unreliable machines. *Int. J. Prod. Res.*
- [11] Smith, J. & Cruz, J. (2005). Production-inventory systems with stochastic demand.
- [12] Matta, A., Pedrielli, G., & Alfieri, A. (2014). Event Relationship Graph Lite: Event-based modeling for simulation-optimization of control policies in discrete event systems. *Winter Simulation Conference*, 3983–3994.
- [13] Pedrielli, G., Alfieri, A., & Matta, A. (2015). Integrated simulation-optimisation of pull control systems. *Int. J. Prod. Res.*, 53(14), 4317–4336.
- [14] Chiba, E. (2015). Heuristics for the Buffer Allocation Problem with collision probability using computer simulation. *Math. Probl. Eng.*, 2015, 1–7.
- [15] Kose, S. Y., Demir, L., Tunali, S., & Eliyi, D. T. (2015). Capacity improvement using simulation optimization approaches. *Eng. Optim.*, 47(2), 149–164.
- [16] Hema, V. & He, T. (2022). Throughput Analysis for Manufacturing Serial Systems using Discrete-Event Simulation and Analytical Calculation. *Eng. & Tech. Rev.*, 3(1), 15–28.
- [17] Vidanelage, L. D., Hebah, M., Mohammad, N., & Aziz, A. (2020). A DES-based approach to maximize patient throughput in outpatient clinic. *Eng. Sci. Technol.*, 1(1), 1–11.
- [18] Prasad, V., Thete, R., & Ramesh, R. (2019). Application of DES to Increase Throughput of Manufacturing System—A Case Study. *Springer LNME*, 531–539.
- [19] Hannes, A., John, W., Daniel, N., et al. (2019). Utilizing discrete event simulation to support conceptual development of production systems. *Winter Simulation Conference*, 2073–2084.
- [20] Lang, L., Chwif, L., & Pereira, W. (2022). Decision-Making Impacts of Originating Picking Waves Process for a Distribution Center Using DES. *Winter Simulation Conference*, 1509–1520.