



วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์

Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal

ISSN 3088-1773 (Online)

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1

มกราคม - มิถุนายน 2569

Vol. 2 No.1

January - June 2026



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 หรือบทความวิชาการภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
2. บทความที่จะได้รับการตีพิมพ์ต้องเขียนตามรูปแบบที่ทางวารสารกำหนดเท่านั้น
3. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง และต้องเป็นบทความที่ไม่เคยรับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ใดมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างขั้นตอนการพิจารณาตีพิมพ์ที่ใด หากตรวจสอบพบว่าการจัดพิมพ์ซ้ำซ้อนถือเป็นความรับผิดชอบของผู้นิพนธ์แต่เพียงผู้เดียว
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 จรูญธรรม

รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุมพล ปทุมมาเกษร

คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ชนกพร สมุทรกลิน

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ และผู้ประสานงาน

นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุรสิงห์ ไชยคุณ

มหาวิทยาลัยบูรพา

รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ สุขสกุลชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนินทร์ บุญลักษณะนุสรณ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิ่วธนกกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เขียวมั่ง

มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวงษ์ ไพรินทร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลทิพย์ สุวรรณทิพย์

Institute of Science Tokyo

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์

Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal

คณะดำเนินงานวารสาร

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษणाค์ สุกระมุ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ พลเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โยชิตา 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 รัตนโชติ ทองป้อง
อาจารย์ วิศวรรธน์ พชรวิญญ์
นางสาวจรรยา พุ่มพงษ์
นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

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

เจ้าหน้าที่วารสาร

นางสาวจรรยา พุ่มพงษ์
นายภาณุวัฒน์ สุธีมรส

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ

ติดต่อกองบรรณาธิการวารสาร

สำนักงานคณบดี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ 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



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 อุตสาหการ 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 2 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2569) ได้นำเสนอบทความวิจัยจำนวน 6 บทความ จากผู้เขียนหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ทุกบทความได้ผ่านกระบวนการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 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



วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์ (Industrial Technology Valaya Alongkorn Journal) ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 (มกราคม-มิถุนายน 2569) จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่บทความวิชาการและบทความวิจัยด้านเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ผ่านระบบ ThaiJO โดยมุ่งสนับสนุนการพัฒนาคู่มือความรู้และยกระดับคุณภาพผลงานทางวิชาการของคณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา บุคลากรทางการศึกษา และผู้สนใจทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

ในฉบับนี้ได้รับรวบรวมบทความวิจัยจำนวน 6 เรื่อง ครอบคลุมประเด็นที่หลากหลายด้านวิศวกรรม เทคโนโลยี และนวัตกรรม ประกอบด้วยการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรมและระบบอัตโนมัติ การออกแบบอุปกรณ์อำนวยความสะดวกเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิต การศึกษาด้านปฐพีวิศวกรรมสำหรับงานโครงสร้างพื้นฐาน การประยุกต์แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการบริการ การวิจัยด้านการใช้สารสนเทศธรรมชาติเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ รวมถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและระบบสมาร์ตโฮม ซึ่งสะท้อนถึงความก้าวหน้าทางวิชาการและการบูรณาการองค์ความรู้จากหลากหลายสาขา เพื่อตอบสนองต่อการพัฒนาภาคอุตสาหกรรม คุณภาพชีวิต และสังคมในยุคปัจจุบัน

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

คณะดำเนินงานวารสาร

วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์



สารบัญ

	หน้า
* วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม วไลยอลงกรณ์	ก - ค
* บทบรรณาธิการ	ง
* คำนำ	จ
* สารบัญ	ฉ
 บทความวิจัย	
➤ Voltage/Frequency Speed Control of CNC Machining Center's Spindles Retrofitted by Delta ASD-S 4.5kW High Performance VFD <i>Varin Cholahan and Yosita Charoensiri</i>	1 - 13
➤ การพัฒนาไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา <i>พีรภัฏ พรเจริญสุข, ศศิ บัวทอง, พงศ์พิน คำติ่ม, งามอาจ ทับบุรี, ภูมิรินทร์ ทวีศรี, พีรวัฒน์ อาทิตยตั้ง, ศิลปชัย กลิ่นไกร, วีระพงศ์ ทองสา และกันยารัตน์ เอกเอี่ยม</i>	14 - 26
➤ การประเมินเชิงประจักษ์วิศวกรรมและสถิติของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับชั้นรองพื้นทางถนนชนบท <i>เทวกุล จันทร์ขามป้อม</i>	27 - 40
➤ การลดเวลารอคอยในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดโดยการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์และการส่งอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ <i>วิชุดา มิ่งสกุล</i>	41 - 53
➤ การพัฒนาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราด้วยสารสกัดจากมอสส์และใบมะรุ้มร่วมกับกากกาแฟ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืน <i>ลัดดาวรรณ แก้วพวง, กิตติกร เชื้อชะเอม, กนกพร ปั่นกิ่ง, พิมพ์วิไล ราชเนย์, ศุภิสรา สอาดศรี และ เทอดเกียรติ แก้วพวง</i>	54 - 66
➤ การพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นแบบบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วย Raspberry Pi และ Node-RED Dashboard <i>อภิสิทธิ์ เชื้อนุ่น, อธิพัทธ์ สันธู, และศิริวรรณ พลเศษ</i>	67 - 82



Voltage/Frequency Speed Control of CNC Machining Center's Spindles Retrofitted by Delta ASD-S 4.5kW High Performance VFD

Varin Cholahan¹ and Yosita Charoensiri^{1,*}

¹ Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage,
Pathum Thani, 13180, Thailand

***Corresponding Author E-mail:** yosita.cha@vru.ac.th

รับบทความ (Received) : March 09, 2026 /แก้ไข (Revised) : June 20, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

Abstract

CNC machine tools include an essential element known as the spindle, which must operate at high speeds and sustain a consistent velocity even when torque fluctuates during use. Generally, this spindle is powered by an alternating current (AC) electric motor that serves as the torque source, facilitating the required rotational speed for various cutting tasks. This article aims to explore a method for controlling speed through variable frequency voltage control (VVVF or V/f), specifically for CNC machine spindles. Initially, a model of rotational speed is created based on Newton's second law, taking into account the interactions among the AC motor, gear system, and rotating spindle. Next, a mathematical representation of the induction motor is developed in the d-q axis framework to assist in crafting the speed controller. Subsequently, a closed-loop speed control mechanism is initiated; this process begins with defining a reference speed and then processing these values through an electrical circuit to produce the necessary voltage and frequency before supplying them to the AC motor model. System modeling and performance assessment concerning speed control and dynamic response under torque load were conducted using MATLAB/Simulink. The V/f control system was established with a high-efficiency Delta ASD-S 4.5kW Variable Frequency Drive (VFD) sourced from Delta Electronic Inc. in Taiwan, aimed at performing speed control regulation on the spindles mounted on the CNC Machining Center model ARCO A-56 APC. To manipulate the reference and system response, a PI controller was utilized in control loop.

Keywords : Induction Motors, Variable Voltage Variable Frequency (VVVF), MATLAB Simulink, Motor Control.

Introduction

A high-speed machining system comprises several key components, including the machine tool, spindle, and computer numerical control (CNC) system. Spindle is an important part. It is normally applied by an Induction motors (IM), also known as asynchronous machines, are often preferred over Direct Current (DC) motors due to their low maintenance costs, absence of arcing during operation, and economic efficiency. These motors find various applications in industry; while single-phase induction machines are typically produced for low power applications, three-phase induction machines are predominantly employed in industrial and factory settings. Despite the numerous advantages they offer over DC motors, induction machines present a complex structure and exhibit non-linear characteristics that pose substantial challenges in their control. Efficiency in induction machines can be significantly enhanced through speed and torque controls. Several control methods, such as scalar voltage control, scalar resistance control, and vector control, have been developed for this purpose. However, their implementation often tends to be complex and associated with high costs [1]. Then, this paper focuses on implementing speed control in induction machines by Variable Voltage Variable Frequency (VVF or V/f Control). These methods will be examined in Simulink to evaluate their performance characteristics and operational efficiencies. There are various control techniques for induction motors aimed at achieving consistent speed characteristics. Notable methods include scalar control and vector control, among others [2-5]. The widely-used V/F method for operating induction motors has been established for many years [6]. This approach utilizes the stator flux and torque discrepancies to produce the necessary stator voltage and frequency [7 - 10]. To enhance reliability, flexibility, and ease of managing errors—thereby ensuring constant speed performance in induction motor drives—microcontrollers are increasingly employed.

In this research, a model for a three-phase induction motor along with a spindle rotation model was created using the principles of mathematical modeling. The motor's speed was regulated employing the Variable Voltage Variable Frequency Technique. Control parameters were validated using MATLAB/Simulink, and the results are presented to illustrate the effectiveness of the control system. Finally, the ASD-S High Performance VFD produced by Delta Electronics Inc. Taiwan was selected to regulate the spindle speed of the CNC, replacing the previous unit that was damaged due to prolonged use in a challenging environment.

Preliminaries

1. Dynamical model of Spindles

For the high-speed machining operation, the spindle system featuring an AC motor circuit is depicted in Figure 1. This addresses the dynamic interactions between the AC motor, gears, and spindle movements.

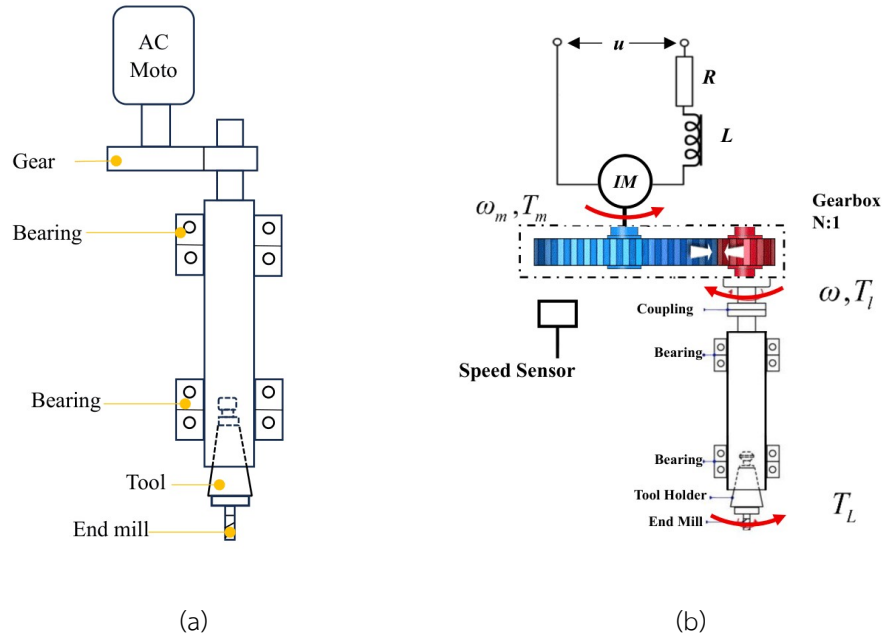


Figure 1 (a) CNC's Spindle ; (b) Free body diagram

The rotational dynamics of motor are described as

$$J_m \dot{\omega}_m = T_e - B_m \omega_m - T_m . \quad (1)$$

Defining $\dot{\theta} = \omega$, we can write the rotational dynamic of Spindle as

$$J_s \dot{\omega} = T_l - B_s \omega - T_L \quad (2)$$

where T_m denotes the input torques associated with the gear set, T_l is the output torques produced by the gear set, and T_L is torque load. The relation between both torques can be described as

$$T_l(t) = N T_m(t) \quad (3)$$

where N is the transmission ration of gear set. Substituting the relation $\omega_m = N\omega$ into (1) - (2), and then eliminating T_m , dynamic model can be simplified as follows:

$$\dot{\theta} = \omega \quad (4)$$

$$J_{eq} \dot{\omega} = Nu - B_{eq} \omega + T_d \quad (5)$$

where $B_{eq} = B_s + B_m N^2$, $J_{eq} = J_s + J_m N^2$ and $T_d = \delta - T_L$ are the equivalent viscous damping coefficient , the equivalent total inertia of spindle system and a group of uncertainties, respectively.

2. Induction Motor

In our design, we incorporate a squirrel-cage asynchronous induction motor. This type of induction motor is favored for its durability, straightforwardness, and affordability. In this motor, the magnetic field generated by the stator induces an electric current in the rotor bars, resulting in torque that causes the rotor to rotate. Its functioning is based on the principle of electromagnetic induction, where the rotor speed is

consistently slightly lower than that of the stator's magnetic field to ensure proper induction. The dynamic equivalent circuit or d-q analysis and simulation are commonly utilized methods based on a rotating reference frame, as illustrated in Figure 2.

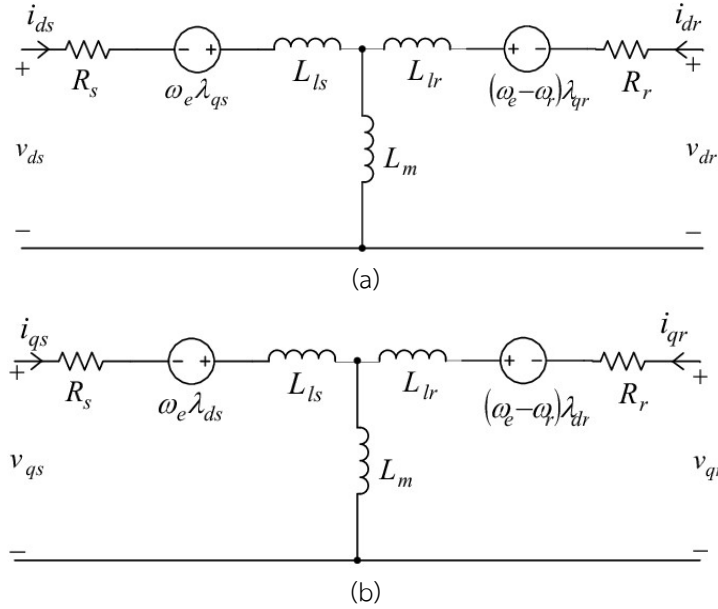


Figure 2 (a) d-Axis equivalent circuit; (b) q-Axis equivalent circuit.

The analysis of the stator side necessitates a study of the differential equations associated with the circuits shown in Figure 2. Voltage across the stator loop in d-q axis can be written as

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs} , \quad (6)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds} . \quad (7)$$

Conversely, the rotor side is represented as follows:

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 , \quad (8)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 . \quad (9)$$

Assuming that the examined induction motor is a squirrel cage type, this results in the voltage in equations (8) and (9) being equal to zero. The expressions for the flux linkages can be represented as follows:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} , \quad (10)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} , \quad (11)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} , \quad (12)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} . \quad (13)$$

In these equations, L_s denotes the self-inductance of the stator, L_r signifies the self-inductance of the rotor, and L_m represents the mutual-inductance. The parameter L_{ls} denotes the stator-leakage inductance, while L_{lr} represents the rotor-leakage inductance. The self-inductances can be represented as follows:

$$L_s = L_m + L_{ls}, \quad (14)$$

$$L_r = L_m + L_{lr}. \quad (15)$$

The speed at which rotation occurs is referred to as synchronous speed, defined by the equation:

$$\omega_s = \frac{120f}{P} \quad (16)$$

where f represents the supply frequency and P indicates the number of poles. The difference between the synchronous speed ω_s (or ω_m^* as a set point) and actual speed ω_m of the rotor is called as slip as seen below:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}. \quad (17)$$

The summation of notation is illustrated in Table 1.

3. The principles of V/f Control

As mentioned in the previous chapter, when we focus solely on the stator flux reference frame, the governing equation for the stator circuit is:

$$V_{dqs} = R_s i_{dqs} + \frac{d\lambda_{dqs}}{dt} + j\omega_e \lambda_{dqs}. \quad (18)$$

In steady-state, equation (18) can be simply represented by:

$$V_{dqs} = R_s i_{dqs} + j\omega_e \lambda_{dqs}. \quad (19)$$

If we disregard the voltage drop across the stator resistance and focus solely on its magnitude:

$$\lambda_{dqs} \approx \frac{V_{dqs}}{\omega_e} \quad (20)$$

Under these circumstances, the machine's speed is directly proportional to the stator voltage. To run the machine at standard conditions, the stator flux needs to be at its nominal level

$$\lambda_{dqs}^* = \lambda_{dqs} \approx \frac{\sqrt{2} V_{sn}}{\omega_{en}} \quad (21)$$

, where V_{sn} represents the nominal RMS phase voltage and ω_{en} denotes the nominal frequency. Then, based on equations (20) and (21), the speed reference may be transformed into a voltage reference as

$$V_{dqs}^* \approx \lambda_{dqs}^* \omega_e^* = \frac{\sqrt{2} V_{sn}}{\omega_{en}} \omega_e^*. \quad (22)$$

V/f profile could be programed as a look up table or just a simple linear function indicated in Figure 3.

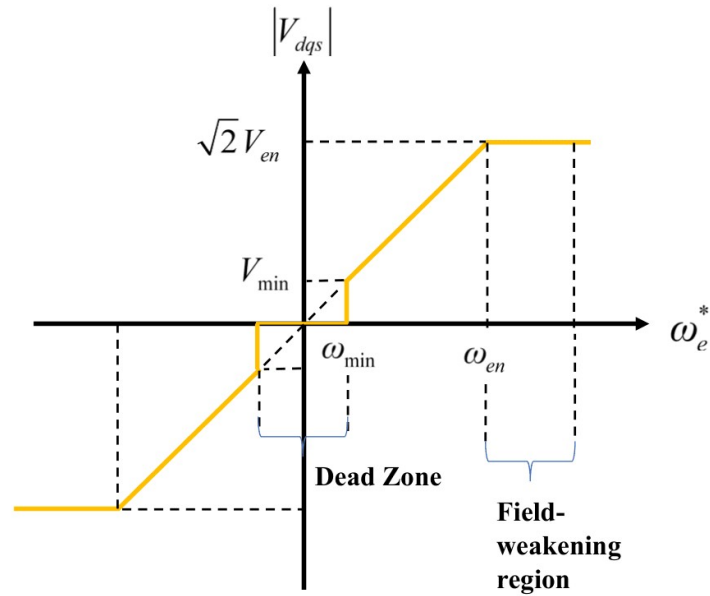


Figure 3 V/f Profile.

4. Closed-loop version of V/f control

V/f control relates the ratio of voltage amplitude to frequency. In a closed-loop configuration, a PI controller can proficiently compensate for this slip speed and can be manually fine-tuned while the motor is in operation. The complete control block diagram is illustrated in Figure 4.

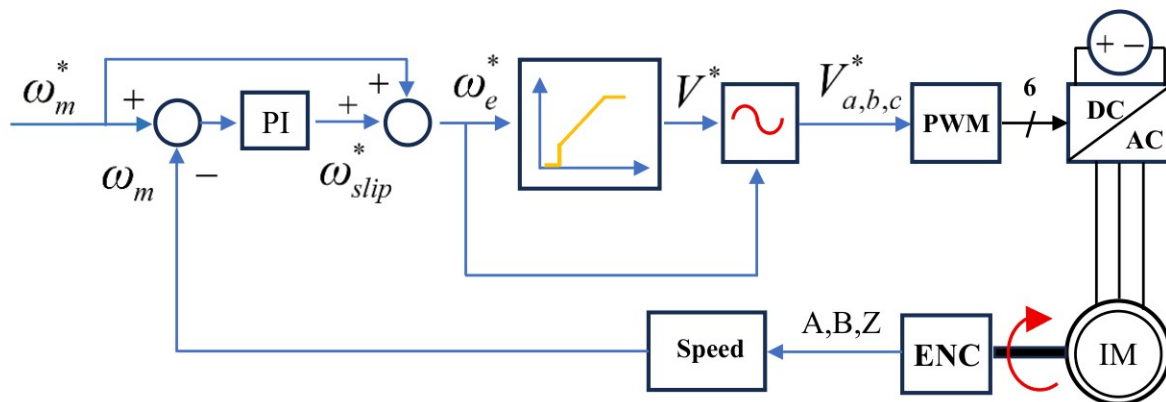


Figure 4 Block diagram of closed-loop V/f control.

Simulation and Experimental Results

1. Speed tracking Simulation

The simulation validation of the speed controller's tracking performance was achieved by applying a speed reference step from 0 to 25 Hz, followed by an increase to 50 Hz over a duration of 4 seconds, and finally reaching 65 Hz in 6.5 seconds. During this process, the motor was operated under a torque load that matched its speed requirements. Ultimately, the induction motor (IM) successfully operated at its rated speed while sustaining a steady-state torque load of 9.5 Nm. In practical applications, a motor is unable to instantly attain its nominal speed due to factors such as inertia and power constraints. Therefore, initiating a step reference from 0 to 2000 rpm is not feasible. The MATLAB simulation diagram is presented in Figure 5, while the parameters for the induction motor are detailed in Table 1. Within this system, the PI controller assesses the slip and adjusts the speed reference as necessary. This approach effectively eliminates any persistent tracking error. As this is an induction motor, the rotor's mechanical speed is lower than that of the rotor flux when it is loaded. At the beginning of operation, the slip should be at 1 since the rotor is not in motion. Subsequently, the machine is expected to rapidly reach a stable operating condition characterized by low slip, as demonstrated in the simulation. As observed in the simulation results, the overshoot is notably high due to the constraints imposed by the PI Controller. This is a drawback associated with linear controllers like PI or PID, which must be balanced against their straightforward implementation. It is important to note that achieving minimal tracking error at lower speeds necessitates a considerable integral gain to facilitate rapid convergence of slip estimation.

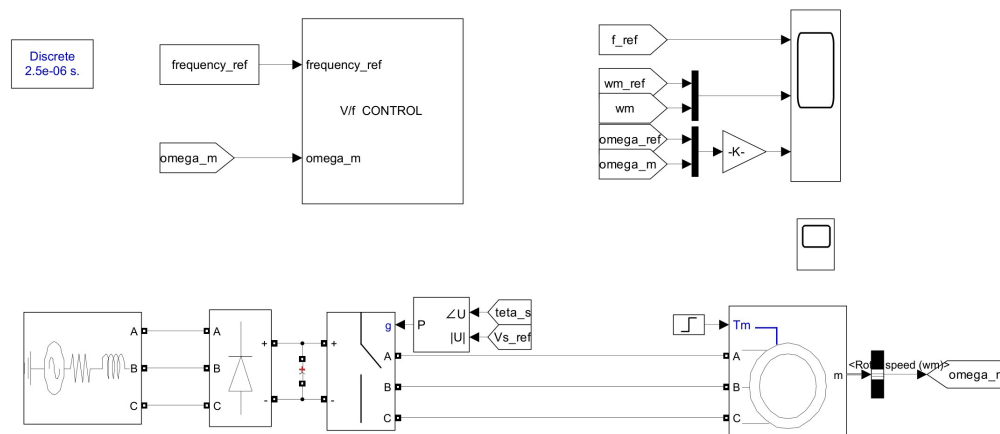


Figure 5 MATLAB/SIMULINK Block diagram of closed-loop V/f control

However, this gain must not be excessively high, as doing so could negatively impact control stability. In the situation outlined, although the actual slip undergoes abrupt changes with load variations, the estimated slip changes gradually due to restrictions set by the dynamics of the PI controller.

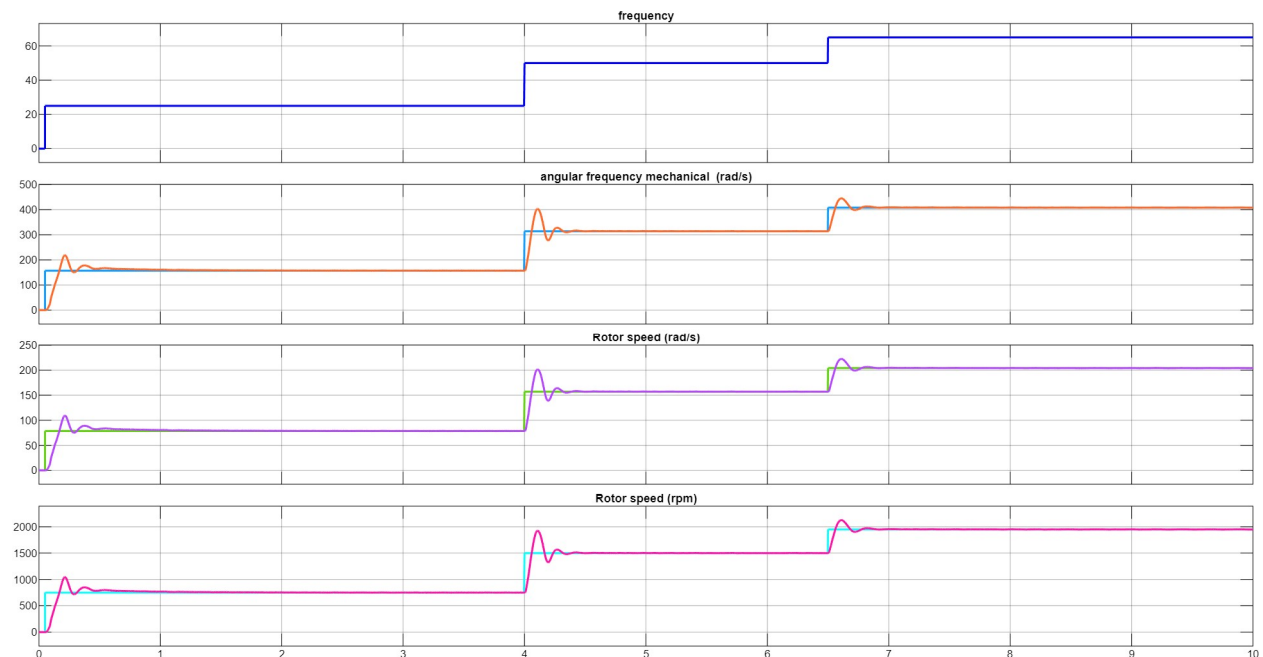


Figure 6 Simulation results.

2. Experiment

The experiment utilized a ten-year-old CNC Machining Center no longer used, specifically the ARCO A-56 APC model produced in Taiwan, which has been retrofitted as illustrated in Figure 7. In this process, we completely overhauled all mechanical components and replaced every electrical device, including the CNC Controller, Spindle Motor, Spindle Drive, Servo Motors, Servo Drives, and other electrical devices within the control cabinet. This paper will concentrate exclusively on the Spindle Systems, which comprise an AC Motor integrated with an ABZ 1024 pulses per revolution (ppr) incremental encoder, gear mechanism, and spindle drive. Despite the high-performance capabilities of this drive manufactured by Delta Electronics Inc., which can operate under either V/f control or Vector Control modes, our focus will be on examining the V/f algorithm. Experiments were conducted using identical motor and controller parameters as outlined in Table 1. The step speed was initially set at 160 rad/s (approximately 1,600 rpm); after three seconds, a command was issued to reduce the speed to 120 rad/s. The outcomes both speed response and torque were captured via ASD-S Drive software and are presented in Figure 8. Figure 9 illustrates the currents flowing through the stator, with an average current value of approximately 25 Amperes, while the peak current can reach about 50 Amperes. Figure 10 presents the voltage per phase, which is around 600 Volts, slightly exceeding the motor's rated voltage. Figure 11 depicts the error values during operation, showing that the difference between the speed reference

and the actual speed response ranges from 0 to 25%. Ideally, we aim for this error to be as close to zero as possible throughout operation; however, in practice, it fluctuates continuously under torque load variation. Additionally, Figure 12 expresses data related to DC-Link voltage. This voltage is utilized to generate the sine wave supplied to the induction motor. The stability of the DC-Link is crucial for ensuring consistent power delivery to the motor. During experiments, the DC-Link voltage consistently measures around 650 VDC.

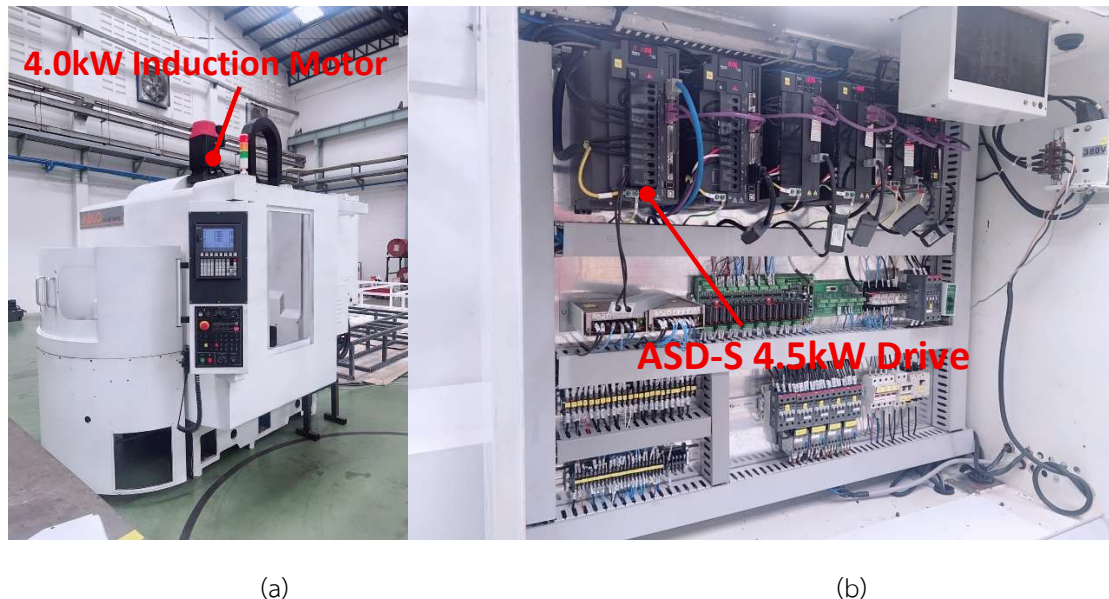


Figure 7 CNC Machining Center with (a) 4.0kW Induction Motor; (b) ASD-S 4.5kW VFD.

Conclusions

This study conducted a control techniques applicable to induction motors, specifically focusing on Variable Voltage Variable Frequency (VVVF) method. The effectiveness of these strategies concerning speed regulation and dynamic response was evaluated through simulations on the MATLAB/Simulink platform. The findings revealed several limitations associated with the V/f approach, including a potentially sluggish response time and significant overshoot, along with its inability to address steady-state errors. Despite these shortcomings, the V/f method remains one of the most widely utilized techniques for speed control in industrial settings. Additionally, this research included experiments involving a 4.0 kW induction motor powered by a high-performance variable frequency drive (VFD) produced by Delta Electronics Inc., Taiwan, which yielded satisfactory results. For future investigations, it is noted that while the VVVF control method offers a straightforward and cost-effective solution for managing AC motor speed, it is also hindered by specific limitations. Consequently, alternative strategies such as Field-Oriented Control (FOC) have emerged as sophisticated options for AC motor drives, demonstrating enhanced responsiveness and improved torque regulation capabilities.

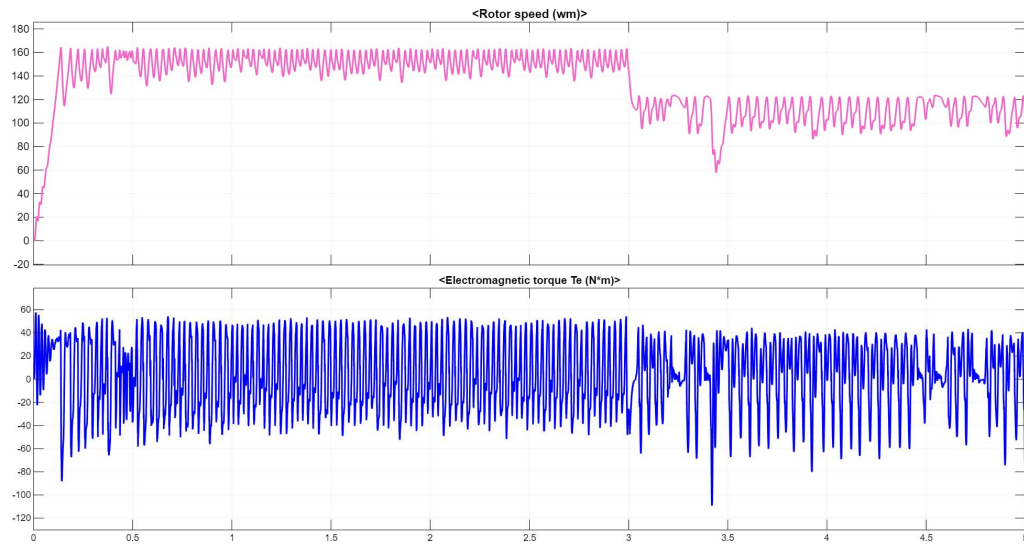


Figure 8 Speed response at 160 rad/s and 120 rad/s and Torque.

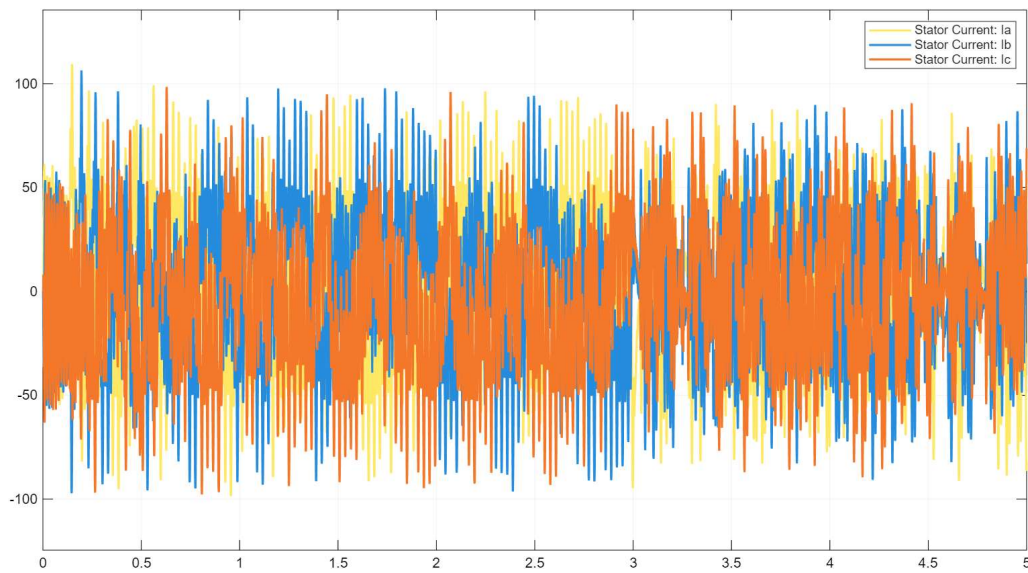


Figure 9 Stator Current.

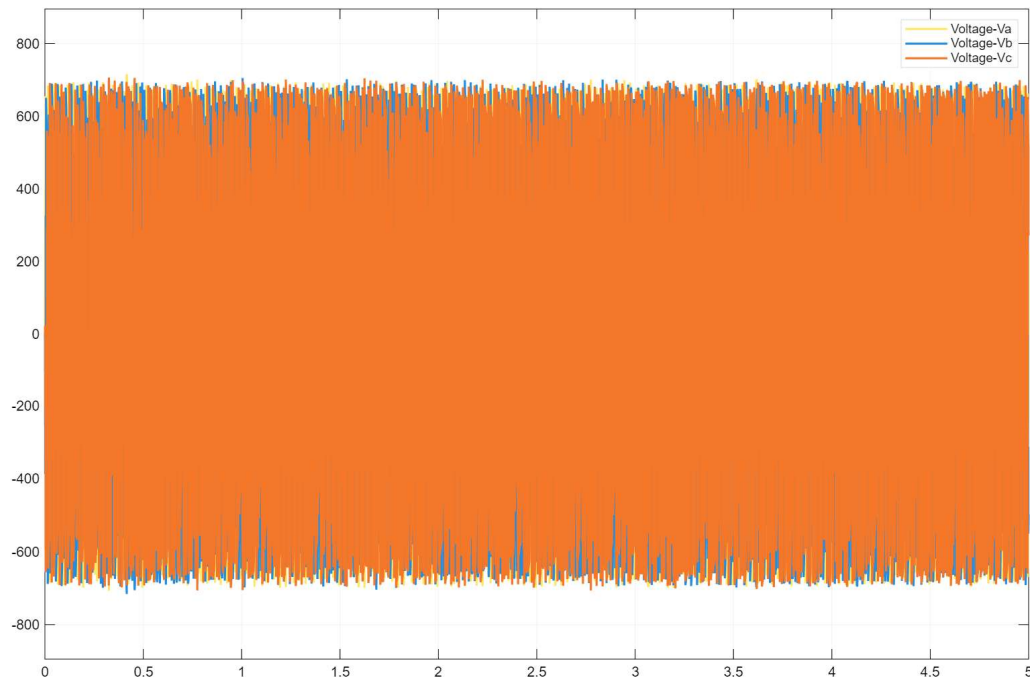


Figure 10 Phase Voltage.

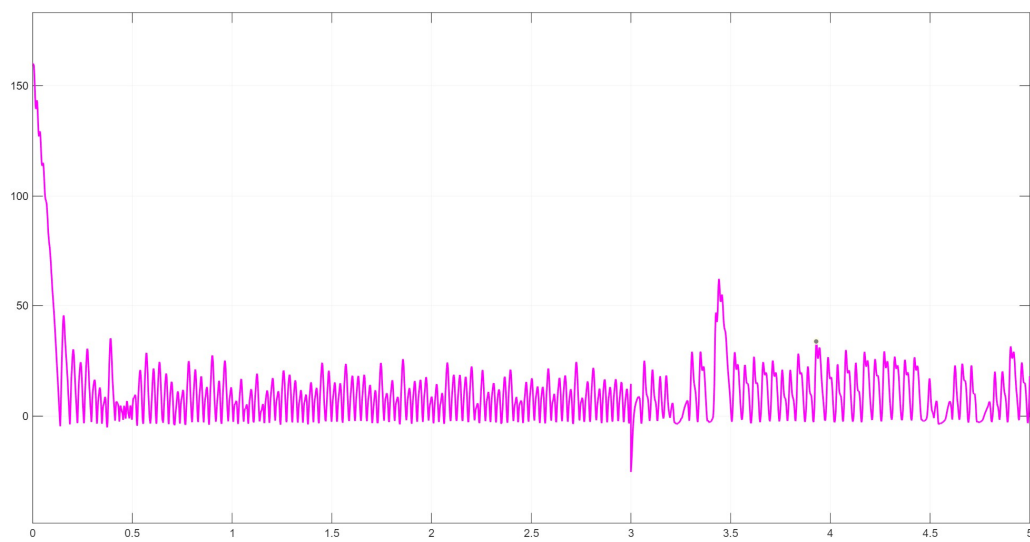


Figure 11 Error during operation.

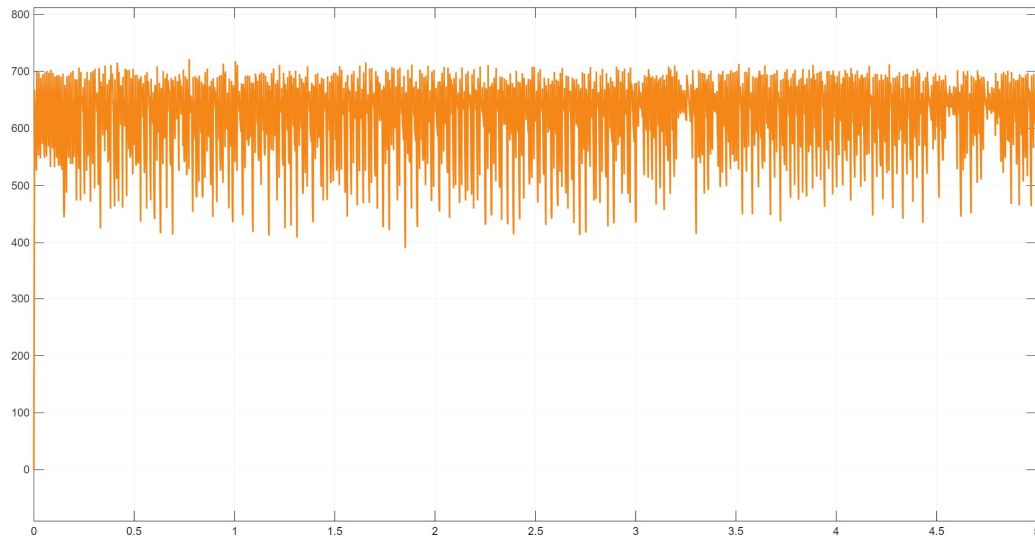


Figure 12 DC-link voltage.

Table 1. Induction Motor, Gear and PI controller parameters

Notation	Meaning	Value
k_p, k_i	PI Gains	0.12 , 0.3268
$P_n(W)$	Nominal Power	3,730
$V_n(rms)$	Voltage RMS	530
f_n	Nominal frequency	50
$R_s(ohm)$	Stator resistance	1.115
$L_{ls}(H)$	Stator-leakage inductance	0.005974
$R_r(rms)$	Rotor resistance	1.083
$L_{lr}(H)$	Rotor-leakage inductance	0.005974
$L_m(H)$	Mutual-inductance	0.2037
$J_m(kg.m^2)$	Inertia of motor	0.02
$B_m(N.m.s)$	Friction Coefficient of motor	0.005752
P_r	Pole pairs	2
$J_m(kg.m^2)$	Inertia of spindle	0.1
$B_s(N.m.s)$	Friction Coefficient of spindle	0.008
N	Gear ratio	1:1.92

References

- [1] B. Keskin and Eminoglu, "Optimally tuned pi controller design for v/f control of induction motor," in *2022 International Congress on HumanComputer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, pp. 1–5, 2022.
- [2] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong and S. L. HO, "Modeling and simulation of the three phase induction motor Using SIMULINK," *Int.J. Elect. Engg. Educ.*, 1999, pp. 163–172.
- [3] F. C. Tze and S. Keli, "Applied intelligent control of induction motor drives," IEEE Willey Press, 2011.
- [4] P.C. Krause, "Analysis of Electrical Machinery and Drives System," IEEE Willey Press, 2000.
- [5] M. Ned, "Advanced Electric Drives: Analysis, Control Modeling using Simulink," MNPERE Publication, 2001.
- [6] Abbondanti, "Method of flux control in induction motors driven by variable frequency, variable voltage supplies", *IEEE/IAS Intl. Semi. Power Conv. Conf.*, 1977 pp. 177- 184,
- [7] S. Oliveirada and S. Marcelo, "Scalar control of an induction motor using a neural sensor less technique," *Elsevier Electric Power System Research*, 2014, pp 322- 320.

การพัฒนาไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา Development of a Microcontroller-Based Cane for the Visually Impaired

พีรภัฏ พรเจริญสุข¹, ศศิ บัวทอง¹, พงศ์พศิน คำติ่ม¹, งามอาจ ทับบุรี¹, ภูมรินทร์ ทวีศรี¹, พีรวัฒน์ อาทิตยตั้ง¹, ศิลปชัย กลิ่นไกล¹,
วีระพงศ์ ทองสา¹ และกันยารัตน์ เอกเอี่ยม^{1,*}

Peeraphat Porncharoensuk¹, Sasi Buathong¹, Pongpasin Khamdee¹, Ong-ard Tubburee¹, Phummarnin
Thavitchasri¹, Peerawat Artitthang¹, Sillapachai Klinklai¹, Wiraphong Thongsa¹ and Kanyarat Ek-iam^{1,*}

¹ สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์,
ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

¹Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat
University under the Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

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

รับบทความ (Received) : April 09, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 19, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา เพื่อ
ยกระดับความปลอดภัยและความอิสระในการใช้ชีวิตประจำวัน ระบบที่พัฒนาขึ้นบูรณาการไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32
ร่วมกับเซนเซอร์ ประกอบด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางในระดับพื้นดินและระดับเหนือศีรษะ โมดูลวัดความ
เฉื่อย เอ็มพียู6050 สำหรับตรวจจับสภาวะการล้ม และโมดูลจีพีเอส สำหรับระบุพิกัดตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ โดยมีการออกแบบ
อัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณเชิงลำดับแบบเรียลไทม์เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านสัญญาณเสียง และส่งต่อสถานะเหตุการณ์
ฉุกเฉินไปยังผู้ดูแลผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingsBoard ด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ผลการทดสอบประสิทธิภาพ
พบว่า ระบบมีความแม่นยำในการตรวจจับสิ่งกีดขวางสูงสุดในช่วงระยะ 50–100 เซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ
กว่า 1.00 เซนติเมตร และสามารถตรวจจับสภาวะการล้มที่ระดับมุมเอียง 90 องศา ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ (ร้อยละ 100) สำหรับ
ระบบระบุตำแหน่งพิกัดจีพีเอส มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.32–15.48 เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการ
ติดตามตัวบุคคล ข้อมูลเชิงประจักษ์ชี้ให้เห็นว่าไม้เท้าที่พัฒนาขึ้นมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพในการช่วยเหลือภัยอันตรายในมุม
อับสายตาและสภาวะวิกฤต

คำสำคัญ : ผู้พิการทางสายตา, ไม้เท้า, ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32, การตรวจจับสิ่งกีดขวาง, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Abstract

This research aims to design and develop a microcontroller-based cane for visually impaired individuals to enhance safety and independence in daily life. The developed system integrates an ESP32 microcontroller with multiple sensors, including ultrasonic sensors for detecting obstacles at ground level and overhead, an MPU6050 inertial measurement unit for fall detection, and a GPS module for geographic positioning. A real-time

sequential signal processing algorithm is implemented to provide alerts to users via audio signals and to transmit emergency status information to caregivers through the ThingsBoard cloud platform using Internet of Things (IoT) technology. The experimental results indicate that the system achieves high accuracy in obstacle detection within a range of 50–100 centimeters, with an average error of less than 1.00 centimeter. The fall detection system is capable of accurately identifying a fall at a tilt angle of 90 degrees with 100% accuracy. For the GPS positioning system, the average error ranges from 2.32 to 15.48 meters, which is considered acceptable for personal tracking applications. The empirical findings demonstrate that the developed smart cane is stable and effective in helping users avoid hazards in blind spots and critical situations.

Keywords: Visually impaired individuals, cane, ESP32 microcontroller, obstacle detection, Internet of Things

บทนำ

ปัญหาความบกพร่องทางการมองเห็นเป็นปัญหาสำคัญด้านสาธารณสุขของโลก โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) รายงานว่ามีประชากรมากกว่า 2.2 พันล้านคนทั่วโลกที่มีความบกพร่องทางการมองเห็นในระดับต่าง ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะการเคลื่อนที่และการรับรู้สภาพแวดล้อมรอบตัวอย่างปลอดภัย [1] ผู้พิการทางสายต้ามักประสบปัญหาในการเดินทางในพื้นที่ที่ไม่คุ้นเคย เนื่องจากไม่สามารถรับรู้สิ่งกีดขวางหรือสภาพแวดล้อมได้อย่างครบถ้วน ส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุ เช่น การสะดุด การชนวัตถุ หรือการพลัดตกจากพื้นที่ต่างระดับ ไม่เท่าขาว (White Cane) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่ผู้พิการทางสายตานิยมใช้ในการช่วยนำทางและตรวจจับสิ่งกีดขวางบริเวณพื้น อย่างไรก็ตาม ไม่เท่าขาวแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดในการตรวจจับวัตถุที่อยู่เหนือระดับพื้น เช่น กิ่งไม้ ป้าย หรือสิ่งกีดขวางที่อยู่ในระดับศีรษะ รวมถึงไม่สามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานล่วงหน้าได้ในระยะที่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์ช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาโดยการประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัว (Embedded System) และเทคโนโลยีเซนเซอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับสิ่งกีดขวางและการนำทาง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เทคโนโลยีไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ตรวจจับระยะทางได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีต้นทุนต่ำลง ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อัจฉริยะได้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะเซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) ซึ่งสามารถตรวจจับระยะทางของวัตถุโดยใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียงความถี่สูง มีความแม่นยำสูงและไม่ขึ้นกับสีหรือพื้นผิวของวัตถุ [2] นอกจากนี้ การใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว เช่น MPU6050 ซึ่งประกอบด้วย accelerometer และ gyroscope สามารถนำมาใช้ตรวจจับการเอียงหรือการล้มของอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3-4] อีกทั้งการผสมผสานเทคโนโลยีระบบระบุตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System: GPS) ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการระบุตำแหน่งของผู้ใช้งานในกรณีฉุกเฉินได้อีกด้วย [5] จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การพัฒนาไม้เท้า โดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางร่วมกับระบบแจ้งเตือนสามารถช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความสะดวกในการเคลื่อนที่ของผู้พิการทางสายตาได้อย่างมีนัยสำคัญ [6] อย่างไรก็ตาม ระบบที่พัฒนาขึ้นในหลายงานวิจัยยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำของการตรวจจับ การแจ้งเตือนที่ไม่เหมาะสม หรือการขาดระบบติดตามตำแหน่งผู้ใช้งาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ร่วมกับเซนเซอร์อัลตราโซนิกสำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวาง เซนเซอร์ MPU6050 สำหรับตรวจจับการเอียงหรือการล้มของไม้เท้า และโมดูล GPS สำหรับระบุตำแหน่งของผู้ใช้งาน ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางและแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านสัญญาณเสียงได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการเคลื่อนที่และยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้พิการทางสายตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาไม้เท้าสำหรับผู้พิการทางสายตาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลักของระบบ
- 1.2 เพื่อพัฒนาระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางและระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งานโดยใช้เซนเซอร์อัลตราโซนิกและเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว
- 1.3 เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบไม้เท้าที่พัฒนาขึ้นในด้านความแม่นยำในการตรวจจับสิ่งกีดขวางและความสามารถในการแจ้งเตือนผู้ใช้งาน

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตา พบว่าประเด็นสำคัญมุ่งเน้นไปที่การปิดข้อจำกัดของอุปกรณ์นำทางแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะการตรวจจับสิ่งกีดขวางในระดับที่ไม้เท้าขาไม่สามารถเข้าถึงได้ โดยงานวิจัยของ กาญจนา จันทรประเสริฐ (2560) ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางแบบบูรณาการ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนศีรษะ ลำตัว และส่วนขา เพื่อคุ้มครองความปลอดภัยครอบคลุมตลอดความสูงของผู้ใช้งาน ระบบดังกล่าวอาศัยหลักการสะท้อนคลื่นผ่านเซนเซอร์อัลตราโซนิก รุ่น SRF05 และ HC-SR04 ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับความเคลื่อนไหว โดยกำหนดระยะแจ้งเตือนที่ 40-60 เซนติเมตร ผ่านสัญญาณเสียงและแสงสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ซึ่งถือเป็นการยกระดับการตรวจจับในมุมอับสายตา เช่น ระดับศีรษะและหน้าแข้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6] สอดคล้องกับการศึกษาของ โสภิตา ท่วมมี และคณะ (2565) ที่พัฒนาไม้เท้าโดยเน้นการเพิ่มขีดความสามารถด้านการสื่อสารและการระบุตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในการตรวจจับสิ่งกีดขวางในระยะ 2 เมตร และเพิ่มนวัตกรรมการตรวจจับแอ่งน้ำผ่านเซนเซอร์วัดความชื้น (Humidity Sensor) เพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากการลื่นล้ม นอกจากนี้ยังมีการบูรณาการแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนเพื่อส่งข้อความขอความช่วยเหลือแบบ Text-to-Speech และพิกัดตำแหน่งไปยังบุคคลใกล้ชิดในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งระบบมีประสิทธิภาพการทำงานโดยรวมสูงถึงร้อยละ 95.72 อย่างไรก็ตาม แม้เทคโนโลยีอัลตราโซนิกจะเป็นที่นิยมเนื่องจากมีความแม่นยำในระยะใกล้และไม่ขึ้นกับสีหรือพื้นผิวของวัตถุ แต่จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบข้อจำกัดสำคัญคือค่าความคลาดเคลื่อนจะแปรผันตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในระยะที่เกินกว่า 100 เซนติเมตรขึ้นไป รวมถึงข้อจำกัดในพื้นที่อับสัญญาณจีพีเอส หรือพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำเชิงตำแหน่ง ข้อมูลเชิงประจักษ์เหล่านี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบอัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณเชิงลำดับ (Sequential Processing) และการเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ประสิทธิภาพสูงอย่าง ESP32 เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการตอบสนองแบบเรียลไทม์และการเชื่อมต่อผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์ (IoT Cloud Platform) ในงานวิจัยฉบับนี้

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32 ร่วมกับระบบเซนเซอร์เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางและแจ้งเตือนผู้ใช้งานแบบเรียลไทม์ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย การออกแบบวงจรควบคุมของระบบ การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบ และการออกแบบต้นแบบของอุปกรณ์

1. การออกแบบระบบการทำงาน

แผนภาพระบบการทำงานของไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา ถูกออกแบบภายใต้หลักการระบบฝังตัว (Embedded System) ที่เน้นความสามารถในการประมวลผลสัญญาณแบบทันที (Real-time Processing)

และมีเสถียรภาพในการเชื่อมต่อข้อมูล สามารถจำแนกออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังปรากฏในรูปที่ 1 เริ่มต้นจาก ส่วนนำเข้าข้อมูลเชิงพื้นที่และสภาวะกายภาพ (Input) ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับพารามิเตอร์ต่างๆจากสภาพแวดล้อมผ่านระบบเซนเซอร์ ประกอบด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) ที่ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นความถี่สูงเพื่อตรวจวัดระยะห่างและระบุตำแหน่งของสิ่งกีดขวางในวิถีการเคลื่อนที่ โมดูลวัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit: IMU) MPU 6050 ซึ่งบูรณาการไจโรสโคปและมาตรวัดความเร่งแบบ 3 แกน สำหรับวิเคราะห์พารามิเตอร์เชิงจลนศาสตร์ (Kinematics) เพื่อตรวจจับสภาวะการล้มอุบัติเหตุอย่างแม่นยำ และโมดูลระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) สำหรับการรับพิกัดทางภูมิศาสตร์เพื่อใช้ในการติดตามตัวบุคคล โดยข้อมูลดิบจากส่วนนำเข้าจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและส่งต่อผ่านโปรโตคอลการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Communication) เข้าสู่ ส่วนประมวลผลและตัดสินใจกลาง (Process) ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี 32 เป็นหน่วยปฏิบัติการหลัก เนื่องจากมีสมรรถนะในการประมวลผลระดับสูง และรองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย หน่วยประมวลผลจะทำการคัดกรองสัญญาณรบกวนและวิเคราะห์ข้อมูลตามอัลกอริทึมการตัดสินใจที่กำหนดไว้ หากข้อมูลที่ได้รับสอดคล้องกับเงื่อนไขความเสี่ยงหรือเกณฑ์ที่ตั้งไว้ ระบบจะดำเนินการส่งการไปยัง ส่วนส่งออกข้อมูลและปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (Output and Cloud Connectivity) ซึ่งทำหน้าที่ตอบสนองเชิงรุกผ่านช่องทางคู่ขนาน ประกอบด้วยการแจ้งเตือนด้วยเสียงตอบรับผ่านโมดูลเครื่องเล่นไฟล์เสียงและอุปกรณ์ขับสัญญาณเสียง (MP3 Module & Audio Driver) เพื่อให้ผู้ใช้งานรับทราบข้อมูลสถานะโดยไม่ต้องพึ่งพาการมองเห็น ควบคู่ไปกับการส่งผ่านข้อมูลพิกัดละติจูด-ลองจิจูดและสถานะเหตุการณ์ฉุกเฉินผ่านโปรโตคอล HTTP หรือ MQTT เข้าสู่แพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT Cloud Platform) เพื่อจัดเก็บข้อมูลในระบบฐานข้อมูลและแสดงผลบนแดชบอร์ด (Dashboard) ช่วยให้ผู้ใช้ดูแลสามารถกำกับดูแล ระบุตำแหน่ง และเข้าช่วยเหลือผู้ใช้งานได้ อย่างทันทั่วทั้งที่

ultrasonic sensor
(ตรวจจับระยะ)

Microcontroller
ESP32

MP3 Module
&
Audio Driver

MPU 6050
(ตรวจจับการล้ม)

GPS Module
(ระบุตำแหน่ง)

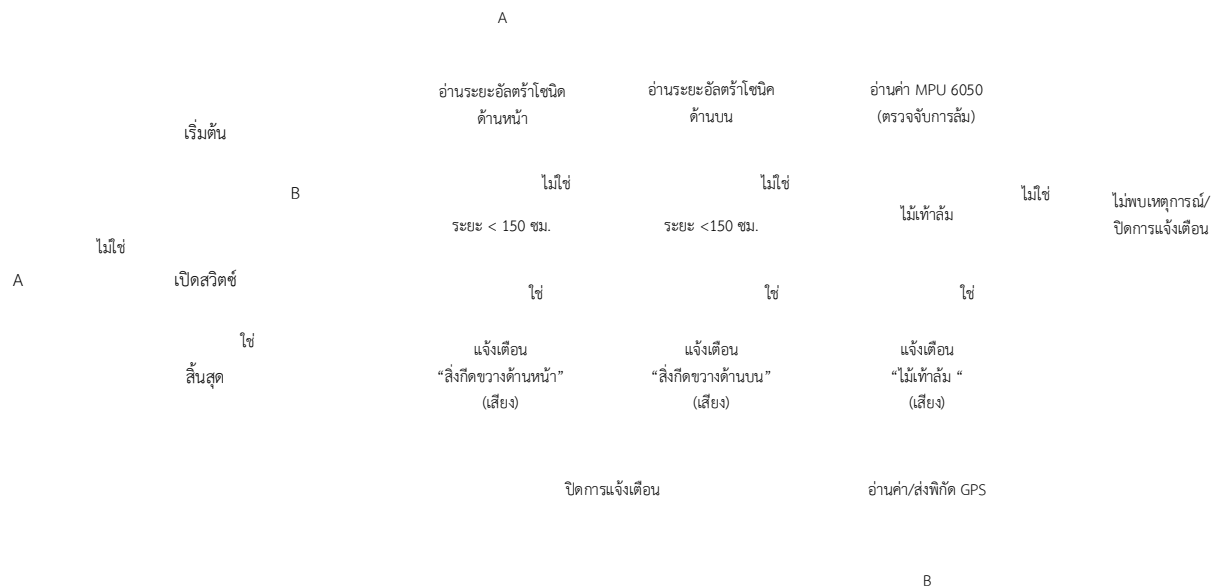
Cloud
IOT platform

รูปที่ 1 แผนภาพระบบการทำงานของไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา

2. การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบ

การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดลำดับขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์และการตอบสนองของระบบอย่างเป็นระบบ โดยอัลกอริทึมดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้

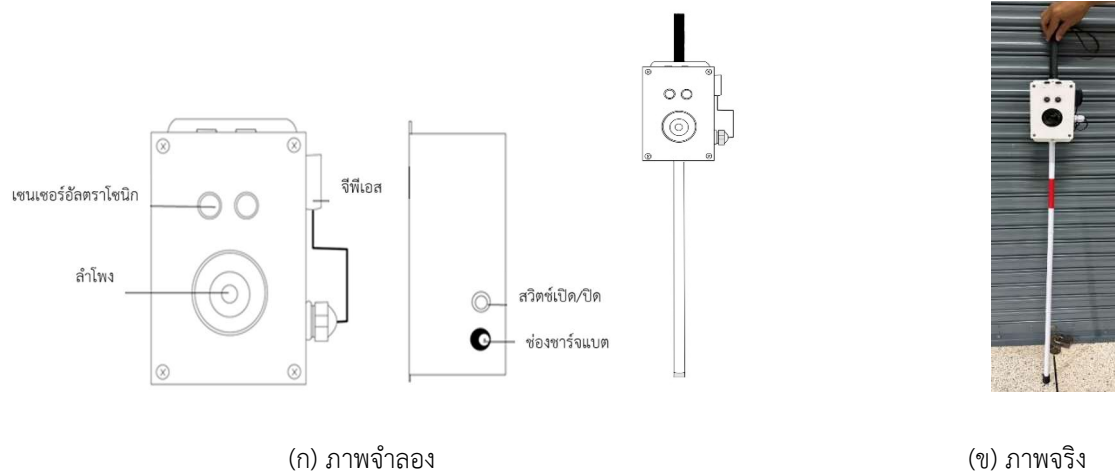
ระบบสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวาง วิเคราะห์สถานการณ์ และแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้แบบเรียลไทม์ แผนผังลำดับการทำงานของระบบแสดงดัง รูปที่ 2 การทำงานของระบบเริ่มต้นจากการเปิดสวิตช์เพื่อจ่ายพลังงานให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ไอเอสพี 32 และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบ เมื่อระบบเริ่มต้นทำงาน ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจสอบสถานะของสวิตช์เพื่อยืนยันว่าระบบอยู่ในโหมดการทำงาน หากระบบไม่อยู่ในสถานะการทำงาน โปรแกรมจะสิ้นสุดการทำงาน แต่หากระบบอยู่ในสถานะพร้อมทำงาน ระบบจะเริ่มกระบวนการตรวจสอบข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ในขั้นตอนแรก ระบบจะทำการอ่านค่าระยะทางจาก เซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งด้านหน้าของไม้เท้า เพื่อใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางบริเวณเส้นทางการเดินของผู้ใช้งาน หากตรวจพบวัตถุในระยะที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 เซนติเมตร ระบบจะประมวลผลว่ามีสิ่งกีดขวางอยู่ด้านหน้า และจะทำการส่งสัญญาณแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่าน บัสเซอร์หรือระบบเสียงจากลำโพง เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางได้อย่างปลอดภัย ในกรณีที่ไม่มีพบสิ่งกีดขวางด้านหน้า ระบบจะดำเนินการอ่านค่าระยะทางจาก เซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งด้านหลังของไม้เท้า เพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุที่อยู่ในระดับศีรษะของผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ไม้เท้าแบบดั้งเดิมไม่สามารถตรวจจับได้ หากระบบตรวจพบวัตถุในระยะที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 เซนติเมตร ระบบจะทำการแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านสัญญาณเสียงเพื่อให้สามารถหลีกเลี่ยงอันตรายได้ หากไม่พบสิ่งกีดขวางทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ระบบจะดำเนินการอ่านค่าการเอียงจาก เซนเซอร์เอ็มพียู 6050 เพื่อประเมินสถานะของไม้เท้า โดยใช้ข้อมูลค่าความเร่งและมุมเอียงในการวิเคราะห์ว่ามีการล้มของไม้เท้าเกิดขึ้นหรือไม่ หากระบบตรวจพบการเอียงที่เกินค่าที่กำหนด ระบบจะประมวลผลว่าเกิดเหตุการณ์ ไม้เท้าล้ม และจะทำการแจ้งเตือนผ่านระบบเสียง พร้อมทั้งทำการอ่านค่าพิกัดตำแหน่งจาก โมดูล GPS เพื่อนำไปใช้ในการติดตามตำแหน่งของผู้ใช้งาน ในกรณีที่ระบบไม่ตรวจพบสิ่งกีดขวางหรือเหตุการณ์ผิดปกติใด ๆ ระบบทำการวนลูปตรวจสอบข้อมูลจากเซนเซอร์อย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ได้แบบเรียลไทม์ อัลกอริทึมที่ออกแบบดังกล่าวช่วยให้ระบบไม้เท้าสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ทั้งในระดับพื้นและระดับศีรษะ รวมถึงสามารถตรวจจับการล้มของไม้เท้าและส่งข้อมูลตำแหน่งของผู้ใช้งานในกรณีฉุกเฉิน ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานของผู้พิการทางสายตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2 อัลกอริทึมการทำงานของระบบไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา

3. การออกแบบต้นแบบของอุปกรณ์

การออกแบบต้นแบบของไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา ดังแสดงใน รูปที่ 3 ซึ่งแสดงโครงสร้างโดยรวมของอุปกรณ์และตำแหน่งการติดตั้งองค์ประกอบต่าง ๆ บนตัวไม้เท้า การออกแบบดังกล่าวมุ่งเน้นให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงของผู้พิการทางสายตา โดยคำนึงถึงปัจจัยด้านความสะดวกในการใช้งาน ความแข็งแรงของโครงสร้าง น้ำหนักของอุปกรณ์ และตำแหน่งของเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างของอุปกรณ์ประกอบด้วย ตัวไม้เท้า (Cane Body) ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักสำหรับรองรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด โดยมีการติดตั้ง กล่องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Enclosure) บริเวณส่วนบนของไม้เท้า ภายในกล่องอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี 32 โมดูลจีพีเอส วงจรควบคุม และวงจรจ่ายพลังงาน ซึ่งถูกออกแบบให้มีขนาดกะทัดรัดและสามารถป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากแรงกระแทกหรือสภาพแวดล้อมภายนอกได้ ในส่วนของระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ได้มีการติดตั้ง เซนเซอร์อัลตราโซนิก จำนวนสองตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกติดตั้งบริเวณด้านหน้าของไม้เท้าเพื่อใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่ในเส้นทางการเดินของผู้ใช้งาน ส่วนตำแหน่งที่สองติดตั้งบริเวณด้านบน เพื่อใช้ตรวจจับวัตถุที่อยู่ในระดับศีรษะ เช่น กิ่งไม้ ป้าย หรือสิ่งกีดขวางที่อยู่เหนือพื้น ซึ่งเป็นปัญหาที่ไม้เท้าแบบดั้งเดิมไม่สามารถตรวจจับได้ การติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับสิ่งกีดขวางในหลายระดับ สำหรับระบบแจ้งเตือนผู้ใช้งาน ได้ติดตั้งลำโพงไว้บริเวณด้านหน้าของกล่องอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณเสียงแจ้งเตือนได้อย่างชัดเจน โดยระบบเสียงจะถูกควบคุมผ่านโมดูล MP3 Player ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณเสียงแจ้งเตือนเมื่อระบบตรวจพบสิ่งกีดขวางหรือเหตุการณ์ผิดปกติ นอกจากนี้ อุปกรณ์ยังมีการติดตั้ง สวิตช์เปิด-ปิด และพอร์ตชาร์จแบตเตอรี่ไว้บริเวณด้านข้างของกล่องอุปกรณ์ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและการบำรุงรักษา โดยระบบใช้แบตเตอรี่แบบชาร์จได้เป็นแหล่งพลังงานหลัก และมีการใช้วงจรดีซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในระบบ ในการออกแบบต้นแบบของอุปกรณ์นี้ ผู้วิจัยได้คำนึงถึงการออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถถือและใช้งานไม้เท้าได้อย่างสะดวกและปลอดภัย โดยอุปกรณ์ถูกออกแบบให้มีน้ำหนักเบาและมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานในชีวิตประจำวันของผู้พิการทางสายตา อีกทั้งยังสามารถติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างสะดวก การออกแบบต้นแบบดังกล่าวช่วยให้ระบบไม้เท้าสามารถทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยตรวจจับ หน่วยประมวลผล และหน่วยแจ้งเตือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการเคลื่อนที่ของผู้พิการทางสายตาในสภาพแวดล้อมจริง



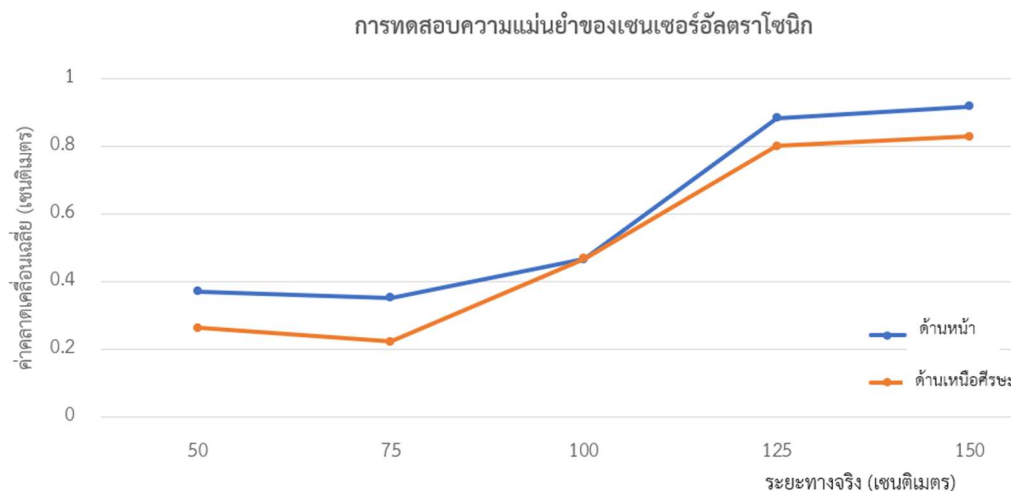
รูปที่ 3 โครงสร้างไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา

ผลการวิจัย

การทดสอบระบบไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตาที่พัฒนาขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง การแจ้งเตือนผู้ใช้งาน และการตรวจจับการเอียงของไม้เท้า โดยทำการทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมภายในอาคารและกำหนดระยะของวัตถุทดสอบที่ระยะต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของเซนเซอร์อัลตราโซนิก รวมถึงการประเมินการทำงานของเซนเซอร์เอ็มพียู 6050 ในการตรวจจับการเอียงของไม้เท้า

1. ผลการทดสอบการตรวจจับสิ่งกีดขวางของเซนเซอร์อัลตราโซนิก

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำในการวัดระยะทางของเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ติดตั้งบนไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ณ ตำแหน่งด้านหน้าและด้านเหนือศีรษะ ในช่วงระยะตรวจจับตั้งแต่ 50 ถึง 150 เซนติเมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้งสองตำแหน่งมีแนวโน้มแปรผันตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงระยะทางระหว่าง 50 ถึง 100 เซนติเมตร เซนเซอร์แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในระดับต่ำและค่อนข้างคงที่ อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะทางในการตรวจจับเพิ่มขึ้นเกินกว่า 100 เซนติเมตร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระยะทางจริง 150 เซนติเมตร เซนเซอร์ตำแหน่งด้านหน้าและด้านเหนือศีรษะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 0.92 เซนติเมตร และ 0.83 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาจากภาพรวมของผลการทดสอบ แม้ความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะทาง แต่ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุดยังคงต่ำกว่า 1.00 เซนติเมตร ผลการทดลองนี้จึงเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่ยืนยันได้ว่า ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำและเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในไม้เท้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับรู้สภาพแวดล้อมและความปลอดภัยให้แก่ผู้พิการทางสายตาในสภาวะการใช้งานจริง



รูปที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการตรวจจับสิ่งกีดขวางของเซนเซอร์อัลตราโซนิกที่ตำแหน่งด้านหน้าและด้านเหนือศีรษะที่ระยะทางต่าง ๆ

2. การทดสอบการตรวจจับความเอียงของเซนเซอร์เอ็มพียู 6050

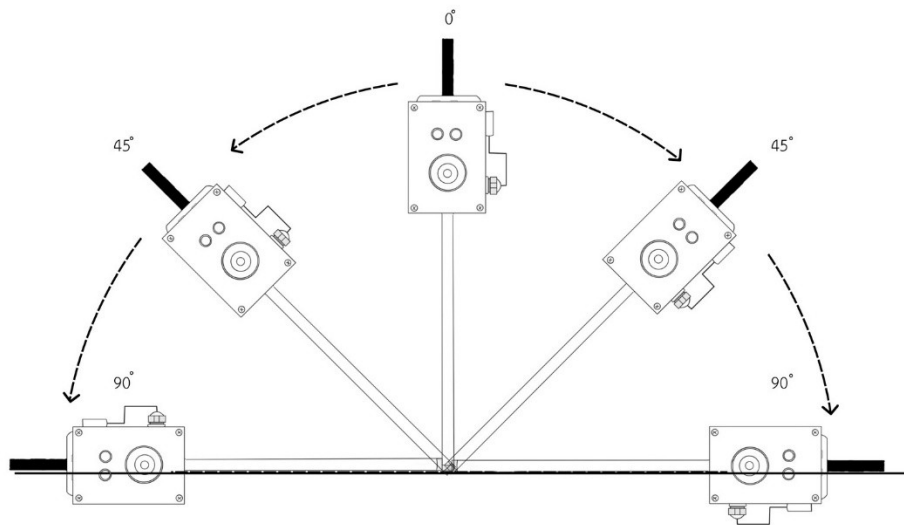
สำหรับการทดสอบความถูกต้องในการตรวจจับมุมเอียงและการทำงานของระบบตัดสินใจแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน คณะผู้วิจัยได้จัดเก็บข้อมูลจากการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งต่อหนึ่งระดับองศา เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนและประสิทธิภาพในการประมวลผล ซึ่งปรากฏผลการทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดสอบการตรวจจับความเอียงเซนเซอร์เอ็มพียู 6050

มุมเอียงจริง (°)	ค่ามุมที่อ่านได้ (°)						ระบบตัดสินใจ (ลัม/ไม่ลัม)	แจ้งเตือนถูกต้อง (✓/X)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ค่าเฉลี่ย (°)		
0	0.15	0.13	0.03	0.35	0.41	0.21	ไม่ลัม	✓
15	15.11	15.03	15.56	15.23	15.17	15.22	ไม่ลัม	✓
30	30.01	30.38	30.29	30.44	30.12	30.25	ไม่ลัม	✓
45	45.18	45.32	45.27	45.03	45.33	45.23	ไม่ลัม	✓
60	60.06	60.34	60.26	60.11	60.28	60.21	ไม่ลัม	✓
75	75.21	75.45	75.33	75.84	75.61	75.49	ไม่ลัม	✓
90	90.27	90.53	90.22	90.35	90.44	90.36	ลัม	✓

การประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับสภาวะการลัมของผู้ใช้งานด้วยเซนเซอร์เอ็มพียู 6050 ทำการทดสอบความแม่นยำในการวัดมุมเอียงตั้งแต่ระยะ 0 ถึง 90 องศา โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งในแต่ละลำดับขั้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ ผลการทดลองดังปรากฏในตารางที่ 1 พบว่าเซนเซอร์มีระดับความแม่นยำสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย อยู่ในเกณฑ์ต่ำเพียง 0.21 ถึง 0.49 องศา ตลอดช่วงการทดสอบ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมที่วัดได้กับการทำงานของระบบตัดสินใจ พบว่าในสภาวะที่ไม่เฝ้ามีความเอียงระหว่าง 0 ถึง 75 องศา ระบบสามารถจำแนกสภาวะเป็น "ไม่ลัม" ได้อย่างถูกต้องแม่นยำทุกกรณีศึกษา ในขณะที่เมื่อไม่เฝ้าทำมุมเอียงเข้าใกล้สภาวะขนานกับพื้นโลกที่ระยะ 90 องศา (ค่าเฉลี่ยจากการวัดเท่ากับ 90.36 องศา) ระบบสามารถตรวจจับและประมวลผลการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็น "ลัม" ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์

ผลการวิเคราะห์ยืนยันได้ว่า เซนเซอร์ MPU-6050 เมื่อทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์และอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้น มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเชิงมุมที่ดี อีกทั้งยังสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงท่าทางของผู้ใช้งานเพื่อส่งสัญญาณแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดความเสี่ยงและเพิ่มความปลอดภัยให้แก่ผู้พิการทางสายตาในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุลัมลงขณะเดินทาง



รูปที่ 4 องค์การเอียง

3.การทดสอบการตรวจจับและการแจ้งเตือนของระบบ

เพื่อให้แน่ใจในประสิทธิภาพการทำงานเชิงรวมของระบบ คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบการตอบสนองของระบบแจ้งเตือนภายใต้เงื่อนไขการตรวจจับที่กำหนด โดยครอบคลุมทั้งการตรวจจับระยะสิ่งกีดขวางในตำแหน่งต่าง ๆ และการจำแนกทิศทางการลំของผู้ใช้งาน เพื่อประเมินความถูกต้องแม่นยำในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบเทียบกับเกณฑ์การตัดสินใจที่ออกแบบไว้ ซึ่งผลการทดสอบการตรวจจับและการแจ้งเตือนของระบบสรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบการตรวจจับและการแจ้งเตือนของระบบ

ทดสอบการตรวจจับและการแจ้งเตือน				
เงื่อนไขการทดสอบ	ระยะจริง/มุมการลំ (เซนติเมตร/องศา)	ค่าที่วัดได้ (เซนติเมตร /องศา)	เกณฑ์ การเตือน	ระบบการ เตือนจริง
ด้านหน้า	70	70.72	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
ด้านหน้า	200	200.67	ไม่แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน
ด้านบน	70	70.19	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
ด้านบน	200	200.16	ไม่แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน
การลំด้านซ้าย	90	90.02	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
การลំด้านขวา	90	90.11	ไม่แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน

จากการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับระบบการแจ้งเตือนของไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตา ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าระบบสามารถปฏิบัติงานได้สอดคล้องกับเกณฑ์การตัดสินใจที่กำหนดไว้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ในทุกเงื่อนไขการทดสอบ ในการทดสอบระบบตรวจจับสิ่งกีดขวางด้านหน้าและด้านบน ณ ระยะทาง 70 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การแจ้งเตือน ระบบสามารถประมวลผลและส่งสัญญาณเตือนได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ระยะ 200 เซนติเมตร ระบบไม่มีการแจ้งเตือนซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขการประหยัดพลังงานและการลดสัญญาณรบกวนในระยะไกล นอกจากนี้ในส่วนของการทดสอบระบบตรวจจับการล้มเชิงทิศทาง พบว่าระบบสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างการล้มด้านซ้ายและการล้มด้านขวาได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยระบบจะเลือกส่งสัญญาณแจ้งเตือนเฉพาะในกรณีการล้มด้านซ้ายตามเงื่อนไขที่ผู้วิจัยกำหนดไว้เพื่อทดสอบความแม่นยำของตัวแปรควบคุม

ผลการทดสอบในภาพรวมชี้ให้เห็นว่า ระบบประมวลผลมีการทำงานที่มีเสถียรภาพ (Robustness) โดยค่าที่วัดได้จริงมีค่าใกล้เคียงกับเกณฑ์การตัดสินใจอย่างมาก และระบบการแจ้งเตือนจริง (Actual Alert System) มีความถูกต้องร้อยละ 100 เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์การแจ้งเตือนเชิงทฤษฎี ข้อมูลนี้จึงยืนยันถึงความพร้อมของไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.การทดสอบความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส (GPS)

การประเมินประสิทธิภาพระบบติดตามตำแหน่ง ดำเนินการทดสอบความแม่นยำของโมดูลจีพีเอส (GPS Module) โดยทำการเปรียบเทียบพิกัดละติจูดและลองจิจูดที่วัดได้จากระบบกับค่าพิกัดจริง ณ สถานที่ต่าง ๆ ภายในพื้นที่ทดสอบจำนวน 5 จุด ซึ่งครอบคลุมทั้งพื้นที่โล่งแจ้งและพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น เพื่อบำเหน็จค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งในหน่วยเมตร ผลการทดสอบความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3

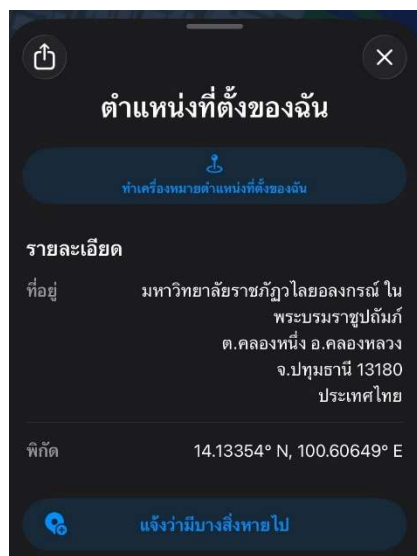
ตารางที่ 3 ตารางผลการทดสอบความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งด้วยจีพีเอส (GPS)

ลำดับ	สถานที่	ค่าจริงจากจีพีเอส		ค่าที่วัดได้		ค่าความคลาดเคลื่อน (เมตร)
		ละติจูด	ลองจิจูด	ลองจิจูด	ลองจิจูด	
1	อาคาร 9	14.13453	100.61053	14.1345530	100.6105420	2.87
2	อาคาร 8	14.13308	100.61237	14.1331240	100.6122890	10.01
3	อาคาร 100 ปี	14.13377	100.61543	14.1337090	100.6153180	13.85
4	หอพักชาย	14.13299	100.60948	14.1329700	100.6094740	2.32
5	สนามฟุตบอล	14.13354	100.60649	14.1336460	100.6065830	15.48

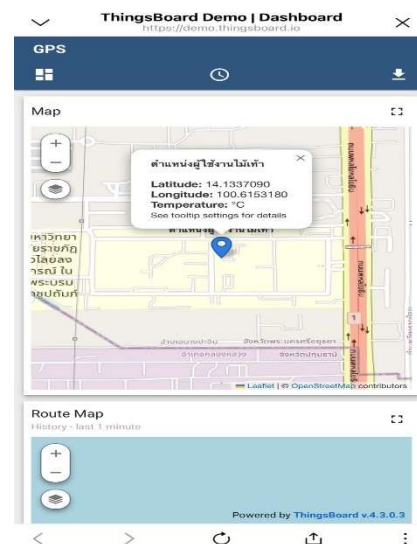
จากการวิเคราะห์พิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ต่าง ๆ ตามที่ปรากฏในตารางที่ 3 พบว่าความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งมีความผันแปรตามลักษณะสภาพแวดล้อมเชิงพื้นที่ โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำสุดถูกตรวจพบ ณ บริเวณหอพักชายและอาคาร 9 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.32 เมตร และ 2.87 เมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในสภาวะ

ที่การรับสัญญาณจากดาวเทียมมีความเสถียร ระบบสามารถระบุพิกัดได้อย่างแม่นยำสูงสุดคล้อยกับมาตรฐานของอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ในพื้นที่ทดสอบบางตำแหน่ง เช่น สนามฟุตบอลและอาคาร 100 ปี พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการปรับตัวสูงขึ้นเป็น 15.48 เมตร และ 13.85 เมตร ตามลำดับ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจมีสาเหตุปัจจัยมาจากสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่ หรือผลกระทบจากสัญญาณสะท้อนจากอาคารสูงข้างเคียง ที่ส่งผลต่อกระบวนการคำนวณพิกัดของตัวรับสัญญาณ แม้ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าสูงสุดที่ 15.48 เมตร แต่เมื่อพิจารณาในบริบทของการนำไปใช้งานร่วมกับไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อระบุตำแหน่งคร่าว ๆ ของผู้พิการทางสายตาในกรณีฉุกเฉิน ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวยังอยู่ในเกณฑ์ที่ระบบรับส่งข้อมูลและแอปพลิเคชันแจ้งเตือนสามารถนำไปประมวลผลเพื่อติดตามตัวบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อมูลนี้จึงยืนยันได้ว่าระบบจีพีเอสที่บูรณาการร่วมกับไม้เท้ามีความสามารถในการระบุตำแหน่งเชิงพื้นที่ได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อให้การติดตามตำแหน่งของผู้พิการทางสายตามีประสิทธิภาพและสามารถตรวจสอบได้แบบเรียลไทม์ คณะผู้วิจัยได้บูรณาการระบบส่งผ่านข้อมูลพิกัดภูมิศาสตร์จากไม้เท้าควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าสู่แพลตฟอร์มอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งดังที่แสดงในรูปที่ 5 โดยข้อมูลพิกัดละติจูดและลองจิจูดที่ตรวจจับได้จากระบบจีพีเอสจะถูกส่งผ่านโปรโตคอลการสื่อสารไปยังแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนและแดชบอร์ดแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ในส่วนของแอปพลิเคชัน (รูปด้านซ้าย) คือค่าจริงจากจีพีเอสขณะที่ในส่วนของแดชบอร์ด ThingsBoard (รูปด้านขวา) ข้อมูลพิกัดที่ระบบวัดได้จะถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบแผนที่เชิงตัวเลข (Digital Map) พร้อมระบุค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดที่แม่นยำสูง (เช่น Latitude: 14.1337090, Longitude: 100.6153180) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบในตารางที่ 3



(ก) ค่าจริงจากจีพีเอส



(ข) ค่าที่วัดได้

รูปที่ 5 ค่าจริงจากจีพีเอสเทียบกับค่าที่วัดได้จริง

อภิปรายผล

ระบบมีความแม่นยำในการตรวจจับสิ่งกีดขวางสูงสุดในช่วงระยะ 50 ถึง 100 เซนติเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1.00 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอต่อการใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นเกินกว่า 100 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนจะปรับตัวสูงขึ้นอันเนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของคลื่นอัลตราโซนิกและการสูญเสียพลังงานตามระยะทาง ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดของเซนเซอร์ HC-SR04 ที่ระบุในงานวิจัยของ โสภิตา ท่วมมี และคณะ (2565) ในด้านการตรวจจับสภาวะการล้มของเซนเซอร์เอ็มพียู 6050 แสดงประสิทธิภาพในการวัดมุมเอียงได้อย่างแม่นยำ และสามารถจำแนกสภาวะการล้มที่ระดับ 90 องศา ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Anwar และ Aljahdali (2017) ในการใช้ตัวแปรจลนศาสตร์ระบุอุบัติเหตุ สำหรับระบบระบุตำแหน่งจีพีเอส พบค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 15.48 เมตร ในพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นเนื่องจากปรากฏการณ์สัญญาณสะท้อนจากอาคารสูง แต่พิกัดที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการติดตามตัวผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์

สรุปผลการวิจัย

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถบูรณาการเซนเซอร์เพื่อยกระดับความปลอดภัยในการนำทาง โดยเซนเซอร์อัลตราโซนิกสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้อย่างแม่นยำทั้งในระดับพื้นดินและระดับศีรษะ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่า 1.00 เซนติเมตร ในระยะตรวจจับไม่เกิน 150 เซนติเมตร ขณะที่ระบบตรวจจับการล้มด้วยเซนเซอร์เอ็มพียู 6050 มีประสิทธิภาพในการจำแนกการล้มได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ที่ระดับมุมเอียง 90 องศา นอกจากนี้ ระบบระบุตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ (GPS) ยังสามารถระบุตำแหน่งผู้ใช้งานเพื่อการติดตามตัวในกรณีฉุกเฉินผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์ ThingsBoard ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะพบความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งเฉลี่ย 2.32 ถึง 15.48 เมตร ตามสภาพแวดล้อมทางกายภาพที่แตกต่างกัน

ข้อเสนอแนะ

จากข้อค้นพบที่ระบบมีความแม่นยำในการตรวจจับสิ่งกีดขวางระดับศีรษะและมีระบบแจ้งเตือนสภาวะวิกฤตผ่านเครือข่ายไร้สายที่มีเสถียรภาพ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องด้านการดูแลสุขภาพหรือสถานพยาบาลควรนำต้นแบบนี้มาควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับผู้พิการทางสายตาไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์เสริมทักษะการเคลื่อนไหว เพื่อลดความเสี่ยงจากการชนวัตถุในมุมอับสายตาและเพิ่มช่องทางการติดตามตำแหน่งกรณีเกิดอุบัติเหตุ นอกจากนี้ควรมีการจัดอบรมการใช้งานควบคู่กับแอปพลิเคชันเพื่อให้ผู้ดูแลสามารถเฝ้าระวังตรวจสอบระยะไกลได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้พบข้อจำกัดด้านค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์อัลตราโซนิกเมื่อตรวจจับในระยะไกลเกิน 100 เซนติเมตร และปัญหาพิกัดจีพีเอส คลาดเคลื่อนในพื้นที่อับสัญญาณ การวิจัยในครั้งต่อไปจึงควรพิจารณาการใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์แบบผสมผสาน (Sensor Fusion) เช่น LiDAR หรือเซนเซอร์อินฟราเรด เพื่อเพิ่มความแม่นยำในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย อีกทั้งควรพัฒนาการแจ้งเตือนผ่านการสั่นสะเทือนสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่มีเสียงรบกวนสูง

References

- [1] World Health Organization, World Report on Vision, Geneva: WHO Press, 2019.
- [2] Nawar, A., Hossain, F., & Anwar, M. G. (2015). Ultrasonic Navigation System for the visually impaired & blind pedestrians. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 4(2), 13-18.
- [3] Wannakam, K., Chattunyakit, S., & Boonraksa, P. (2025). อุปกรณ์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้พิการทางสายตา. *Rattanakosin Journal of Science and Technology*, 7(3), 271-285.

- [4] Malla, S., Sahu, P. K., Patnaik, S., & Biswal, A. K. (2023). Obstacle Detection and Assistance for Visually Impaired Individuals Using an IoT-Enabled Smart Blind Stick. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 37(3)
- [5] โสภิตา ท้วมมี หทัยรัตน์ เกตุมนัชัยรัตน์ ฉัตรลิกา เพชรณีนิลใส และ พศวัต พันธิ์โสทธิ. (2565). ไม้เท้าอัจฉริยะสำหรับช่วยเหลือผู้พิการทางสายตา. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology), 18(2), 22-39
- [6] กาญจนา จันทร์ประเสริฐ. (2559). การพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 25(1), 136-147.
- [7] Anwar, A., & Aljahdali, S. (2017). A smart stick for assisting blind people. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 19(3), 86-90.

การประเมินเชิงปฐพีวิศวกรรมและสถิติของดินทรายปนตะกอนบดอัด สำหรับชั้นรองพื้นทางถนนชนบท

Geotechnical and Statistical Assessment of Compacted Silty Sand for Rural Road Subbase Applications

เทวกุล จันทร์ขามป้อม^{1*}

Tewakun Chankampom^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น,
ขอนแก่น, 40000, ประเทศไทย

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan,
Khon Kaen Campus, Khon Kaen, 40000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: tawakun.ch@rmu.ac.th

รับบทความ (Received) : April 28, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 17, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

การบดอัดดินเป็นกระบวนการสำคัญในงานก่อสร้างถนน เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความมั่นคง ความสามารถในการรับน้ำหนัก และอายุการใช้งานของโครงสร้างทาง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับใช้เป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยบูรณาการการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้จากการทดสอบคุณสมบัติดินและการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีการร่ายทรายจากพื้นที่กรณีศึกษาในจังหวัดปทุมธานี จำนวน 20 ชุดข้อมูล ผลการจำแนกดินพบว่า ดินในพื้นที่เป็นดินทรายปนตะกอน (Silty Sand: SM) ตามระบบ USCS มีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 49.16 ค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 45.27 ค่าดัชนีพลาสติกเท่ากับ 3.89 และค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินอยู่ในช่วง 2.65–2.75 ซึ่งสะท้อนว่าดินมีความเป็นพลาสติกต่ำและมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นทางเมื่อมีการควบคุมความชื้นและการบดอัดอย่างเหมาะสม ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นแห้งในสนามพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าเฉลี่ย 93.46% และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 6.61% แสดงถึงคุณภาพการบดอัดโดยรวมที่อยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมีความแปรปรวนบางส่วนในกระบวนการก่อสร้าง นอกจากนี้ การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มทดสอบ A และ B ด้วยวิธี Welch's t-test พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่ม A ให้ค่าการบดอัดสูงกว่ากลุ่ม B และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของผลต่างค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 8.41 ถึง 13.56 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบทได้ในเชิงเบื้องต้น อย่างไรก็ตาม ควรมีการควบคุมความชื้น การบดอัด และกระบวนการทดสอบภาคสนามอย่างเข้มงวด เพื่อเพิ่มความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของคุณภาพงานก่อสร้างถนนในระยะยาว

คำสำคัญ : ดินทรายปนตะกอน ชั้นรองพื้นทาง การบดอัดดิน ความหนาแน่นแห้งในสนาม วิธีการร่ายทราย

Abstract

Soil compaction is a critical process in road construction because it directly affects structural stability, load-bearing capacity, and long-term pavement performance. This study aimed to assess the suitability of compacted silty sand for use as a rural road subbase through an integrated geotechnical and statistical approach. The dataset was obtained from soil property testing and field dry density testing using the sand cone method in a case study area in Pathum Thani Province, Thailand, comprising 20 field test samples. Soil classification results indicated that the material was silty sand (SM) according to the Unified Soil Classification System (USCS), with a liquid limit of 49.16, a plastic limit of 45.27, a plasticity index of 3.89, and a specific gravity ranging from 2.65 to 2.75. These properties indicate low plasticity and suggest that the soil has potential for subbase application when moisture content and compaction are properly controlled. Statistical analysis of the field dry density results showed that the average relative compaction was 93.46%, with a coefficient of variation of 6.61%, indicating generally acceptable compaction quality with some variability in field performance. Furthermore, comparison between test groups A and B using Welch's t-test revealed a statistically significant difference, with Group A exhibiting higher compaction performance than Group B. The 95% confidence interval for the mean difference ranged from 8.41 to 13.56. The findings suggest that the studied silty sand has preliminary potential for use as a rural road subbase material; however, stricter control of moisture content, compaction procedures, and field-testing practices is necessary to improve consistency and reliability in construction quality.

Keywords: Silty Sand, Road Subbase, Soil Compaction, Field Dry Density, Sand Cone Method

บทนำ

การบดอัดดินเป็นกระบวนการพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมโยธา โดยเฉพาะงานคันทาง งานชั้นรองพื้นทาง และงานโครงสร้างดิน เนื่องจากการบดอัดที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความหนาแน่นแห้ง ลดปริมาณช่องว่าง ลดการทรุดตัว และปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุให้เหมาะสมต่อการรับน้ำหนักในระยะยาว พารามิเตอร์จากการทดสอบการบดอัดในห้องปฏิบัติการ เช่น ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าความชื้นที่เหมาะสม จึงถูกใช้เป็นฐานสำคัญในการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนามอย่างแพร่หลาย [1] สำหรับงานถนนชั้นรองพื้นทางมีบทบาทสำคัญในการกระจายแรงจากชั้นผิวทางและเพิ่มความมั่นคงให้กับโครงสร้างทาง หากวัสดุมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอหรือมีการบดอัดไม่เพียงพออาจนำไปสู่การทรุดตัวไม่เท่ากัน การแตกร้าว และการเสื่อมสภาพก่อนอายุการใช้งานที่คาดหวังได้ การประเมินวัสดุรองพื้นทางจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะชนิดของดินเท่านั้น แต่ควรพิจารณาร่วมกับคุณภาพการบดอัดจริงในสนาม [1], [2] ในทางปฏิบัติการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนามยังคงอาศัยการทดสอบความหนาแน่นแห้งเป็นหลัก โดยเฉพาะวิธีกรวยทรายซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่นิยมใช้ในงานสนาม เนื่องจากใช้งานง่าย ต้นทุนไม่สูง และสามารถเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจากห้องปฏิบัติการได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยได้รายงานว่าวิธีกรวยทรายอาจได้รับอิทธิพลจากรูปร่างและขนาดของหลุมทดสอบ รวมถึงเงื่อนไขของวัสดุที่ใช้เติมหลุม ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าความหนาแน่นที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน [3] นอกจากนี้ข้อจำกัดของวิธีทดสอบแล้ว คุณสมบัติของวัสดุเองยังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่กำหนดประสิทธิภาพของการบดอัด โดยเฉพาะดินทรายปนตะกอนซึ่งพบได้บ่อยในงานถนนและงานถม ดินชนิดนี้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุวิศวกรรมได้ หากมีการควบคุมความชื้นและพลังงานบดอัดอย่างเหมาะสม งานศึกษาก่อนหน้าพบว่าระดับการบดอัดมีอิทธิพลโดยตรงต่อพฤติกรรมเชิงกลของ silty sand ทั้งด้านความแข็งแรงและการเปลี่ยนรูป [4] และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของวัสดุละเอียด

ร่วมกับสภาพการบดอัดยังส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ ในช่วงหลังมีการนำเทคนิคการประเมินคุณภาพขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์ข้อมูลและแบบจำลองเชิงอัจฉริยะ มาใช้เพื่อประเมินความสม่ำเสมอของการบดอัดชั้นทางมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในโครงการถนนชนบทและโครงการก่อสร้างทั่วไป การทดสอบภาคสนามแบบดั้งเดิมยังคงมีบทบาทสำคัญในการยอมรับงาน ดังนั้นการศึกษาที่เชื่อมโยงคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดินเข้ากับผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอย่างเป็นระบบ จึงยังมีความจำเป็นอย่างยิ่งในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ [5], [6] จากข้อมูลกรณีศึกษาที่ดินในพื้นที่จัดอยู่ในกลุ่มดินทรายปนตะกอน การวิจัยนี้จึงมุ่งประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยบูรณาการการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ [7] เพื่ออธิบายทั้งศักยภาพของวัสดุและความสม่ำเสมอของผลการบดอัดในสนามซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างทาง

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางปฐพีวิศวกรรมของดินทรายปนตะกอนในพื้นที่กรณีศึกษา และประเมินความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบทตลอดจนประเมินคุณภาพการบดอัดจากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีการยกราย

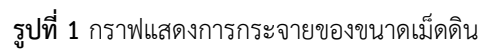
2. สมมติฐานการวิจัย

- 1) ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามของดินทรายปนตะกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์อยู่ในระดับที่สะท้อนถึงคุณภาพการบดอัดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท
- 2) ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามมีความแปรปรวนในระดับที่สามารถใช้ประเมินความสม่ำเสมอของกระบวนการบดอัดในพื้นที่ศึกษาได้
- 3) กลุ่มทดสอบในสนามมีผลการบดอัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของสภาพการปฏิบัติงานหรือความสม่ำเสมอของกระบวนการก่อสร้างในแต่ละกลุ่ม

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบทด้วยการบูรณาการการประเมินเชิงปฐพีวิศวกรรมและการวิเคราะห์เชิงสถิติ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการประเมินงานบดอัดดินที่ให้ความสำคัญทั้งกับคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ความสามารถในการบดอัด และความสม่ำเสมอของผลการควบคุมคุณภาพในสนาม

4.1 พื้นที่ศึกษา การวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่กรณีศึกษาก่อสร้างถนนชนบทแห่งหนึ่งในจังหวัดปทุมธานี โดยเลือกพื้นที่ที่มีลักษณะดินและสภาพแวดล้อมใกล้เคียงกับพื้นที่ก่อสร้างถนนทั่วไป เพื่อให้ผลการทดสอบสามารถสะท้อนพฤติกรรมของวัสดุในสภาพการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม ก่อนดำเนินการทดสอบภาคสนาม ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของดินในพื้นที่ศึกษา เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทาง การทดสอบที่ดำเนินการประกอบด้วย การวิเคราะห์ขนาดเม็ดดินด้วยตะแกรงมาตรฐาน การทดสอบด้วยไฮโดรมิเตอร์ การหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน และการประเมินค่าขีดจำกัดลอว์เพอร์รี่ [5] แสดงดังรูปที่ 1



ตารางที่ 1 สรุปผลการจำแนกประเภทดินและสมบัติพื้นฐานที่ใช้ประกอบการวิจัย

รายการ	ค่า
ประเภทดินตาม USCS	SM (Silty Sand)
ประเภทดินตาม AASHTO	A-2-5
ค่าขีดจำกัดเหลว (LL)	49.16
ค่าขีดจำกัดพลาสติก (PL)	45.27
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	3.89
ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Gs)	2.65–2.75

4.2 การเก็บข้อมูล หลังจากประเมินสมบัติเบื้องต้นของดินแล้วผู้วิจัยได้เตรียมพื้นที่ทดลองโดยทำความสะอาดบริเวณทดสอบและจัดเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็น ได้แก่ กรวยทราย เครื่องชั่งน้ำหนัก และอุปกรณ์สำหรับวัดความชื้นของดิน เพื่อให้การเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นไปอย่างถูกต้องและลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงาน การเก็บข้อมูลภาคสนามดำเนินการโดยชุดดินในบริเวณที่กำหนดให้เป็นหลุมทดสอบตามขนาดที่เหมาะสม จากนั้นเก็บตัวอย่างดินเปียกจากหลุมที่ขุด

ออกมาเพื่อนำไปชั่งน้ำหนัก และใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งในสนามในลำดับต่อไป ข้อมูลที่เก็บจากภาคสนามประกอบด้วยน้ำหนักดินเปียก ปริมาตรของหลุมทดสอบ และค่าความชื้นของดิน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม สำหรับการวิจัยครั้งนี้ ได้เก็บข้อมูลผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดข้อมูล โดยกำหนดค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการเท่ากับ 1.80 g/cm^3 เป็นค่าอ้างอิงในการประเมินคุณภาพการบดอัดของแต่ละจุดทดสอบ เพื่อสรุปขอบเขตข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของข้อมูลภาคสนามที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์

รายการ	รายละเอียด
วิธีทดสอบภาคสนาม	การทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยวิธีกรวยทราย
จำนวนชุดข้อมูล	20 ชุดข้อมูล
ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ	1.80 g/cm^3
ตัวแปรหลักที่ใช้วิเคราะห์	ความหนาแน่นแห้งในสนาม, ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ในการศึกษานี้การเก็บข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดเป็นข้อมูลที่ได้จากโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกัน โดยเก็บตามตำแหน่งและระยะทางที่กำหนดตามแนวทางการตรวจสอบงานภาคสนามของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ ผู้วิจัยได้จัดกลุ่มข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ A และ B ตามชุดข้อมูลที่บันทึกไว้ในการตรวจสอบภาคสนาม เพื่อใช้พิจารณาความแตกต่างของผลการบดอัดระหว่างชุดข้อมูล อย่างไรก็ตามการแบ่งกลุ่มดังกล่าวเป็นการจัดกลุ่มเพื่อการวิเคราะห์ทางสถิติภายในชุดข้อมูลจากโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกัน มิได้หมายถึงการเปรียบเทียบวัสดุต่างชนิดหรือพื้นที่ก่อสร้างคนละโครงการ

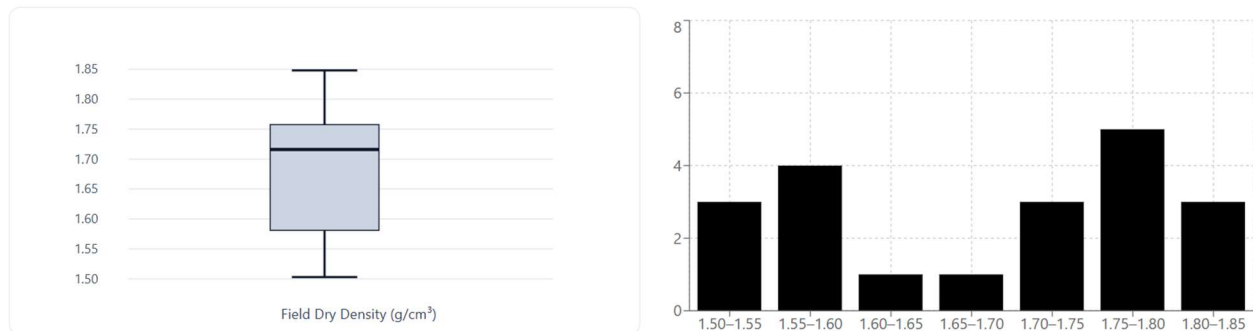
4.3 การทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม การประเมินความหนาแน่นแห้งของดินในสนามดำเนินการด้วยวิธีกรวยทราย (Sand Cone Method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ทรายมาตรฐานในการหาปริมาตรของหลุมทดสอบ หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลน้ำหนักดินเปียก น้ำหนักดินแห้ง และปริมาตรหลุมมาคำนวณหาความหนาแน่นแห้งในสนาม วิธีดังกล่าวเป็นเครื่องมือสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพการบดอัดดินในงานก่อสร้างถนน เนื่องจากสามารถประเมินระดับความแน่นของวัสดุในสภาพจริงได้โดยตรง ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ครั้ง แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งที่วัดได้มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง $1.503\text{--}1.848 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างของระดับการบดอัดในแต่ละจุดทดสอบแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ครั้ง

ครั้งที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)
1	1.8	1.753
2	1.8	1.827
3	1.8	1.581
4	1.8	1.710
5	1.8	1.742
6	1.8	1.797

ครั้งที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)
7	1.8	1.722
8	1.8	1.563
9	1.8	1.761
10	1.8	1.592
11	1.8	1.581
12	1.8	1.752
13	1.8	1.531
14	1.8	1.522
15	1.8	1.503
16	1.8	1.813
17	1.8	1.607
18	1.8	1.754
19	1.8	1.677
20	1.8	1.848

ผู้วิจัยได้พิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลความหนาแน่นแห้งในสนามด้วยแผนภาพ Boxplot และ Histogram เพื่อใช้ตรวจสอบแนวโน้มของข้อมูลและประเมินความสม่ำเสมอของผลการทดสอบเบื้องต้น



รูปที่ 2 ค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นแห้งในสนามจากผลการทดสอบ

จากรูปที่ 2 แผนภาพกล่องแสดงค่าการกระจายตัวของความหนาแน่นแห้งในสนามจากผลการทดสอบจำนวน 20 จุด โดยค่ามัธยฐานอยู่ใกล้เคียง 1.72 g/cm^3 และข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วงระหว่างควอไทล์สะท้อนให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของผลการทดสอบในระดับหนึ่ง แม้ว่าจะพบความแตกต่างของค่าความหนาแน่นในบางจุดทดสอบ ส่วนฮิสโตแกรมแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นแห้งในสนามมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงประมาณ $1.50\text{--}1.85 \text{ g/cm}^3$ โดยค่าที่พบมากกระจุกตัวในช่วงประมาณ $1.70\text{--}1.75 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งสะท้อนว่าผลการทดสอบส่วนใหญ่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน และสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินคุณภาพและความสม่ำเสมอของการบดอัดดินในสนามได้

4.4 การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ ภายหลังจากได้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนามจากการทดสอบด้วยวิธีกรวยทรายแล้ว ผู้วิจัยได้นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ (Relative Compaction) เพื่อประเมินระดับความแน่นของดินในสนามเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์คำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม (γ_{field}) และค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (γ_{max}) ดังสมการที่ (1)

$$Relative\ Compaction\ (\%) = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{field}} \times 100$$

เมื่อ

γ_{field} = ค่าความหนาแน่นแห้งของดินในสนาม (g/cm^3)

γ_{max} = ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)

ในการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการมีค่าเท่ากับ $1.80\ g/cm^3$ สำหรับทุกจุดทดสอบ และนำค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของแต่ละจุดมาคำนวณเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ เพื่อใช้เป็นดัชนีสำหรับประเมินคุณภาพงานบดอัดในสนาม ตัวอย่างเช่น หากค่าความหนาแน่นแห้งในสนามของจุดทดสอบหนึ่งมีค่าเท่ากับ $1.753\ g/cm^3$ ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะคำนวณได้ดังนี้

$$Relative\ Compaction = \left(\frac{1.753}{1.80} \right) \times 100 = 97.39$$

การคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้ถูกนำไปใช้กับข้อมูลภาคสนามทั้งหมดจำนวน 20 ชุดข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบระดับการบดอัดของแต่ละจุดทดสอบ และใช้ประกอบการพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท เพื่อให้เห็นผลการคำนวณอย่างชัดเจน ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนาแน่นแห้งในสนามและค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของแต่ละจุดทดสอบ

ตารางที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของผลการทดสอบภาคสนาม

ครั้งที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ (g/cm^3)	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm^3)	ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ (%)
1	1.80	1.753	97.39
2	1.80	1.827	101.50
3	1.80	1.581	87.83
4	1.80	1.710	95.00
5	1.80	1.742	96.78
6	1.80	1.797	99.83
7	1.80	1.722	95.67
8	1.80	1.563	86.83
9	1.80	1.761	97.83
10	1.80	1.592	88.44

11	1.80	1.581	87.83
12	1.80	1.752	97.33
13	1.80	1.531	85.06
14	1.80	1.522	84.56
15	1.80	1.503	83.50
16	1.80	1.813	100.72
17	1.80	1.607	89.28
18	1.80	1.754	97.44
19	1.80	1.677	93.17
20	1.80	1.848	102.67

จากผลการคำนวณพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่ากระจายอยู่ในช่วงประมาณ 83.50–102.67% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับการบดอัดในแต่ละจุดทดสอบ ทั้งนี้ค่าที่สูงกว่า 100% อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดสอบภาคสนาม ความแตกต่างของสภาพวัสดุในแต่ละจุด หรือความไม่สอดคล้องระหว่างค่ามาตรฐานในห้องปฏิบัติการกับสภาพจริงในสนาม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมด้วยวิธีทางสถิติเพื่อประเมินแนวโน้มรวมและความสม่ำเสมอของผลการทดสอบอย่างเป็นระบบ

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติหลังการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ของข้อมูลทุกชุดแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน เพื่อประเมินแนวโน้มของข้อมูล ระดับความแปรปรวน และความแตกต่างของผลการทดสอบระหว่างกลุ่มตัวอย่างในสนาม โดยสถิติเชิงพรรณนาที่ใช้ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่ามัธยฐาน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (Coefficient of Variation: CV) เพื่ออธิบายลักษณะการกระจายตัวและระดับความสม่ำเสมอของผลการบดอัดในสนาม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนใช้เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินระดับความผันแปรของข้อมูลเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล จากสมการที่ (2)

$$CV(\%) = \left(\frac{SD}{\bar{X}} \right) \times 100$$

เมื่อ

SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

$\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

นอกจากนี้ผู้วิจัยใช้แผนภาพ Boxplot และ Histogram เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเชิงภาพ โดย Boxplot ใช้ในการพิจารณาค่ามัธยฐาน ช่วงระหว่างควอไทล์ และแนวโน้มของค่าที่อาจแตกต่างจากข้อมูลส่วนใหญ่ ขณะที่ Histogram ใช้ในการพิจารณาความถี่ของข้อมูลในแต่ละช่วงค่า เพื่อประเมินว่าข้อมูลมีการกระจุกตัวในช่วงใดและมีความสม่ำเสมอเพียงใด สำหรับการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ระหว่างกลุ่มตัวอย่าง A และ B ผู้วิจัยเลือกใช้ Welch's t-test เนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลเพียงสองกลุ่ม และเป็นวิธีที่เหมาะสมในกรณีที่ข้อมูลอาจมีความแปรปรวนไม่เท่ากันระหว่างกลุ่ม โดยรายงานผลร่วมกับช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของผลต่างค่าเฉลี่ย เพื่อแสดงทิศทางและขนาดของความแตกต่างอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังประเมินขนาดอิทธิพล (effect size) ด้วยค่า Cohen's d เพื่อสะท้อนความสำคัญเชิงปฏิบัติของ

ความแตกต่างที่พบ ไม่ได้พิจารณาเฉพาะนัยสำคัญทางสถิติเท่านั้น [7], [8] โดยทั้งนี้การเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ใน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินว่าผลการบดอัดจากชุดข้อมูลภาคสนามภายในโครงการก่อสร้างงานถนนเดียวกันว่ามีความ แตกต่างกันหรือไม่ เพื่อใช้ในการตีความผลการเปรียบเทียบที่มุ่งเน้นในเชิงความสม่ำเสมอของข้อมูลและกระบวนการควบคุม คุณภาพมากกว่าการสรุปว่าความแตกต่างดังกล่าวเกิดจากปัจจัยภาคสนามอื่นๆ ใดโดยตรง

ผลการวิจัย

5.1 ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จากข้อมูลการ ทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 ชุดข้อมูล พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าตั้งแต่ 83.503% ถึง 102.689% และมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 93.46% ซึ่งสะท้อนว่าการบดอัดดินในพื้นที่ศึกษาโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมี ความแตกต่างของระดับการบดอัดระหว่างจุดทดสอบอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณารายจุด พบว่ามีบางตำแหน่งที่ค่าเปอร์เซ็นต์การบด อัดสัมพัทธ์มากกว่า 100% ได้แก่ จุดทดสอบที่ 2, 16 และ 20 ขณะที่บางตำแหน่งมีค่าต่ำกว่า 90% หลายจุด เช่น จุดทดสอบที่ 3, 8, 10, 11, 13, 14, 15 และ 17 ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่า แม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมของโครงการจะอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ในระดับรายจุด ยังคงมีความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพการบดอัด ซึ่งควรได้รับการพิจารณาควบคู่กับผลเชิงสถิติในขั้นตอนต่อไป แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ครั้งที่ทดสอบ	กลุ่มที่ทดสอบ	ความหนาแน่นแห้งในสนาม (g/cm ³)	ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ (%)
1	A	1.753	97.419
2	A	1.827	101.515
3	B	1.581	87.862
4	A	1.710	95.051
5	A	1.742	96.825
6	A	1.797	99.858
7	A	1.722	95.678
8	B	1.563	86.883
9	A	1.761	97.848
10	B	1.592	88.492
11	B	1.581	87.847
12	A	1.752	97.343
13	B	1.531	85.075
14	B	1.522	84.604
15	B	1.503	83.503
16	A	1.813	100.734
17	B	1.607	89.323
18	A	1.754	97.478

19	B	1.677	93.170
20	A	1.848	102.689

5.2 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์แสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของข้อมูลเท่ากับ 93.46% ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.38 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 6.176 ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 38.14 และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 6.61% ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ที่อยู่ในระดับไม่สูงมากนักสะท้อนว่าข้อมูลมีความแปรปรวนในระดับปานกลาง และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการบดอัดในสนามมีความสม่ำเสมอในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้ว่าคุณภาพงานคงที่ในทุกตำแหน่ง เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของค่าความหนาแน่นแห้งในสนาม พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วงประมาณ 1.70–1.75 g/cm³ โดยค่ามัธยฐานอยู่ประมาณ 1.72 g/cm³ และช่วงข้อมูลทั้งหมดอยู่ระหว่าง 1.503–1.848 g/cm³ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนว่าการทดสอบมีค่ากลางที่ค่อนข้างชัดเจน แต่ยังมีค่าต่ำและค่าสูงบางจุดที่ทำให้การกระจายของข้อมูลค่อนข้างกว้าง แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์

ตัวแปร	Mean	SE Mean	StDev	Variance	Coef Var (%)
Relative Compaction	93.46	1.38	6.176	38.14	6.61

5.3 ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกลุ่มและขนาดอิทธิพล ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B ด้วยวิธี Welch's t-test พบว่า กลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์สูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.41% ขณะที่กลุ่ม B มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.42% สะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพการบดอัดในสนามระหว่างสองกลุ่มพื้นที่อย่างเด่นชัด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม พบว่าข้อมูลภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวในระดับไม่สูงมากนัก จึงสามารถใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มได้อย่างเหมาะสม [7], [8] แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มด้วย Welch's t-test

รายการ	กลุ่ม A	กลุ่ม B
จำนวนตัวอย่าง (n)	11	9
ค่าเฉลี่ย RC (%)	98.41	87.42
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	2.450	2.900

จากตารางที่ 7 พบว่า กลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์สูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม A มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 98.41% ขณะที่กลุ่ม B มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.42% และเมื่อพิจารณาร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละกลุ่ม พบว่า การกระจายตัวของข้อมูลภายในกลุ่มอยู่ในระดับไม่สูงมากนัก สะท้อนว่าค่าที่วัดได้ภายในแต่ละกลุ่มมีความสม่ำเสมอใน

ระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองกลุ่มยังคงเด่นชัด จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวไปทดสอบทางสถิติด้วยวิธี Welch's t-test เพื่อยืนยันว่าความแตกต่างที่พบมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบ Welch's t-test

สถิติการเปรียบเทียบ	ค่า
ผลต่างค่าเฉลี่ย (%)	10.986
95% CI ของผลต่างค่าเฉลี่ย	8.410 ถึง 13.561
Welch's (t)	9.029
df	15.768
(p)-value	< 0.001
Cohen's (d)	4.131
การตีความ	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และมีอิทธิพลสูงมาก

ผลการทดสอบในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นว่า ผลต่างค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม A และกลุ่ม B เท่ากับ 10.986 จุดร้อยละ และช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 8.410 ถึง 13.561 ซึ่งไม่ครอบคลุมศูนย์ สอดคล้องกับค่า Welch's t เท่ากับ 9.029 และค่า $p < 0.001$ ที่ยืนยันว่าความแตกต่างระหว่างสองกลุ่มมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างชัดเจน นอกจากนี้ค่า Cohen's $d=4.131$ ซึ่งอยู่ในระดับสูงมาก ยังสะท้อนว่าความแตกต่างดังกล่าวมีความสำคัญในเชิงปฏิบัติสำหรับการควบคุมคุณภาพงานบดอัดในสนาม

5.4 การประเมินการผ่านเกณฑ์การบดอัดตามเกณฑ์ 95% เพื่อประเมินผลการบดอัดในมุมมองของการควบคุมคุณภาพงานทาง ผู้วิจัยได้นำค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ขั้นต่ำที่ 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดในห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการพิจารณายอมรับงานบดอัดสำหรับวัสดุชั้นรองพื้นทางและชั้นทางรอง [1], [5] ผลการประเมินพบว่า มีจุดทดสอบที่ให้ค่า RC ตั้งแต่ 95% ขึ้นไป จำนวน 11 จุด คิดเป็น 55.00% ของข้อมูลทั้งหมด ขณะที่อีก 9 จุด หรือ 45.00% มีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ต่ำกว่าเกณฑ์ดังกล่าว ผลนี้สะท้อนว่าแม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมจะอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่เมื่อใช้เกณฑ์ยอมรับรายจุดจะพบว่ากระบวนการบดอัดยังไม่สามารถรักษาคุณภาพให้ผ่านเกณฑ์ได้อย่างสม่ำเสมอทุกตำแหน่ง แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การประเมินการผ่านเกณฑ์การบดอัดที่ระดับ 95%

เกณฑ์การพิจารณา	จำนวนจุดทดสอบ	ร้อยละ
ผ่านเกณฑ์ (Relative Compaction $\geq$ 95%)	11	55.00
ไม่ผ่านเกณฑ์ (Relative Compaction $<$ 95%)	9	45.00
รวม	20	100.00

5.5 การประเมินความสม่ำเสมอและความเสี่ยงของกระบวนการบดอัดในสนาม ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า แม้ค่าเฉลี่ยรวมของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะอยู่ที่ 93.46% และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน 6.61% ซึ่งสะท้อนว่าการ

บดอัดในสนามโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ผลดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้ว่ากระบวนการบดอัดมีความสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะเห็นได้ชัดว่าคุณภาพการบดอัดยังมีความไม่สม่ำเสมอระหว่างจุดทดสอบและระหว่างกลุ่มพื้นที่ ในเชิงการประเมินความเสี่ยง จุดทดสอบที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ต่ำกว่า 95% อาจสะท้อนถึงความเสี่ยงต่อสมรรถนะของชั้นรองพื้นทางในระยะยาว โดยเฉพาะจุดที่มีค่าต่ำกว่า 90% ซึ่งมีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับการรับน้ำหนักที่ลดลง การเปลี่ยนรูปสะสม และการทรุดตัวไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างทาง ทั้งนี้ องค์ประกอบของส่วนละเอียดและระดับการบดอัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อ compactability และสมรรถนะของวัสดุชั้นรองพื้นทางโดยตรง [4], [5] ผลการจำแนกระดับความเสี่ยงพบว่าจุดทดสอบ 8 จุด หรือ 40.00% ของข้อมูลทั้งหมด อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงจากการมีค่า Relative Compaction ต่ำกว่า 90% ข้อค้นพบดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการประเมินคุณภาพงานบดอัดไม่ควรพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยรวมของโครงการ แต่ควรพิจารณาความสม่ำเสมอและความเสี่ยงของผลการทดสอบรายจุดร่วมด้วย [8]

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของผลการบดอัดระหว่างกลุ่ม

กลุ่ม	จำนวนตัวอย่าง (N)	ค่าเฉลี่ย Relative Compaction (%)	
A	11	98.405	มีความสม่ำเสมอและอยู่ในระดับยอมรับได้
B	9	87.417	ต่ำกว่าเกณฑ์และมีแนวโน้มต้องปรับปรุง

อภิปรายผล

ดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีแนวโน้มแสดงศักยภาพเบื้องต้นสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบท ในเชิงปฐพีวิศวกรรม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการทดสอบภาคสนามร่วมกับค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ พบว่าศักยภาพของวัสดุเพียงอย่างเดียวยังไม่เพียงพอที่จะรับประกันคุณภาพของงานก่อสร้าง หากกระบวนการบดอัดในสนามยังขาดความสม่ำเสมอ ทั้งนี้งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบของส่วนละเอียดและระดับการบดอัดมีอิทธิพลโดยตรงต่อพฤติกรรมเชิงกล ความสามารถในการรับน้ำหนัก และความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทาง [4], [5] แม้ว่าค่าเฉลี่ยรวมของค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์จะอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่การที่มีเพียง 55.00% ของจุดทดสอบทั้งหมดผ่านเกณฑ์ 95% แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยรวมอาจไม่สามารถสะท้อนคุณภาพของงานได้ครบถ้วนในเชิงปฏิบัติ กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยอาจดูยอมรับได้ แต่ยังคงมีบางตำแหน่งที่มีคุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานและอาจส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของชั้นรองพื้นทางในระยะยาวได้ นอกจากนี้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติยังสะท้อนว่าปัจจัยภาคสนามหรือความแตกต่างของกระบวนการปฏิบัติงานมีผลต่อผลการบดอัดอย่างชัดเจน ดังนั้นการควบคุมความชื้น พลังงานบดอัด และความสม่ำเสมอของการดำเนินงานในสนามจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทต่อความสำเร็จของการนำดินชนิดนี้ไปใช้เป็นชั้นรองพื้นทางอย่างแท้จริง ทั้งนี้ แม้ปัจจุบันจะมีแนวทางการประเมินคุณภาพการบดอัดด้วยเทคนิคข้อมูลและแบบจำลองขั้นสูงมากขึ้น แต่การประเมินเชิงภาคสนามแบบดั้งเดิมยังคงมีความสำคัญอย่างมากในงานควบคุมคุณภาพระดับโครงการ [3], [7], [8]

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเหมาะสมของดินทรายปนตะกอนบดอัดสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงปฐพีวิศวกรรมร่วมกับการวิเคราะห์เชิงสถิติจากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนาม ด้วยวิธีการรวบรวบ ผลการศึกษาพบว่าดินในพื้นที่กรณีศึกษามีแนวโน้มสอดคล้องกับกลุ่มดินทรายปนตะกอน (SM) และมีสมบัติ

พื้นฐานที่สะท้อนศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางใต้เมื่อมีการควบคุมสภาพการก่อสร้างอย่างเหมาะสม ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งในสนามจำนวน 20 จุด พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์มีค่าอยู่ในช่วง 83.503% ถึง 102.689% และมีค่าเฉลี่ยรวม 93.46% ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 6.61% สะท้อนว่ากระบวนการบดอัดโดยรวมอยู่ในระดับค่อนข้างดี แต่ยังคงมีความแปรปรวนของผลการทดสอบอยู่พอสมควร เมื่อพิจารณาในเชิงเกณฑ์ยอมรับงานพบว่ามี 55.00% ของจุดทดสอบทั้งหมดที่ผ่านเกณฑ์ 95% แสดงว่าคุณภาพการบดอัดยังไม่สม่ำเสมอในทุกตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา ผลการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่ม A และ B ด้วย Welch's t-test ยืนยันว่าทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกลุ่ม A ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงกว่ากลุ่ม B อย่างชัดเจน และมีขนาดอิทธิพลอยู่ในระดับสูงมาก ข้อค้นพบนี้สะท้อนว่านอกจากคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ความสม่ำเสมอของกระบวนการปฏิบัติงานในสนามยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของการบดอัดและการใช้งานวัสดุในชั้นรองพื้นทาง โดยสรุปดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพเบื้องต้นในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้นรองพื้นทางถนนชนบทได้ในเชิงเบื้องต้น แต่การใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพและความมั่นคงในระยะยาวจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมความชื้น การบดอัด และการตรวจสอบคุณภาพภาคสนามอย่างสม่ำเสมอ เพื่อลดความเสี่ยงต่อปัญหาโครงสร้างทางในอนาคต [3], [4], [5]

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่าแม้ว่าดินทรายปนตะกอนในพื้นที่ศึกษามีศักยภาพสำหรับการใช้งานเป็นชั้นรองพื้นทางถนนชนบท แต่ผลการทดสอบในสนามยังแสดงให้เห็นถึงความแปรปรวนของระดับการบดอัดในบางตำแหน่ง ดังนั้นในการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้จริง ควรให้ความสำคัญกับการควบคุมความชื้นของดินก่อนและระหว่างการบดอัดอย่างเหมาะสม รวมถึงควบคุมพลังงานบดอัดหรือจำนวนเที่ยวบดอัดให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อให้ค่าความหนาแน่นแห้งในสนามเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ควรเพิ่มความเข้มงวดในการตรวจสอบคุณภาพภาคสนาม โดยเฉพาะในจุดที่มีแนวโน้มให้ค่าการบดอัดต่ำกว่าเกณฑ์หรืออยู่ในกลุ่มความเสี่ยงสูง เนื่องจากจุดดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักและความมั่นคงของชั้นรองพื้นทางในระยะยาว การประเมินคุณภาพงานบดอัดจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยรวมของโครงการเท่านั้น แต่ควรพิจารณาร่วมกับผลการทดสอบรายจุด สัดส่วนของจุดที่ผ่านเกณฑ์ และความสม่ำเสมอของกระบวนการก่อสร้างในแต่ละพื้นที่ด้วย สำหรับการศึกษาครั้งต่อไป ควรมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในประเด็นที่อาจส่งผลกระทบต่อความแปรปรวนของผลการบดอัด เช่น ค่าความชื้นของดินรายจุด จำนวนเที่ยวบดอัด ความหนาของชั้นวัสดุ ตำแหน่งจุดทดสอบ และสภาพการทำงานของเครื่องจักร เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยภาคสนามกับค่าเปอร์เซ็นต์การบดอัดสัมพัทธ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อีกทั้งควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างทดสอบให้มากกว่าเดิม เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ทางสถิติ และสนับสนุนการพัฒนากระบวนการควบคุมคุณภาพที่เหมาะสมสำหรับงานชั้นรองพื้นทางถนนชนบทในทางปฏิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Spagnoli G, Shimobe S. An overview on the compaction characteristics of soils by laboratory tests. Engineering Geology. 2020;278:105830. doi:10.1016/j.enggeo.2020.105830.
- [2] Park SS. Evaluation of the sand-cone method for determination of the in-situ density of soil. Géotechnique. 2010;60(9):701-707. doi:10.1680/geot.9.T.004.
- [3] Park SS, Ogunjinmi PD, Lee HI, Woo SW, Lee DE. Effect of wetting conditions on the in situ density of soil using the sand-cone method. Applied Sciences. 2021;11(2):718. doi:10.3390/app11020718.
- [4] Santucci de Magistris F, Silvestri F, Vinale F. The influence of compaction on the mechanical behaviour of a silty sand. Soils and Foundations. 1998;38(4):41-56. doi:10.3208/sandf.38.4_41.

- [5] Bak A, Chmielewski R. The influence of fine fractions content in non-cohesive soils on their compactibility and the CBR value. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2019;25(4):353-361. doi:10.3846/jcem.2019.9687.
- [6] Alramahi B, Fratta D, Alshibli KA. Parameter estimation for evaluation of in situ density and moisture content by using elastic and electromagnetic wave propagation. *Transportation Research Record*. 2008;2045(1):19-28. doi:10.3141/2045-03.
- [7] Wang X, Dong X, Zhang Z, Zhang J, Ma G, Yang X. Compaction quality evaluation of subgrade based on soil characteristics assessment using machine learning. *Transportation Geotechnics*. 2022;32:100703. doi:10.1016/j.trgeo.2021.100703.
- [8] Xu C, Li T, Li X, Yang G. Compaction uniformity evaluation of subgrade in highway based on principal components analysis and back propagation neural networks. *Sustainability*. 2023;15(2):1067. doi:10.3390/su15021067.

การลดเวลารอคอยในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดโดยการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์ และการส่งอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

Reducing Customer Waiting Time in Fast-Food Restaurants through Order Point Design and Efficient Service Flow Optimization

วิชุดา มิ่งสกุล^{1*}

Wichuda Mingsakul^{1*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีโลจิสติกส์, คณะเทคโนโลยีสังคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี,
จันทบุรี, 22210, ประเทศไทย

¹Department of Logistics Technology, Faculty of Social Technology, Rajamangala University of Technology
Tawan-ok, Chanthaburi, 22210, Thailand

*Corresponding Author E-mail: wichuda_mi@rmutto.ac.th

รับบทความ (Received) : May 05, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 18, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดเวลารอคอยของลูกค้าในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดโดยการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์และการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบริการ การศึกษานี้ใช้แนวคิดทางวิศวกรรมอุตสาหการร่วมกับทฤษฎีแถวคอยในการวิเคราะห์ปัญหาและประเมินแนวทางการปรับปรุงระบบ โดยเก็บข้อมูลจากสถานการณ์จริงในช่วงเวลาเร่งด่วน 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเช้า ช่วงกลางวัน และช่วงเย็น รวมกลุ่มตัวอย่างลูกค้า 50 คน จากนั้นวิเคราะห์สภาพปัญหาของระบบเดิมด้วยข้อมูลเบื้องต้น แผนผังก้างปลา และแบบจำลองแถวคอย M/M/1 และ M/M/s ผลการศึกษาพบว่าระบบเดิมที่มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุดมีข้อจำกัดด้านกำลังการให้บริการส่งผลให้เกิดคิวยาวที่จุดรับออเดอร์ โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่มีจำนวนลูกค้าหนาแน่นมากที่สุด ระบบเดิมมีเวลารอคอยเฉลี่ย 7.20 นาที ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.50 นาที และระดับความพึงพอใจของลูกค้าอยู่ที่ 65% ผลการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาพบว่าสาเหตุหลักของปัญหาเกิดจากจำนวนจุดรับออเดอร์ที่ไม่เพียงพอ การรวมกิจกรรมหลายขั้นตอนไว้ในจุดบริการเดียว การจัดกำลังคนที่ไม่เหมาะสม และความแออัดของพื้นที่ให้บริการ เมื่อประเมินแนวทางการปรับปรุงด้วยแบบจำลอง M/M/s พบว่า การเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุดช่วยลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 4.70 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 34.72 และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าเป็น 85% ขณะที่การเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 3 จุดช่วยลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 3.10 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 56.94 เมื่อเทียบกับระบบเดิม และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าเป็น 90% ผลการวิจัยสรุปได้ว่าการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดเวลารอคอย ลดความแออัดของคิว และเพิ่มคุณภาพการให้บริการในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด ทั้งยังแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการร่วมกับทฤษฎีแถวคอยสามารถช่วยวิเคราะห์ปัญหาและเสนอแนวทางปรับปรุงระบบบริการได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ : เวลารอคอย ร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด ทฤษฎีแถวคอย การออกแบบจุดรับออเดอร์ ประสิทธิภาพการให้บริการ

Abstract

This study aimed to investigate the reduction of customer waiting time in a fast-food restaurant through redesigning the order-taking process and increasing the number of order points to improve service efficiency. The study applied industrial engineering concepts together with queueing theory to analyze service problems and evaluate improvement alternatives. Data were collected from actual service operations during three peak periods: morning, lunchtime, and evening, with a total sample of 50 customers. The existing service system was analyzed using preliminary operational data, a fishbone diagram, and queueing models including M/M/1 and M/M/s. The results indicated that the existing system, which operated with only one order point, had insufficient service capacity and created a bottleneck at the order-taking stage, especially during lunchtime when customer demand was highest. The original system had an average waiting time of 7.20 minutes, a standard deviation of 1.50 minutes, and a customer satisfaction level of 65%. The fishbone analysis revealed that the major causes of the problem were an insufficient number of order points, multiple service activities being combined at a single service point, inappropriate workforce allocation, and congestion within the service area. When improvement alternatives were evaluated using the M/M/s model, the results showed that increasing the number of order points to two reduced the average waiting time to 4.70 minutes, representing a 34.72% reduction, and increased customer satisfaction to 85%. Increasing the number of order points to three further reduced the average waiting time to 3.10 minutes, representing a 56.94% reduction compared with the original system, and increased customer satisfaction to 90%. The findings indicate that increasing the number of order points is an effective approach for reducing waiting time, decreasing queue congestion, and improving service quality in fast-food restaurants. The study also demonstrates that integrating industrial engineering tools with queueing theory provides a practical and systematic approach for analyzing service problems and proposing service system improvements.

Keywords: Waiting Time, Fast-Food Restaurant, Queueing Theory, Order Point Design, Service Efficiency

บทนำ

ธุรกิจร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดเป็นระบบบริการที่ลูกค้าให้ความสำคัญอย่างมากกับความรวดเร็วควบคู่กับคุณภาพของอาหารและความถูกต้องของการให้บริการ ดังนั้น ระยะเวลารอคอยจึงเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสบการณ์ของลูกค้า ความพึงพอใจ และแนวโน้มการกลับมาใช้บริการซ้ำ งานของ Davis เสนอว่าการประเมินคุณภาพการบริการไม่ควรพิจารณาเฉพาะเวลารอคอยจริงเท่านั้น แต่ควรพิจารณาความพึงพอใจต่อการรอคอยควบคู่กันด้วย เพราะลูกค้ารับรู้คุณภาพการบริการผ่านทั้งมิติการปฏิบัติการและมิติทางจิตวิทยา [1] ในเชิงการจัดการการดำเนินงานทฤษฎีแถวคอยเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบบริการที่มีการมาถึงของลูกค้าแบบสุ่มและมีข้อจำกัดด้านทรัพยากร โดยตัวชี้วัดสำคัญ เช่น จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบ เวลารอเฉลี่ย และอัตราการใช้ประโยชน์ของช่องบริการ สามารถอธิบายได้ผ่านแบบจำลองมาตรฐานอย่าง M/M/1 และ M/M/s ขณะที่ความสัมพันธ์พื้นฐานระหว่างจำนวนลูกค้าในระบบ อัตราการมาถึง และเวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบ สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Little ซึ่งเป็นฐานสำคัญของการวิเคราะห์ระบบคิวในงานวิศวกรรมและการจัดการบริการ [2]

สำหรับบริบทร้านอาหารงานของ Chou และ Liu แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์การจำลองระบบคิวในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดช่วยให้ผู้วิจัยและผู้ประกอบการประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนช่องบริการต่อเวลารอคอยของลูกค้าได้อย่างเป็นรูปธรรม [3] และเป็นแนวทางสำคัญในการออกแบบระบบบริการให้เหมาะสมกับรูปแบบความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน นอกจากนี้ Luo และคณะยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงกระบวนการให้บริการสามารถส่งผลได้ทั้งต่อเวลารอคอยจริง และการรับรู้เวลารอคอยของลูกค้า ซึ่งสุดท้ายสะท้อนออกมาเป็นระดับความพึงพอใจที่เปลี่ยนแปลงไป [4] งานวิจัยเชิงประจักษ์ในภาคบริการยังพบว่าเวลารอคอยที่ยาวขึ้นมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมเชิงลบของลูกค้า เช่น การยกเลิกการรอ การลดระยะเวลาการใช้บริการ และผลกระทบทางรายได้ของร้านอาหาร โดย De Vries และคณะรายงานว่าเวลารอในร้านอาหารมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมลูกค้าและรายได้ของร้านอย่างมีนัยสำคัญ [5] ขณะเดียวกันงานวิจัยด้านความพึงพอใจยังชี้ว่าระยะเวลาที่สั้นกว่าที่ลูกค้าคาดหวังสามารถเพิ่มความพึงพอใจได้อย่างชัดเจนมากกว่าผลลบจากการรอที่นานเกินคาดในบางกรณี [6] งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการลดเวลารอคอยในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดผ่านการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์และการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์ โดยอาศัยข้อมูลจริงจากลูกค้า 50 คนต่อสถานการณ์ และใช้แบบจำลอง M/M/1 และ M/M/s ในการประเมินผลของระบบเดิมและระบบที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อให้ได้ข้อเสนอเชิงปฏิบัติที่สามารถนำไปใช้กับร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดได้จริง

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาพปัญหาเวลารอคอยของลูกค้าในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดในช่วงเวลาเร่งด่วน
- 2) เพื่อวิเคราะห์ผลของจำนวนจุดรับออเดอร์ที่มีต่อเวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้า
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบบริการภายใต้สถานการณ์ที่มีจำนวนจุดรับออเดอร์ต่างกัน

2. สมมติฐานการวิจัย

- 1) การเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์สามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าได้อย่างมีนัยสำคัญ
- 2) การลดเวลารอคอยมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับระดับความพึงพอใจของลูกค้า
- 3) ระบบบริการแบบหลายจุดรับออเดอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบเดิมแบบจุดเดียวในช่วงเวลาเร่งด่วน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยนี้ใช้การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณจากร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดจริง โดยมุ่งเน้นการสังเกตเวลารอคอยของลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเช้า (07.00–11.00 น.) ช่วงกลางวัน (11.00–15.00 น.) และช่วงเย็น (15.00–19.00 น.) ซึ่งเป็นช่วงที่มีความหนาแน่นของลูกค้าสูง การเก็บข้อมูลแต่ละสถานการณ์ใช้กลุ่มตัวอย่างลูกค้า 50 คน เพื่อให้สะท้อนพฤติกรรมของระบบบริการภายใต้สภาพการปฏิบัติงานจริง ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วยเวลารอคอยเฉลี่ย จำนวนลูกค้าที่อยู่ในคิว และลักษณะของการไหลของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาพปัญหาเบื้องต้นของระบบบริการเดิมก่อนการปรับปรุง

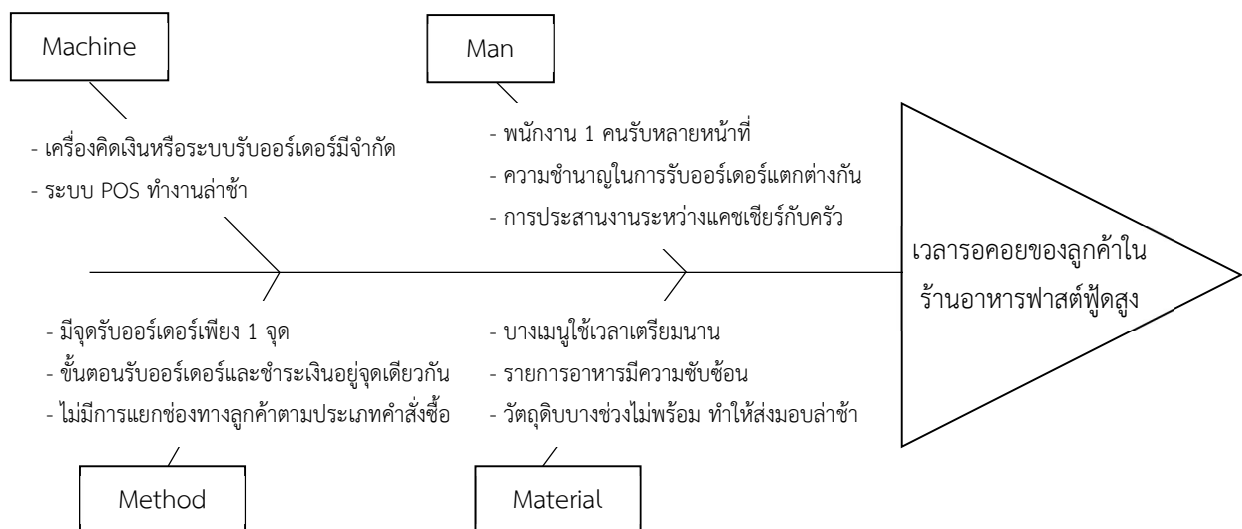
ช่วงเวลา	จำนวนลูกค้า (คน)	เวลารอคอยเฉลี่ย (นาที)	ความยาวคิวเฉลี่ย (คน)	เวลาให้บริการเฉลี่ย (นาที/คน)
เช้า	15	6.00	4.00	2.80

กลางวัน	20	8.40	6.00	3.40
เย็น	15	6.80	5.00	3.00
รวม	50	7.20	5.00	3.10

จากตารางที่ 1 พบว่าระบบเดิมของร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดมีความแออัดแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา โดยช่วงกลางวันเป็นช่วงที่มีปริมาณลูกค้าสูงที่สุดจำนวน 20 คน และมีเวลารอคอยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 8.40 นาที ขณะที่ช่วงเช้าและช่วงเย็นมีเวลารอคอยเฉลี่ย 6.00 และ 6.80 นาทีตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพรวมทั้งระบบพบว่า เวลารอคอยเฉลี่ยเท่ากับ 7.20 นาที ซึ่งสอดคล้องกับผลสรุปของระบบเดิมก่อนการปรับปรุง และสะท้อนว่าจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุดยังไม่สามารถรองรับความต้องการของลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วนได้อย่างเพียงพอ

2. การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา

ผู้วิจัยได้นำแผนผังก้างปลามาใช้เป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการในการจำแนกและวิเคราะห์สาเหตุที่อาจส่งผลกระทบต่อความล่าช้าในการให้บริการ [7,8] โดยกำหนดปัญหาหลักที่ต้องการวิเคราะห์คือ ลูกค้ารอคายนานในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด จากนั้นจัดกลุ่มสาเหตุออกเป็นประเด็นหลักที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงาน ได้แก่ ด้านบุคลากร (Man), ด้านวิธีการทำงาน (Method), ด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ (Machine), ด้านวัตถุดิบหรือรายการอาหาร (Material) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังก้างปลาแสดงสาเหตุของปัญหาเวลารอคอยในระบบบริการเดิม

ผลการวิเคราะห์พบว่าสาเหตุของการรอคอยไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง แต่เป็นผลมาจากหลายปัจจัยร่วมกัน โดยเฉพาะปัญหาด้านวิธีการทำงานและด้านการจัดการซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรองรับลูกค้า ณ จุดรับออเดอร์ ระบบเดิมมีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด ทำให้ไม่สามารถรองรับจำนวนลูกค้าที่เข้ามาพร้อมกันในช่วงเวลาเร่งด่วนได้อย่างเพียงพอ นอกจากนี้ขั้นตอนการรับออเดอร์ การชำระเงิน และการประสานงานเพื่อส่งมอบอาหารยังดำเนินการต่อเนื่องกันที่จุดเดียวส่งผลให้เกิดความล่าช้าและการสะสมของคิว ในด้านบุคลากรพบว่าพนักงานต้องรับผิดชอบหลายหน้าที่พร้อมกัน เช่น รับออเดอร์ คิดเงิน และประสานงานกับส่วนเตรียมอาหารทำให้เวลาการให้บริการต่อรายเพิ่มขึ้น ขณะที่ด้านเครื่องมือและ

อุปกรณ์ อาจมีข้อจำกัดจากจำนวนเครื่องรับคำสั่งซื้อหรืออุปกรณ์สนับสนุนที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นผลจากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาจึงช่วยยืนยันว่าปัญหาหลักของระบบเดิมเกิดจากคอขวดที่จุดรับออเดอร์และรูปแบบการให้บริการที่ไม่เหมาะสมกับปริมาณลูกค้าในช่วงเร่งด่วน เพื่อให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างสาเหตุรากของปัญหาและสภาพการให้บริการจริงในแต่ละช่วงเวลา ผู้วิจัยจึงสรุปลักษณะปัญหาของระบบเดิมก่อนการปรับปรุงดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นเหตุผลสำคัญที่นำไปสู่การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยแบบจำลองแถวคอย M/M/1 และ M/M/s ในลำดับถัดไป

ตารางที่ 2 สรุปลักษณะปัญหาของระบบเดิมก่อนการปรับปรุง

ช่วงเวลา	สภาพการให้บริการ	ปัญหาที่พบ
เช้า	ลูกค้าเข้ามาต่อเนื่องในระดับปานกลาง	มีการรอคอยบ้าง แต่ยังไม่รุนแรง
กลางวัน	ลูกค้าเข้ามาหนาแน่นมาก	เกิดคอขวดที่จุดรับออเดอร์ แถวคอยยาวที่สุด
เย็น	ลูกค้าเข้ามาต่อเนื่องและมีคำสั่งซื้อหลายรายการ	เวลารอสูงกว่าช่วงเช้า แต่ต่ำกว่าช่วงกลางวัน

จากตารางที่ 2 อธิบายให้เห็นว่าปัญหาการรอคอยมีลักษณะแตกต่างกันตามบริบทของแต่ละช่วงเวลาก็คือ ในช่วงเช้าลูกค้าเข้ามาใช้บริการอย่างต่อเนื่องในระดับปานกลางทำให้เกิดการรอคอยบ้างแต่ยังไม่รุนแรง ขณะที่ช่วงกลางวันเป็นช่วงที่ลูกค้าเข้ามาหนาแน่นมากที่สุดส่งผลให้เกิดคอขวดที่จุดรับออเดอร์และมีแถวคอยยาวที่สุด ส่วนช่วงเย็นแม้จำนวนลูกค้าจะไม่มากเท่าช่วงกลางวัน แต่ลักษณะของคำสั่งซื้อที่มีหลายรายการต่อหนึ่งคำสั่งซื้อทำให้เวลาให้บริการต่อรายสูงขึ้น และส่งผลให้เวลารอคอยยังคงอยู่ในระดับสูงกว่าช่วงเช้า การสรุปดังกล่าวเห็นว่าแม้รูปแบบของปัญหาจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลา แต่สาเหตุร่วมที่สำคัญยังคงเป็นข้อจำกัดของระบบรับออเดอร์เดิมที่มีเพียง 1 จุดบริการ จากลักษณะปัญหาที่ปรากฏในแต่ละช่วงเวลาผู้วิจัยได้นำข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสังเกตการณ์ร่วมกับข้อมูลเชิงปริมาณมาสังเคราะห์เป็นประเด็นปัญหาหลักที่นำไปสู่การวิเคราะห์และการปรับปรุงระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัญหาที่นำไปสู่การวิเคราะห์และปรับปรุงระบบ

ประเด็นปัญหา	ข้อมูลเบื้องต้น	ผลกระทบต่อระบบบริการ
เวลารอคอยสูง	เวลารอเฉลี่ย 7.20 นาที	ลูกค้าต้องใช้เวลารอคอยมากในช่วงเร่งด่วน
ความผันผวนของเวลาให้บริการ	SD = 1.50 นาที	การให้บริการไม่สม่ำเสมอ
จุดบริการไม่เพียงพอ	มีเพียง 1 จุดรับออเดอร์	เกิดคอขวดและแถวคอยสะสม
ความพึงพอใจยังไม่สูง	ความพึงพอใจ 65%	เสี่ยงต่อการไม่กลับมาใช้บริการซ้ำ

จากตารางที่ 3 เวลารอคอยเฉลี่ยของระบบที่อยู่ในระดับสูง ความผันผวนของเวลาให้บริการที่ยังมีอยู่ ข้อจำกัดของจำนวนจุดบริการที่ไม่เพียงพอต่อปริมาณลูกค้า และระดับความพึงพอใจของลูกค้าที่ยังไม่สูงนัก เมื่อพิจารณาจากข้อมูลเบื้องต้นพบว่า เวลารอคอยเฉลี่ยของระบบเดิมอยู่ที่ 7.20 นาที ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงสำหรับธุรกิจร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดที่เน้นความรวดเร็วในการให้บริการ ขณะเดียวกันส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลาให้บริการที่ 1.50 นาที ยังสะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของระบบบริการ และอาจทำให้ลูกค้าเกิดการรับรู้เชิงลบต่อคุณภาพการบริการได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาที่ชี้ว่าเวลารอคอยและการรับรู้ต่อเวลารอคอยมีผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของลูกค้า

3. การวิเคราะห์ด้วย M/M/1 และ M/M/s

จากผลการวิเคราะห์ปัญหาของระบบเดิมในตารางที่ 1-3 และการพิจารณาสาเหตุรากด้วยแผนผังก้างปลาพบว่า ข้อจำกัดสำคัญของระบบบริการอยู่ที่จุดรับออเดอร์ซึ่งมีจำนวนช่องบริการไม่เพียงพอต่อปริมาณลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน ส่งผลให้เกิดการสะสมของแถวคอยและทำให้เวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าอยู่ในระดับสูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำทฤษฎีแถวคอยมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบบริการเดิมและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบบริการที่เหมาะสมยิ่งขึ้น โดยทฤษฎีแถวคอยเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการศึกษาระบบบริการที่มีการมาถึงของลูกค้าแบบสุ่มและมีข้อจำกัดด้านทรัพยากรบริการ

ในการศึกษาครั้งนี้ระบบเดิมที่มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด ถูกวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง M/M/1 ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่มีผู้ให้บริการเพียง 1 ช่องบริการ ขณะที่ระบบที่มีการปรับปรุงโดยเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์มากกว่า 1 จุดถูกวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง M/M/s ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่มีหลายช่องบริการทำงานขนานกัน ทั้งสองแบบจำลองตั้งอยู่บนสมมติฐานสำคัญร่วมกัน ได้แก่ การมาถึงของลูกค้าเป็นแบบสุ่มและสามารถอธิบายได้ด้วยการแจกแจงปัวซอง (Poisson distribution) เวลาการให้บริการมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential distribution) ลูกค้าได้รับบริการตามลำดับก่อนมาถึงก่อน และความจุของระบบถือว่าเพียงพอสำหรับการรองรับลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการในช่วงเวลาศึกษา

3.1 การวิเคราะห์ระบบเดิมด้วยแบบจำลอง M/M/1 ระบบเดิมของร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดมีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด ดังนั้นจึงกำหนดให้เป็นระบบคิวแบบ M/M/1 โดยกำหนดให้

λ = อัตราการมาถึงของลูกค้า (คนต่อหน่วยเวลา)

μ = อัตราการให้บริการ (คนต่อหน่วยเวลา)

ρ = อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบบริการ

3.1.1 อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \quad \rho < 1 \quad (1)$$

เมื่อค่า ρ เข้าใกล้ 1 แสดงว่าระบบมีภาระงานสูง และมีแนวโน้มเกิดการสะสมของคิวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นลักษณะที่สอดคล้องกับสภาพการให้บริการเดิมของร้านในช่วงเวลาเร่งด่วน

3.1.2 จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (2)$$

3.1.3 จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิวคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad (3)$$

3.1.4 เวลาที่ลูกค้าใช้เฉลี่ยในระบบคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (4)$$

3.1.5 เวลารอคอยเฉลี่ยในคิวคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$W_q = \frac{\rho}{\mu - \lambda} \quad (5)$$

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนลูกค้าในระบบและเวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Little ซึ่งระบุว่า $L = \lambda W$, $L_q = \lambda W_q$ อันเป็นพื้นฐานสำคัญของการตีความผลลัพธ์จากแบบจำลองแถวคอย

สำหรับการศึกษานี้ แบบจำลอง M/M/1 ถูกใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบเดิมที่มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด โดยมุ่งวิเคราะห์ว่าอัตราการมาถึงของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลามีความสอดคล้องกับความสามารถในการให้บริการหรือไม่ รวมถึงใช้คำนวณค่าตัวชี้วัดสำคัญ เช่น จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว เวลารอคอยเฉลี่ย และระดับการใช้ประโยชน์ของจุดบริการเพื่อยืนยันเชิงปริมาณว่าระบบเดิมมีลักษณะเป็นคอขวดของกระบวนการบริการ

3.2 การวิเคราะห์ระบบที่ปรับปรุงแล้วด้วยแบบจำลอง M/M/s ภายหลังจากการวิเคราะห์ระบบเดิม ผู้วิจัยได้ศึกษาทางเลือกในการปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เพื่อกระจายภาระงานและลดความแออัดของคิว ในกรณีที่มีจำนวนจุดบริการมากกว่า 1 จุด ระบบดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง M/M/s โดยที่ s = แทนจำนวนช่องบริการ

3.2.1 อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 6

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}, \quad \rho < 1 \quad (6)$$

เมื่อจำนวนจุดบริการเพิ่มขึ้นค่าของ ρ จะลดลง หากอัตราการมาถึงของลูกค้ายังคงเดิมส่งผลให้ระบบมีความสามารถในการรองรับลูกค้าได้ดีขึ้น และลดโอกาสการเกิดแถวคอยสะสม

3.2.2 ความน่าจะเป็นที่ไม่มีลูกค้าอยู่ในระบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s! (1 - \rho)} \right]^{-1} \quad (7)$$

3.2.3 จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิวคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$L_q = \frac{(\lambda/\mu)^s \rho}{s! (1 - \rho)^2} P_0 \quad (8)$$

3.2.4 จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบคำนวณได้จากสมการที่ 9

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \quad (9)$$

3.2.5 เวลารอคอยเฉลี่ยในคิวคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (10)$$

3.2.6 เวลาที่ลูกค้าใช้เฉลี่ยในระบบคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (11)$$

แบบจำลอง M/M/s ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์กรณีที่ร้านอาหารเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด และ 3 จุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมในด้านเวลารอคอยเฉลี่ย จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว และระดับการใช้ประโยชน์ของระบบ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองนี้จะช่วยแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์สามารถช่วยลดภาวะคอขวดและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบริการได้มากน้อยเพียงใด ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการวิเคราะห์ระบบบริการและการจำลองคิวในบริบทร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด จากกรอบการวิเคราะห์ดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำข้อมูลอัตราการมาถึงของลูกค้าและเวลาให้บริการเฉลี่ยมาคำนวณค่าตัวชี้วัดของระบบตามแบบจำลอง M/M/1 และ M/M/s โดยผลการคำนวณและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแสดงไว้ในหัวข้อผลการวิจัย

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ระบบเดิมด้วย M/M/1

ผลการวิเคราะห์ระบบเดิมของร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดด้วยแบบจำลอง M/M/1 ซึ่งกำหนดให้มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด พบว่า ระบบมีลักษณะการให้บริการที่ไม่สอดคล้องกับอัตราการมาถึงของลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่มีจำนวนลูกค้าเข้าสู่ระบบมากที่สุดส่งผลให้เกิดการสะสมของแถวคอยและทำให้เวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าอยู่ในระดับสูง ผลการคำนวณจากแบบจำลองสอดคล้องกับข้อมูลภาคสนามที่พบว่า ระบบเดิมมีเวลารอคอยเฉลี่ยประมาณ 7.20 นาที ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูงสำหรับธุรกิจร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดที่มุ่งเน้นความรวดเร็วในการให้บริการ เมื่อพิจารณาตามหลักของแบบจำลอง M/M/1 พบว่า ระบบเดิมมีลักษณะของการใช้ทรัพยากรบริการในระดับสูงกล่าวคือ จุดรับออเดอร์เพียง 1 จุดต้องรองรับทั้งการรับออเดอร์ การคิดเงิน และการประสานงานกับจุดส่งมอบอาหาร ส่งผลให้อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบอยู่ในระดับสูงและเข้าใกล้ภาวะคอขวด เมื่อระบบมีการใช้งานสูงขึ้นความยาวคิวเฉลี่ยและเวลารอคอยเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับข้อมูลจากตารางที่ 1–3 และการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาซึ่งชี้ให้เห็นว่าปัญหาหลักของระบบเดิมอยู่ที่จำนวนจุดบริการที่ไม่เพียงพอและวิธีการทำงานที่รวมหลายกิจกรรมไว้ในจุดเดียว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลยังพบว่าระบบเดิมมีความผันผวนของเวลาให้บริการอยู่ในระดับหนึ่งโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.50 นาที สะท้อนให้เห็นว่าการให้บริการยังขาดความสม่ำเสมอซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของประเภทคำสั่งซื้อ ภาระงานของพนักงาน และความแออัดของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวยิ่งส่งผลให้ลูกค้าบางส่วนต้องรอกอยนานกว่าค่าเฉลี่ย และอาจกระทบต่อการรับรู้คุณภาพการบริการได้ ในภาพรวมผลการวิเคราะห์ด้วย M/M/1 ยืนยันว่าระบบเดิมมีข้อจำกัดเชิงโครงสร้างในการรองรับลูกค้า โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วน ซึ่งทำให้เกิดคอขวดที่จุดรับออเดอร์และนำไปสู่เวลารอคอยเฉลี่ยที่สูง ดังนั้นระบบเดิมจึงยังไม่เหมาะสมต่อการให้บริการที่ต้องการความรวดเร็ว และมีความจำเป็นต้องพิจารณาแนวทางปรับปรุงโดยการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เพื่อกระจายภาระงานของระบบ ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณระบบเดิมด้วยแบบจำลอง M/M/1

รายการ	ค่า
อัตราการมาถึงของลูกค้า (คน/นาที)	0.42
อัตราการให้บริการ (คน/นาที)	0.56
อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบ	0.75
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว (คน)	2.25
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบ (คน)	3.00
เวลารอคอยเฉลี่ยในคิว (นาที)	5.36
เวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบ (นาที)	7.14
เวลารอคอยเฉลี่ยจากข้อมูลภาคสนาม (นาที)	7.20

จากตารางที่ 4 พบว่า ระบบเดิมมีอัตราการใช้ประโยชน์ของระบบเท่ากับ 0.75 หรือ 75% สะท้อนว่าจุดรับออเดอร์มีภาระการให้บริการค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาค่าจำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิวและในระบบ พบว่ามีลูกค้าเฉลี่ย 2.25 คนรอกอยอยู่ในคิว

และมีลูกค้าเฉลี่ยรวมในระบบ 3.00 คน ขณะที่เวลารอคอยเฉลี่ยในคิวเท่ากับ 5.36 นาที และเวลาที่ลูกค้าใช้เฉลี่ยในระบบเท่ากับ 7.14 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลภาคสนามที่พบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยของระบบเดิมอยู่ที่ 7.2 นาที แสดงให้เห็นว่าระบบเดิมมีข้อจำกัดด้านกำลังการให้บริการและมีแนวโน้มเกิดคอขวดในช่วงเวลาเร่งด่วน

2 ผลการวิเคราะห์ระบบปรับปรุงด้วย M/M/s

ผู้วิจัยได้ทำการประเมินแนวทางการปรับปรุงระบบโดยใช้แบบจำลอง M/M/s เพื่อศึกษาผลของการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์ต่อประสิทธิภาพของระบบบริการโดยพิจารณา 2 กรณี ได้แก่ การเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด และ 3 จุด ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อจำนวนจุดบริการเพิ่มขึ้นระบบสามารถรองรับลูกค้าได้ดีขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงและความแออัดของคิวลดลงตามลำดับ สำหรับกรณีที่เพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด ผลการวิเคราะห์พบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าลดลงจาก 7.20 นาทีในระบบเดิมเหลือ 4.70 นาที คิดเป็นการลดลงประมาณ 34.72% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิมผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า การเพิ่มช่องบริการเพียง 1 จุดสามารถช่วยกระจายภาระงานของจุดรับออเดอร์ ลดความหนาแน่นของแถวคอย และเพิ่มความคล่องตัวในการให้บริการได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งยังส่งผลให้ความพึงพอใจของลูกค้าเพิ่มขึ้นจาก 65% เป็น 85% แสดงให้เห็นว่าการลดเวลารอคอยมีผลโดยตรงต่อการรับรู้คุณภาพการบริการของลูกค้า [1,5] ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณระบบปรับปรุงกรณีเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุดด้วยแบบจำลอง M/M/2

รายการ	ค่า
อัตราการมาถึงของลูกค้า (คน/นาที)	0.42
อัตราการให้บริการต่อจุด (คน/นาที)	0.56
จำนวนจุดบริการ	2.00
อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบ	0.38
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว (คน)	0.12
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบ (คน)	0.87
เวลารอคอยเฉลี่ยในคิว (นาที)	0.29
เวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบ (นาที)	2.08
เวลารอคอยเฉลี่ยจากข้อมูลภาคสนาม (นาที)	4.70

จากตารางที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด ค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของระบบลดลงเหลือ 0.38 แสดงให้เห็นว่าภาระงานของระบบถูกกระจายออกจากจุดบริการเดิมอย่างชัดเจน ส่งผลให้จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิวลดลงเหลือ 0.12 คน และจำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบลดลงเหลือ 0.87 คน ขณะที่เวลารอคอยเฉลี่ยในคิวจากแบบจำลองลดลงเหลือ 0.29 นาที และเวลาที่ลูกค้าใช้เฉลี่ยในระบบตามแบบจำลองเท่ากับ 2.08 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลพบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.70 นาที จะเห็นได้ว่าค่าจากแบบจำลองต่ำกว่าค่าจริงค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลอง M/M/2 ตั้งอยู่บนสมมติฐาน เช่น การมาถึงของลูกค้าเป็นแบบสุ่ม เวลาการให้บริการมีรูปแบบคงที่ตามการแจกแจงที่กำหนด และไม่มี ความสูญเสียแทรกซ้อนอื่นในกระบวนการบริการ ขณะที่ระบบจริงยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่น เช่น เวลาตัดสินใจของลูกค้า ความแตกต่างของจำนวนรายการอาหารใน

แต่ละคำสั่งซื้อ การประสานงานกับส่วนเตรียมอาหาร และความแออัดของพื้นที่บริการ ดังนั้นค่าจากแบบจำลองจึงควรใช้เพื่ออธิบายแนวโน้มเชิงเปรียบเทียบของระบบหลังการปรับปรุง มากกว่าการแทนค่าจริงของระบบบริการทั้งหมดโดยตรง

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณระบบปรับปรุงกรณีเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 3 จุดด้วยแบบจำลอง M/M/3

รายการ	ค่า
อัตราการมาถึงของลูกค้า (คน/นาที)	0.42
อัตราการให้บริการต่อจุด (คน/นาที)	0.56
จำนวนจุดบริการ	3.00
อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบ	0.25
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว (คน)	0.02
จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบ (คน)	0.77
เวลารอคอยเฉลี่ยในคิว (นาที)	0.04
เวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบ (นาที)	1.83
เวลารอคอยเฉลี่ยจากข้อมูลภาคสนาม (นาที)	3.10

จากตารางที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 3 จุด ค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของระบบลดลงเหลือ 0.25 สะท้อนว่าระบบมีความสามารถในการรองรับลูกค้าได้สูงขึ้นอย่างชัดเจน จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิวลดลงเหลือเพียง 0.02 คน และจำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบลดลงเหลือ 0.77 คน ขณะที่เวลารอคอยเฉลี่ยในคิวจากแบบจำลองลดลงเหลือ 0.04 นาที และเวลาที่ลูกค้าใช้เฉลี่ยในระบบตามแบบจำลองเท่ากับ 1.83 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลภาคสนามที่มีเวลารอคอยเฉลี่ย 3.10 นาที จะเห็นได้ว่าค่าจากแบบจำลองยังต่ำกว่าค่าจริง แม้แนวโน้มจะสอดคล้องกันในด้าน การลดลงของเวลารอคอย ทั้งนี้สะท้อนว่าแม้การเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์จะช่วยลดภาวะคอขวดของระบบได้จริง แต่ในสถานการณ์ปฏิบัติงานจริงยังคงมีปัจจัยแทรกซ้อนที่ไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลอง เช่น ความแตกต่างของเมนู เวลาที่ใช้ในการสื่อสารคำสั่งซื้อ ความพร้อมของพนักงาน และระยะเวลาในการส่งมอบอาหาร ดังนั้นผลจากแบบจำลอง M/M/3 จึงช่วยแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มว่าการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบระบบเดิมและระบบปรับปรุงจากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแถวคอย

สถานการณ์	แบบจำลอง	จำนวนจุดรับออเดอร์	เวลารอคอยเฉลี่ย (นาที)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (นาที)	การเปลี่ยนแปลงจากระบบเดิม (%)	ความพึงพอใจของลูกค้า (%)
ระบบเดิม	M/M/1	1	7.20	1.50	-	65
ระบบปรับปรุงกรณีที่ 1	M/M/2	2	4.70	1.00	ลดลง 34.72	85
ระบบปรับปรุงกรณีที่ 2	M/M/3	3	3.10	0.80	ลดลง 56.94	90

จากตารางที่ 7 พบว่า การเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยระบบเดิมที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง M/M/1 มีเวลารอคอยเฉลี่ย 7.20 นาที ขณะที่ระบบปรับปรุงที่วิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง M/M/2 และ M/M/3 มีเวลารอคอยเฉลี่ยลดลงเหลือ 4.70 และ 3.10 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเวลารอคอยยังลดลงจาก 1.50 นาที เหลือ 1.00 และ 0.80 นาที สะท้อนให้เห็นว่าระบบที่เพิ่มจุดรับออเดอร์ไม่เพียงช่วยลดระยะเวลาการรอคอย แต่ยังทำให้การให้บริการมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อีกทั้งระดับความพึงพอใจของลูกค้าเพิ่มขึ้นจาก 65% เป็น 85% และ 90% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงระบบบริการมีผลเชิงบวกทั้งในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงานและประสบการณ์ของลูกค้า

ตารางที่ 8 สรุปเปรียบเทียบผลการคำนวณของแต่ละสถานการณ์

สถานการณ์	แบบจำลอง	อัตราการใช้ประโยชน์ของระบบ	จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว (คน)	จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในระบบ (คน)	เวลารอคอยเฉลี่ยในคิว (นาที)	เวลาที่ลูกค้าอยู่ในระบบ (นาที)	เวลารอเฉลี่ย (นาที)
ระบบเดิม	M/M/1	0.75	2.25	3.00	5.36	7.14	7.20
เพิ่ม 2 จุดบริการ	M/M/2	0.38	0.12	0.87	0.29	2.08	4.70
เพิ่ม 3 จุดบริการ	M/M/3	0.25	0.02	0.77	0.04	1.83	3.10

จากตารางที่ 8 พบว่า เมื่อจำนวนจุดรับออเดอร์เพิ่มขึ้น ค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของระบบ จำนวนลูกค้าเฉลี่ยในคิว และเวลารอคอยเฉลี่ยในคิวลดลงอย่างต่อเนื่องสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนจุดบริการช่วยลดภาวะคอขวดของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกรณีที่เพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 3 จุดให้ผลดีที่สุดในด้านประสิทธิภาพการให้บริการ

อภิปรายผล

ผลการวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์และการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์มีผลโดยตรงต่อการลดเวลารอคอยของลูกค้าในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด โดยระบบเดิมที่มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุดมีเวลารอคอยเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 7.20 นาที ขณะที่เมื่อเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด และ 3 จุด เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงเหลือ 4.70 และ 3.10 นาที ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าแนวทางการเพิ่มกำลังการให้บริการสามารถลดความแออัดของคิวและลดภาวะคอขวดของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับหลักการของทฤษฎีแถวคอยที่อธิบายว่าเมื่อจำนวนช่องบริการเพิ่มขึ้นภายใต้อัตราการมาถึงของลูกค้าใกล้เคียงเดิม ระบบจะมีแนวโน้มลดจำนวนลูกค้าในคิวและลดเวลารอคอยเฉลี่ยลงได้ [2,3] ผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่า ปัญหาหลักของระบบเดิมเกิดจากความไม่สมดุลระหว่างอัตราการมาถึงของลูกค้ากับความสามารถในการให้บริการ ณ จุดรับออเดอร์ซึ่งเป็นลักษณะของคอขวดในกระบวนการให้บริการ โดยผลจากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาแสดงให้เห็นว่าสาเหตุของปัญหาไม่ได้มาจากจำนวนลูกค้าเพียงอย่างเดียว แต่ยังเกี่ยวข้องกับวิธีการทำงาน การจัดกำลังคน และการรวมหลายกิจกรรมไว้ในจุดบริการเดียว ส่งผลให้จุดรับออเดอร์ต้องรับภาระงานสูงเกินไป ข้อนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ Lean ที่มองว่าการรอคอยเป็นความสูญเสียสำคัญในกระบวนการ และการลดความสูญเสียดังกล่าวจะช่วยเพิ่มคุณค่าให้แก่ผู้รับบริการได้โดยตรง [9] นอกจากนี้ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าการลดเวลารอคอยไม่ได้ส่งผลเฉพาะในเชิงประสิทธิภาพของระบบเท่านั้น แต่ยังมีผลต่อความพึงพอใจของลูกค้าอย่างชัดเจน โดยระดับความพึงพอใจเพิ่มขึ้นจาก 65% ในระบบเดิม เป็น 85% และ 90% ในระบบที่มี 2 และ 3 จุดรับออเดอร์ตามลำดับ สอดคล้องกับงานของ Davis ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความพึงพอใจของลูกค้ามีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการรับรู้ต่อคุณภาพการบริการ [1] รวมถึงสอดคล้องกับงานของ Luo และคณะ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงกระบวนการให้บริการ

สามารถลดทั้งเวลารอคอยจริงและเวลารอคอยที่ลูกค้ารับรู้ได้ อันส่งผลต่อความพึงพอใจโดยรวมของลูกค้า [4] อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบที่มี 3 จดรับออเดอร์จะให้ผลดีที่สุดในด้านการลดเวลารอคอยและเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า แต่ในทางปฏิบัติการตัดสินใจเพิ่มจุดบริการควรพิจารณาพร้อมกับข้อจำกัดด้านต้นทุน พื้นที่ และจำนวนพนักงาน เนื่องจากการเพิ่มจุดรับออเดอร์ย่อมเกี่ยวข้องกับการลงทุนเพิ่มเติมทั้งในด้านอุปกรณ์ ระบบรับคำสั่งซื้อ และกำลังคน ดังนั้นผู้ประกอบการอาจต้องพิจารณาความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นกับทรัพยากรที่ต้องใช้จริง โดยในบางกรณีการเพิ่มเป็น 2 จดรับออเดอร์อาจเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าในเชิงความคุ้มค่า หากสามารถลดเวลารอคอยได้ในระดับที่น่าพอใจและอยู่ภายใต้ข้อจำกัดของร้าน อีกประเด็นหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ แบบจำลอง $M/M/1$ และ $M/M/s$ เป็นแบบจำลองภายใต้สมมติฐานว่าการมาถึงของลูกค้าเป็นแบบสุ่ม และเวลาให้บริการสามารถอธิบายด้วยการแจกแจงเอ็กซ์โปเนนเชียลซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างชัดเจนในเชิงทฤษฎี แต่ในสถานการณ์จริงของร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดอาจยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อเวลารอคอย เช่น ความซับซ้อนของเมนู ความแตกต่างของขนาดคำสั่งซื้อ พฤติกรรมของลูกค้าในการตัดสินใจ หรือระยะเวลาในการเตรียมอาหารของแต่ละรายการ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้อาจทำให้ระบบจริงมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดเวลารอคอยของลูกค้าในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดโดยการออกแบบรูปแบบการรับออเดอร์และการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบริการ โดยผู้วิจัยได้ศึกษาสภาพปัญหาของระบบเดิมจากข้อมูลในช่วงเวลาเร่งด่วน วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาด้วยแผนผังก้างปลา และประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยแบบจำลองแถวคอย $M/M/1$ และ $M/M/s$ ผลการศึกษาพบว่า ระบบเดิมที่มีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุดยังมีข้อจำกัดในการรองรับลูกค้า โดยเฉพาะในช่วงกลางวันที่มีจำนวนลูกค้าหนาแน่นมากที่สุด ส่งผลให้เกิดคอขวดที่จุดรับออเดอร์และทำให้เวลารอคอยเฉลี่ยของลูกค้าอยู่ในระดับสูง จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยของระบบเดิมเท่ากับ 7.20 นาที และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.50 นาที สะท้อนว่าระบบเดิมมีทั้งปัญหาความล่าช้าและความไม่สม่ำเสมอของการให้บริการ ขณะเดียวกันระดับความพึงพอใจของลูกค้าอยู่ที่ 65% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเดิมยังไม่สามารถตอบสนองความคาดหวังด้านความรวดเร็วในการให้บริการได้อย่างเพียงพอ ผลการวิเคราะห์ด้วยแผนผังก้างปลาชี้ให้เห็นว่าสาเหตุหลักของปัญหาเกิดจากการมีจุดรับออเดอร์เพียง 1 จุด การรวมกิจกรรมหลายขั้นตอนไว้ในจุดบริการเดียว การจัดกำลังคนที่ไม่เหมาะสมกับปริมาณลูกค้าในช่วงเวลาเร่งด่วน และความแออัดของพื้นที่ให้บริการ ปัจจัยเหล่านี้ร่วมกันทำให้เกิดคอขวดของระบบและนำไปสู่ความสูญเสียจากการรอคอย เมื่อวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง $M/M/1$ และ $M/M/s$ พบว่า การเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์สามารถช่วยลดเวลารอคอยของลูกค้าได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มจุดรับออเดอร์เป็น 2 จุด เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงจาก 7.20 นาที เหลือ 4.70 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 34.72 และเมื่อเพิ่มเป็น 3 จุด เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงเหลือ 3.10 นาที คิดเป็นการลดลงร้อยละ 56.94 เมื่อเทียบกับระบบเดิม ขณะเดียวกันระดับความพึงพอใจของลูกค้าเพิ่มขึ้นจาก 65% เป็น 85% และ 90% ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงระบบบริการมีผลเชิงบวกทั้งต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานและประสบการณ์ของลูกค้า งานวิจัยนี้เป็นข้อมูลที่สนับสนุนว่าการเพิ่มจำนวนจุดรับออเดอร์เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการลดเวลารอคอย ลดความแออัดของคิว และเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ด ทั้งยังแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เครื่องมือทางวิศวกรรมอุตสาหการร่วมกับทฤษฎีแถวคอยสามารถช่วยวิเคราะห์ปัญหาและเสนอแนวทางปรับปรุงระบบบริการได้อย่างเป็นระบบ

ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งต่อไปควรมีการเก็บข้อมูลเชิงลึกเพิ่มเติมเกี่ยวกับอัตราการมาถึงของลูกค้าในแต่ละช่วงเวลา ระยะเวลาให้บริการในแต่ละประเภทเมนู และเวลาที่ใช้ในการเตรียมอาหาร เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ระบบได้ละเอียดและใกล้เคียงกับสภาพ

จริงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อาจขยายขอบเขตการศึกษาไปยังช่องทางการสั่งซื้ออื่น เช่น การสั่งอาหารแบบเดลิเวอรี่ การสั่งผ่านแอปพลิเคชัน หรือระบบสั่งอาหารด้วยตนเอง เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของแต่ละรูปแบบการให้บริการต่อเวลารอคอยของลูกค้า อีกแนวทางหนึ่งคือ การประยุกต์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงร่วมกับแบบจำลองแถวคอย เช่น การจำลองสถานการณ์ (Simulation) การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน หรือการประยุกต์แนวคิด Lean Service และ Six Sigma เพื่อช่วยให้การตัดสินใจเกี่ยวกับจำนวนจุดบริการและรูปแบบการดำเนินงานมีความครอบคลุมทั้งด้านประสิทธิภาพ คุณภาพ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Davis MM, Maggard MJ. An analysis of customer satisfaction with waiting times in a two-stage service process. *Journal of Operations Management*. 1990;9(3):324-334. doi:10.1016/0272-6963(90)90158-A.
- [2] Little JDC. A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$. *Operations Research*. 1961;9(3):383-387. doi:10.1287/opre.9.3.383.
- [3] Chou CY, Liu HR. Simulation study on the queuing system in a fast-food restaurant. *Journal of Restaurant & Foodservice Marketing*. 1999;3(2):23-36. doi:10.1300/J061v03n02_03.
- [4] Luo W, Liberatore MJ, Nydick RL, Chung QB, Sloane E. Impact of process change on customer perception of waiting time: a field study. *Omega*. 2004;32(1):77-83. doi:10.1016/j.omega.2003.09.003.
- [5] De Vries J, Roy D, De Koster R. Worth the wait? How restaurant waiting time influences customer behavior and revenue. *Journal of Operations Management*. 2018;63:59-78. doi:10.1016/j.jom.2018.05.001.
- [6] Caruelle D, Lervik-Olsen L, Gustafsson A. The clock is ticking—Or is it? Customer satisfaction response to waiting shorter vs. longer than expected during a service encounter. *Journal of Retailing*. 2023;99(2):247-264. doi:10.1016/j.jretai.2023.03.003.
- [7] Cox M, Sandberg K. Modeling causal relationships in quality improvement. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*. 2018;48(7):182-185. doi:10.1016/j.cppeds.2018.08.011.
- [8] Tayal A, Kalsi NS. Review on effectiveness improvement by application of the lean tool in an industry. *Materials Today Proceedings*. 2021;43:1983-1991. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.431.
- [9] Daniyan I, Adeodu A, Mpofu K, Maladzhi R, Kana-Kana Katumba MG. Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. *Heliyon*. 2022;8(3):e09043. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09043

การพัฒนาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราด้วยสารสกัดจากมอสส์และใบมะรุมร่วมกับกากกาแฟ เพื่อการปรับปรุงคุณภาพดินอย่างยั่งยืน

Enhancement of Antifungal Efficiency Using Moss and Moringa Leaf Extracts Combined with Spent Coffee Grounds for Sustainable Soil Improvement

ลัดดาวรรณ แก้วพวง¹, กิตติกร เชื้อชะเอม¹, กนกพร ปั่นกิ่ง¹, พิมพวิไล ราชเนย์¹, ศุภิสรา สอาดศรี¹, และเทอดเกียรติ แก้วพวง^{2,3,*}
Laddawan Kaewpuang¹, Kittikorn Chuecha-em¹, Kanokporn Panking¹, Pimwilai Ratchaney¹, Suphisara Sa-ardsri¹
and Teadkait Kaewpuang^{2,3,*}

¹โรงเรียนเขาคกรรวิทย์วิทยาคม, สระแก้ว, 27000, ประเทศไทย

²สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

¹Khao Chakanritthayakhom School, Sa Kaeo, 27000, Thailand

²Research and Development Institute, Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage,
Pathum Thani, 13180, Thailand

³Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage,
Pathum Thani, 13180, Thailand

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

รับบทความ (Received) : May 07, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 21, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของมอสส์ ใบมะรุม และกากกาแฟ รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดจากธรรมชาติในการยับยั้งเชื้อราและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เพื่อนำไปพัฒนาเป็นดินชีวภัณฑ์สำหรับการเกษตรอย่างยั่งยืน ผลการศึกษาพบว่า มอสส์ ใบมะรุม และกากกาแฟ มีค่า pH อยู่ในช่วง 5.94–6.07 ซึ่งจัดอยู่ในสภาพกรดอ่อนและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช การสกัดมอสส์ด้วยเอทานอลให้สารละลายสีเหลืองใสและให้ปริมาณสารสำคัญมากกว่าการกลั่นแบบธรรมดา ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Thin Layer Chromatography; TLC) พบแถบและจุดสีหลายตำแหน่ง แสดงถึงการมีสารประกอบหลายชนิดในสารสกัด ขณะที่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy พบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งอาจสัมพันธ์กับสารกลุ่มฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และรงควัตถุธรรมชาติ ผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อรา พบว่า สารสกัดจากมอสส์และใบมะรุมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 5 เป็น 10 mg/L เส้นผ่านศูนย์กลางการเจริญของเชื้อราลดลงอย่างชัดเจน และสารสกัดใบมะรุมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราดีกว่าสารสกัดจากมอสส์เล็กน้อย นอกจากนี้ การศึกษาการเจริญเติบโตของพืชพบว่า ดินชีวภัณฑ์สูตร 2 สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับดินธรรมดาและดินชีวภัณฑ์สูตร 1 ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักเรียนจำนวน 178 คน พบว่าผลิตภัณฑ์ได้รับคะแนนเฉลี่ยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (4.65) โดยเฉพาะ

ด้านการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์และการส่งเสริมการปลูกพืชปลอดสารพิษ ดังนั้น สารสกัดจากมอสส์และวัสดุธรรมชาติที่ใช้ในการศึกษานี้มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นดินชีวภัณฑ์และสารชีวภัณฑ์ทางการเกษตร เพื่อช่วยลดการใช้สารเคมี ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และสนับสนุนแนวทางเกษตรกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: มอสส์, ใบมะรุม, กาแฟ, ดินชีวภัณฑ์, การยับยั้งเชื้อรา

Abstract

This research aimed to investigate the chemical properties of moss, moringa leaves, and coffee grounds, as well as to evaluate the antifungal activity and plant growth-promoting potential of natural extracts for the development of biofertilizer soil materials for sustainable agriculture. The results showed that moss, moringa leaves, and coffee grounds had pH values ranging from 5.94 to 6.07, indicating slightly acidic conditions suitable for plant growth. Ethanol extraction of moss produced a clear yellow solution and yielded more bioactive compounds than simple distillation. Preliminary phytochemical analysis using Thin Layer Chromatography (TLC) revealed multiple spots and bands, indicating the presence of various chemical constituents in the extract. UV-Visible spectroscopy analysis showed a major absorption peak at approximately 500 nm, which may be associated with phenolic compounds, flavonoids, and natural pigments. The antifungal activity test demonstrated that both moss and moringa leaf extracts could inhibit fungal growth. Increasing extract concentrations from 5 to 10 mg/L significantly reduced fungal colony diameter, with moringa leaf extract showing slightly higher antifungal efficiency than moss extract. Furthermore, plant growth experiments revealed that biofertilizer soil formula 2 provided the highest plant growth performance compared with normal soil and biofertilizer soil formula 1. Satisfaction assessment from 178 students indicated that the product received the highest satisfaction level overall (mean score = 4.65), particularly in terms of waste material utilization and promotion of pesticide-free cultivation.

In conclusion, moss extract and the natural materials used in this study demonstrated strong potential for development into biofertilizer and agricultural bioproducts that can reduce chemical usage, enhance plant growth, and support environmentally sustainable agriculture.

Keywords: Moss, Moringa leaves, Coffee grounds, Biofertilizer, Antifungal activity

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม และมักประสบปัญหาโรคพืชและแมลงศัตรูพืช เช่น โรคใบไหม้ โรคโรใบดิดในทุเรียน โรคเหี่ยว และโรคเน่า ซึ่งมีสาเหตุสำคัญจากเชื้อราและแบคทีเรีย ปัจจุบันเกษตรกรส่วนใหญ่ นิยมใช้สารเคมีในการป้องกันและกำจัดศัตรูพืช ได้แก่ สารกำจัดแมลง สารกำจัดวัชพืช สารกำจัดเชื้อรา และสารกำจัดแบคทีเรีย เนื่องจากออกฤทธิ์รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม การใช้สารเคมีดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง รวมถึงก่อให้เกิดการตกค้างในผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้บริโภคและสิ่งแวดล้อม ทั้งใน ดิน น้ำ ระบบนิเวศ และห่วงโซ่อาหาร อีกทั้งปัญหาสารพิษตกค้างยังกลายเป็นประเด็นสำคัญในเวทีการค้าโลก และเป็น ข้อจำกัดทางการค้าระหว่างประเทศ [1] จากสถานการณ์ดังกล่าว รัฐบาลไทยได้ส่งเสริมแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจตามโมเดล BCG (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างคุ้มค่า การนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ และ การพัฒนาอย่างสมดุลควบคู่กับการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เพื่อให้เกิดความยั่งยืนในระยะยาว [3] มอสส์ (Moss) เป็นพืชขนาดเล็กในกลุ่มไบรโอไต์ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ โดยมีคุณสมบัติเด่นด้านการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารฟีนอลิกและเทอร์พีนอยด์ ซึ่งมีฤทธิ์ต้านเชื้อราและแบคทีเรีย อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดการปนเปื้อนของสารพิษหรือโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมได้ [2] นอกจากนี้ มอสส์ยังมีบทบาทในการช่วยดูดซับมลพิษทางอากาศ รักษาความชุ่มชื้น และเพิ่มสมดุลของระบบนิเวศ ในขณะเดียวกัน ใบมะรุม (*Moringa oleifera*) เป็นพืชสมุนไพรที่มีสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง โดยเฉพาะสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์และสารไนโตรเจน ซึ่งมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อราและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช [5] ส่วนกากกาแฟ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ยังมีคุณค่าทางโภชนาการของพืช เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียม อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน เพิ่มความพรุน และส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ [6] โรงเรียนเขาดรกรังวิทยาคม จังหวัดสระแก้ว มีพื้นที่ประสบปัญหาเชื้อราจากการปลูกพืชและประสบปัญหาด้าน ต้นทุนการผลิตจากการซื้อสารเคมี รวมถึงพื้นที่เพาะปลูกภายใน “ฟาร์มฮักกรัง” ของโรงเรียน

ดังนั้น โครงการงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดจากมอสส์และใบมะรุมในการยับยั้งเชื้อรา และศึกษาผลของกากกาแฟต่อการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยนำวัสดุที่หาได้ในท้องถิ่นมาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้สารเคมีทางการเกษตร และส่งเสริมการเกษตรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อันจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอสส์ ใบมะรุม และกากกาแฟ
- 1.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดจากมอสส์และใบมะรุมในการยับยั้งเชื้อรา
- 1.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกากกาแฟต่อการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงความพึงพอใจต่อการใช้ดินฮักกรังในการปลูกพืช

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยเรื่องมอสส์ของเจียร์ ธีระวรรณ และคณะพบว่า มอสส์สามารถผลิตสารทุติยภูมิ (secondary metabolites) เช่น ฟีนอลิก (phenolics) และเทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพในการต้านจุลชีพและเชื้อรา นอกจากนี้ มอสส์ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (bioindicator) ในการตรวจสอบการปนเปื้อนของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว และแคดเมียม เนื่องจากมีความสามารถในการสะสมสารพิษจากสิ่งแวดล้อมได้ดี

งานวิจัยของ Anwar et al. รายงานว่าไบเมะรุมมีสารออกฤทธิ์หลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางยาและการเกษตร นอกจากนี้ Majumder et al. [8] พบว่าสารสกัดจากไบเมะรุมสามารถยับยั้งเชื้อราก่อโรคพืช เช่น *Fusarium spp.* และ *Rhizoctonia solani* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยผลการศึกษาของ Patel et al. [9] ยังพบว่าสารสกัดจากไบเมะรุมมีฤทธิ์ต้านเชื้อรา เช่น *Candida albicans* และ *Saccharomyces cerevisiae* โดยสารสำคัญที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ฟลาโวนอยด์และแทนนิน ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้

งานวิจัยของ Campos-Vega et al. รายงานว่ากากกาแฟมีคุณสมบัติช่วยปรับปรุงโครงสร้างดิน เพิ่มความพรุน และช่วยในการอุ้มน้ำ อีกทั้งยังส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดิน นอกจากนี้ กากกาแฟยังมีสารประกอบฟีนอลิกที่มีฤทธิ์ต้านจุลชีพ ซึ่งอาจช่วยยับยั้งเชื้อราบางชนิดได้

งานวิจัยของ Agrios [4] อธิบายว่าเชื้อราที่มีการเจริญเติบโตในรูปของเส้นใย (hyphae) และแพร่กระจายโดยสปอร์ ซึ่งสามารถเจริญได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง การควบคุมเชื้อราจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะการใช้สารชีวภัณฑ์จากธรรมชาติที่มีความปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การใช้สารสกัดจากพืชร่วมกับวัสดุอินทรีย์สามารถพัฒนาเป็นแนวทางการควบคุมเชื้อราแบบยั่งยืนได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการผสมผสานมอสส์ ไบเมะรุม และกากกาแฟ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราและปรับปรุงดิน เป็นแนวทางการพัฒนาสู่นวัตกรรมทางการเกษตรที่ลดการใช้สารเคมีและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอสส์ ไบเมะรุมและกากกาแฟ

มอสส์

1. นำมอสส์มาล้างทำความสะอาดหลังจากนั้นผึ่งแดดให้แห้ง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำมาบดให้ละเอียดด้วยถ้วยบดสาร
2. ทำการสกัดมอสส์ด้วยเอทานอล จำนวน 3 ครั้ง โดยใช้เอทานอลเข้มข้น 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 250 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้กรองด้วยกระดาษกรอง
3. วัดค่าความเป็นกรดเบสด้วย pH มิเตอร์
4. นำสารละลายมอสส์ที่ได้มาแยกตัวทำละลายออกโดยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
5. ทำการตรวจเช็คองค์ประกอบของสารเบื้องต้นโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Thin Layer Chromatography, TLC)
6. นำสารสกัดจากมอสส์ที่ได้ทำการวัดด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer เพื่อหาความยาวคลื่นของกลุ่มสารที่อยู่ในสารสกัดมอสส์

ไบเมะรุม

1. นำไบเมะรุมมาล้างทำความสะอาดหลังจากนั้นผึ่งแดดแล้วนำมาบดให้ละเอียดด้วยถ้วยบดสาร
2. ทำการสกัดไบเมะรุมโดยใช้ไบเมะรุม 2 กรัม ละลายในน้ำ 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน กรองด้วยกระดาษกรอง ทดลองซ้ำ 3 รอบ
3. วัดค่าความเป็นกรดเบส

กากกาแฟ

1. นำกากกาแฟปริมาณ 5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน กรองด้วยกระดาษกรอง

2. วัดค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายกากกาแฟ

ตอนที่ 2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดมอสส์ และใบมะรุมที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อรา

1. เตรียมวุ้นเลี้ยงเชื้อสูตร PDA จากมันฝรั่ง 300 กรัม น้ำตาลกลูโคส 20 กรัม วุ้นทำขนม 20 กรัม ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. ทำการเลี้ยงเชื้อราในถาดเพาะเชื้อ จำนวน 2 ถาด เลี้ยงเชื้อราด้วยสารสกัดมอสส์ โดยใช้ความเข้มข้น 5 และ 10 mg/L นำถาดเพาะเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 ถาด ในข้อที่ 2 มาเปรียบเทียบกับปริมาณเชื้อราที่เกิดขึ้น โดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการขยายเชื้อรา
3. ทำการทดลองดังข้อ 2 แต่เปลี่ยนสารสกัดเป็นใบมะรุม

ตอนที่ 3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกากกาแฟที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

1. นำดินที่ใช้ในการเพาะปลูกลงในกระถางตัวอย่าง 2 กระถาง โดยกระถางที่ 1 เป็นดินธรรมชาติกระถางที่ 2 เป็นดินฮักกรรจ์สูตร 1 กระถางที่ 3 เป็นดินฮักกรรจ์สูตร 2 ทดลองปลูกผักกระหล่ำปลีลงในกระถางทดลอง
2. ทำการวัดความเจริญเติบโตของผักกระหล่ำปลีเป็นเวลา 10 วัน

ตอนที่ 4 เพื่อศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการนำดินฮักกรรจ์ไปใช้ประโยชน์

1. สร้างแบบประเมินความพึงพอใจ จำนวน 10 ข้อ เพื่อวัดระดับความพึงพอใจ 5 ระดับ ตามรูปแบบของ Likert Scale ดังนี้

- | | |
|-----------|-------------------|
| 5 หมายถึง | พึงพอใจมากที่สุด |
| 4 หมายถึง | พึงพอใจมาก |
| 3 หมายถึง | พึงพอใจปานกลาง |
| 2 หมายถึง | พึงพอใจน้อย |
| 1 หมายถึง | พึงพอใจน้อยที่สุด |

2. นำแบบประเมินความพึงพอใจที่ได้ไปให้ครูที่ปรึกษาตรวจสอบ
3. นำแบบประเมินที่ได้มาจัดพิมพ์และนำไปให้นักเรียนชุมนุมนักเรียนมัธยมศึกษา และนักเรียนที่เรียนรายวิชาวิทยาศาสตร์ทางการเกษตร จำนวน 178 คน ประเมิน
4. นำผลการประเมินวิเคราะห์และแปลผล โดยนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์เพื่อใช้ในการแปลความหมาย ทั้งรายข้อ และโดยรวม โดยใช้เกณฑ์การแปลความหมายค่าเฉลี่ย ดังนี้

- | ค่าเฉลี่ย | ความหมาย |
|-------------|-------------------|
| 4.51 – 5.00 | พึงพอใจมากที่สุด |
| 3.51 – 4.50 | พึงพอใจมาก |
| 2.51 – 3.50 | พึงพอใจปานกลาง |
| 1.51 – 2.50 | พึงพอใจน้อย |
| 1.00 – 1.50 | พึงพอใจน้อยที่สุด |

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอสส์ ใบมะรุมและกากกาแฟ

จากผลการทดลอง พบว่า มอสส์ ใบมะรุม และกากกาแฟ มีค่า pH อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยทั้งหมดอยู่ในช่วงประมาณ 5.94–6.07 ซึ่งจัดอยู่ในสภาพกรดอ่อน (slightly acidic) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ย พบว่า มอสส์ มีค่า pH เฉลี่ย 6.00 ใบมะรุม มีค่า pH เฉลี่ย 6.01 และกากกาแฟ มีค่า pH เฉลี่ย 6.05 แสดงให้เห็นว่า กากกาแฟมีค่าความเป็นกรดน้อยที่สุด (มีแนวโน้มเป็นกลาง

มากที่สุด) ขณะที่มอสส์มีความเป็นกรดมากที่สุดเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่า pH ระหว่างทั้งสามตัวอย่างมีค่าน้อยมาก (ไม่เกิน 0.05–0.07 หน่วย) จึงถือว่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ในเชิงการเกษตร ค่า pH ในช่วง 6.0 ถือว่าเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเป็นช่วงที่ธาตุอาหารในดินสามารถละลายและถูกดูดไปใช้ได้ดี อีกทั้งยังเอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์แสดงดังตารางที่ 1

ดังนั้น จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า มอสส์ ใบมะรุ้ม และกากกาแฟ มีคุณสมบัติด้านความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมและสอดคล้องกัน เมื่อนำมาผสมรวมกันจึงไม่ก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของ pH อย่างรุนแรง และสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อการปลูกพืชได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 1 ผลการหาค่าความเป็นกรด-เบส ของมอสส์ ใบมะรุ้มและกากกาแฟ

ตัวอย่าง	ค่า pH	ความเป็นกรด-เบส	เฉลี่ย (Mean) ค่า pH	SD	%RSD
มอสส์	6.02	กรด	6.00 (กรด)	0.057	0.95%
	6.05	กรด			
	5.94	กรด			
ใบมะรุ้ม	5.95	กรด	6.01 (กรด)	0.053	0.88%
	6.03	กรด			
	6.05	กรด			
กากกาแฟ	6.07	กรด	6.05 (กรด)	0.015	0.25%
	6.06	กรด			
	6.04	กรด			

เมื่อนำมอสส์มาทำการสกัดด้วยเอทานอลจะให้สารละลายสีเหลืองใส เนื่องจากเอทานอลสามารถละลายสารประกอบทางเคมีหลายชนิดได้ดี โดยเฉพาะสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ ขณะที่การกลั่นแบบธรรมดาจะเหมาะกับการแยกสารที่ระเหยได้ง่ายเท่านั้น จึงอาจได้ปริมาณสารสำคัญน้อยกว่าและมีองค์ประกอบแตกต่างจากการสกัดด้วยเอทานอล ดังนั้นการสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลจึงเหมาะและให้สารสกัดที่มากกว่าการกลั่นแบบธรรมดา แสดงดังภาพที่ 1



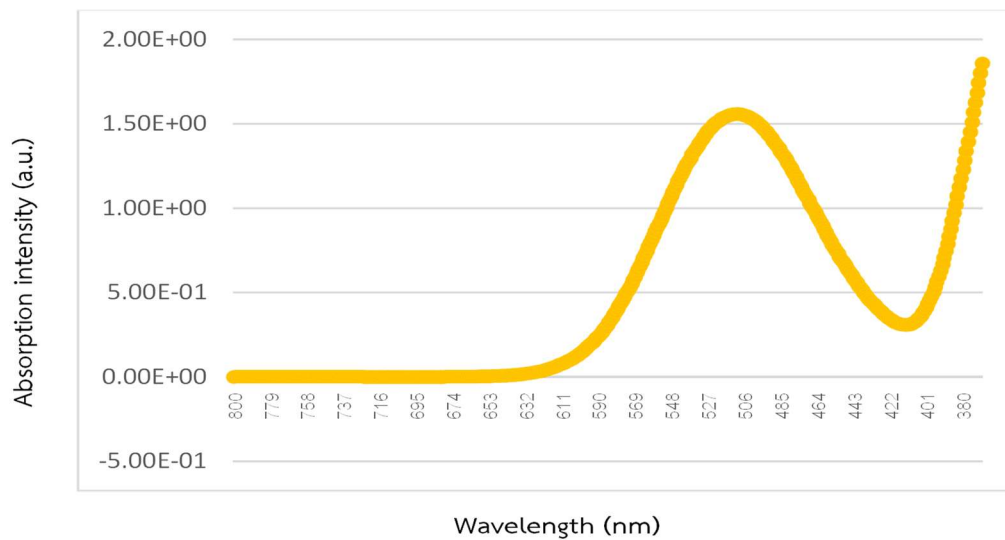
ภาพที่ 1 ผลการสกัดมอสส์ด้วยวิธีการกลั่นแบบธรรมดา (A1-A2) และตัวทำละลายเอทานอล (B1-B2)

จากนั้นทำการทดสอบองค์ประกอบเบื้องต้นของสารโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Thin Layer Chromatography, TLC) เบื้องต้น พบว่า พบว่าปรากฏแถบและจุดสีหลายตำแหน่งบนแผ่นโครมาโทกราฟี ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) แสดงให้เห็นว่าสารสกัดที่นำมาทดสอบไม่ได้ประกอบด้วยสารเพียงชนิดเดียว แต่เป็นสารผสมที่มีองค์ประกอบหลายชนิดซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปกับตัวทำละลายแตกต่างกัน บริเวณด้านล่างของแผ่นปรากฏจุดสีเข้มขนาดใหญ่ใกล้ตำแหน่งเริ่มต้น (baseline) แสดงว่าสารบางชนิดมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายน้อย หรือมีแรงยึดเหนี่ยวกับกระดาษสูง จึงเคลื่อนที่ได้ในระยะสั้น ขณะที่บริเวณกึ่งกลางและด้านบนของแผ่นพบแถบสีหรือจุดเพิ่มเติม ซึ่งเคลื่อนที่สูงขึ้นไปตามแนวตัวทำละลาย สะท้อนว่าสารเหล่านั้นมีความสามารถในการละลายในตัวทำละลายมากกว่าและมีความสัมพันธ์กับเฟสอยู่กับที่น้อยกว่า จึงเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าลักษณะของจุดที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจนบ่งชี้ว่าการแยกสารด้วยวิธีนี้สามารถจำแนกองค์ประกอบเบื้องต้นของสารสกัดได้ในระดับหนึ่ง โดยจำนวนและตำแหน่งของจุดที่ปรากฏสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบชนิดของสารหรือใช้ในการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับสารสำคัญทางชีวภาพในมอสส์ได้ นอกจากนี้ สีที่ปรากฏภายใต้แสง UV ยังอาจสัมพันธ์กับสารกลุ่มรงควัตถุหรือสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่มีคุณสมบัติเรืองแสงหรือดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ดี แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผลการตรวจองค์ประกอบเบื้องต้นโดยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Thin Layer Chromatography, TLC)

จากผลการทดลองโครมาโทกราฟีแบบกระดาษแสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากมอสส์มีองค์ประกอบของสารหลายชนิดที่มีสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแยกตัวออกตามความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ไปกับตัวทำละลายได้อย่างชัดเจน จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบเบื้องต้นของสารสกัดจากธรรมชาติในงานวิจัยทางชีวภาพและเคมีเบื้องต้น และได้นำสารละลายมอสส์ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-visible พบว่า ช่วงความยาวคลื่นสูงกว่า 600 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในระดับต่ำมาก แสดงว่าสารสกัดมีการดูดกลืนแสงในช่วงดังกล่าวน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อความยาวคลื่นลดลงเข้าสู่ช่วงประมาณ 550–500 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสง (absorption peak) ที่ประมาณ 500 นาโนเมตร โดยมีค่าความเข้มการดูดกลืนประมาณ 1.5 a.u. แสดงว่าสารสกัดจากมอสส์มีสารประกอบที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในบริเวณนี้ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับสารกลุ่มรงควัตถุธรรมชาติ เช่น แคโรทีนอยด์ คลอโรฟิลล์บางชนิด หรือสารประกอบฟีนอลิกที่พบได้ในพืชและมอสส์ หลังจากผ่านจุดสูงสุด ค่าการดูดกลืนแสงค่อย ๆ ลดลงในช่วงประมาณ 480–420 นาโนเมตร ก่อนที่จะเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งอย่างชัดเจนบริเวณใกล้ 380 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างแสงที่มองเห็นได้กับรังสีอัลตราไวโอเล็ต การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนในช่วงดังกล่าวอาจบ่งชี้ถึงการมีสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะคู่คอนจูเกต (conjugated double bonds) หรือสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งสามารถดูดกลืนรังสี UV ได้ดี สอดคล้องกับผลการทดสอบโครมาโทกราฟีแบบกระดาษที่พบกลุ่มสาร

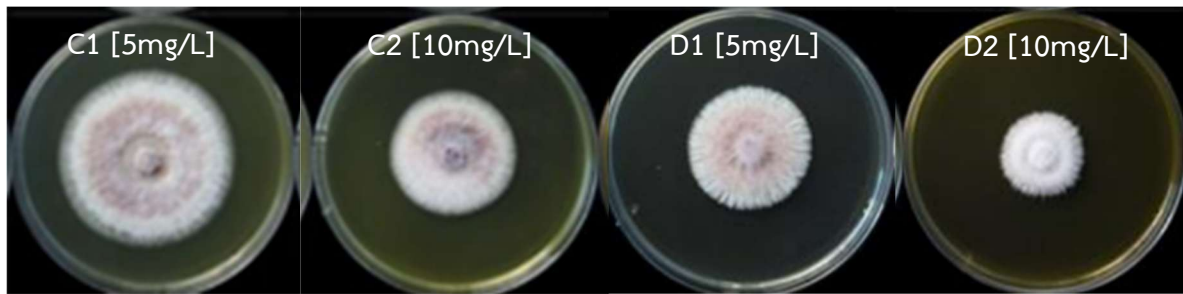


ภาพที่ 3 กราฟผลการวิเคราะห์สารสกัดจากมอสส์ด้วยเทคนิค UV-visible

2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดมอสส์และใบมะรุมที่มีผลต่อการยับยั้งเชื้อรา

จากการศึกษาฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราของสารสกัดจากมอสส์และสารสกัดใบมะรุม พบว่าสารสกัดทั้งสองชนิดสามารถยับยั้งการขยายตัวของเชื้อราได้ โดยประสิทธิภาพในการยับยั้งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในการทดลองสารสกัดจากมอสส์ เมื่อเติมสารสกัดที่ความเข้มข้น 5 mg/L และ 10 mg/L ลงในถาดเพาะเลี้ยงที่ 1 และ 2 ตามลำดับพบว่า เชื้อรามีการขยายตัวแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยถาดที่ใช้สารสกัดความเข้มข้น 5 mg/L เชื้อรามีเส้นผ่านศูนย์กลางการเจริญเท่ากับ 6.3 เซนติเมตร ขณะที่ถาดที่ใช้ความเข้มข้น 10 mg/L เชื้อรามีการขยายตัวลดลงเหลือเพียง 2.1 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากมอสส์มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราจะเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 4C ในส่วนของสารสกัดใบมะรุม พบแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน โดยเมื่อเติมสารสกัดใบมะรุมที่ความเข้มข้น 5 mg/L และ 10 mg/L ลงในถาดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าเชื้อรามีการขยายตัวที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร และ 1.6 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบมะรุมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ และการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดช่วยลดการขยายตัวของเชื้อราได้ดียิ่งขึ้น แสดงดังภาพที่ 4D

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างสารสกัดทั้งสองชนิด พบว่าสารสกัดใบมะรุมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ดีกว่าสารสกัดจากมอสส์เล็กน้อย เนื่องจากให้ค่าการขยายตัวของเชื้อราต่ำกว่าในทั้งสองระดับความเข้มข้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ หรือสารต้านจุลชีพในใบมะรุมที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าสารสกัดจากธรรมชาติทั้งสองชนิดมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารยับยั้งเชื้อราหรือสารชีวภัณฑ์ทางการเกษตรในอนาคตได้



ภาพที่ 4 ภาพการทดสอบประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อราในสารสกัดสกัดมอสส์ (C1 [5mg/L] และ C2 [10mg/L])
และใบมะรุ้ม (D1 [5mg/L] และ D2 [10mg/L])

3. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกากกาแฟที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ตารางที่ 2 แสดงผลการเจริญเติบโตของพืชเปรียบเทียบระหว่างดินธรรมดา ดินชีวภัณฑ์สูตร 1 และดินชีวภัณฑ์สูตร 2 พบว่าพืชที่ปลูกในดินทุกชนิดมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา แต่มีอัตราการเจริญเติบโตแตกต่างกันอย่างชัดเจนในวันเริ่มต้นของการทดลอง พืชทั้ง 3 ชุดมีความสูงเริ่มต้นเท่ากันที่ 43.05 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการทดลองมีจุดเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกันและสามารถเปรียบเทียบผลได้อย่างเหมาะสม หลังจากนั้นพบว่าพืชที่ปลูกในดินชีวภัณฑ์สูตร 1 และสูตร 2 มีการเจริญเติบโตเร็วกว่าพืชที่ปลูกในดินธรรมดอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาดินธรรมดา พบว่า ความสูงของพืชเพิ่มจาก 43.05 เป็น 51.12 มิลลิเมตร ในวันสุดท้ายของการทดลอง เพิ่มขึ้นรวม 8.07 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นอัตราการเจริญเติบโตต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับดินอีก 2 สูตร ขณะที่ดินชีวภัณฑ์สูตร 1 มีการเพิ่มขึ้นของความสูงจาก 43.05 เป็น 56.05 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นรวม 13.00 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าดินชีวภัณฑ์สูตร 1 สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าดินธรรมดา ส่วนดินชีวภัณฑ์สูตร 2 ให้ผลการเจริญเติบโตดีที่สุด โดยพืชมีความสูงเพิ่มจาก 43.05 เป็น 60.32 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นรวม 17.27 มิลลิเมตร และมีค่าความสูงมากที่สุดในทุกช่วงเวลาของการทดลอง โดยเฉพาะในช่วงปลายการทดลองพบว่าพืชมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเทียบกับดินชนิดอื่น

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของกากกาแฟที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

วัน/เดือน/ปี	การเจริญเติบโตของพืช (มิลลิเมตร)		
	ดินธรรมดา	ดินฮักกรรจ์สูตร 1	ดินฮักกรรจ์สูตร 2
25 พ.ค. 2567	43.05	43.05	43.05
26 พ.ค. 2567	43.30	44.05	44.50
27 พ.ค. 2567	44.00	46.05	46.35
28 พ.ค. 2567	45.10	47.00	47.42
29 พ.ค. 2567	46.25	48.05	48.63
30 พ.ค. 2567	47.45	49.40	50.10

วัน/เดือน/ปี	การเจริญเติบโตของพืช (มิลลิเมตร)		
	ดินธรรมดา	ดินฮักกรรจ์สูตร 1	ดินฮักกรรจ์สูตร 2
31 พ.ค. 2567	48.25	51.20	52.34
1 มิ.ย. 2567	49.38	52.42	54.12
2 มิ.ย. 2567	50.43	54.10	56.28
3 มิ.ย. 2567	51.12	56.05	60.32

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ดินชีวภัณฑ์ทั้งสูตร 1 และสูตร 2 มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าดินธรรมดา และดินชีวภัณฑ์สูตร 2 ให้ผลดีที่สุด อาจเนื่องมาจากมีธาตุอาหารหรือจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหาร ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตได้รวดเร็วและต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น

ตอนที่ 4 ผลของการศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการนำดินฮักกรรจ์ไปใช้ในการปลูกพืช

ผลการศึกษาความพึงพอใจจากนักเรียน 178 คน จากกลุ่มนักเรียนที่เข้าร่วมชมชนวิทยาศาสตร์ ของโรงเรียนเขาดรจรังวิทยา ผลการประเมินความคิดเห็นต่อผลิตภัณฑ์ พบว่า ค่าคะแนนเฉลี่ยของทุกหัวข้ออยู่ในระดับ “มากที่สุด” ทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าผู้ประเมินมีความพึงพอใจและให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับสูง โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.65 ซึ่งแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน เมื่อพิจารณาในแต่ละด้าน พบว่าหัวข้อที่ได้รับคะแนนเฉลี่ยสูงที่สุดคือ “การนำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้ประโยชน์” มีค่าเฉลี่ย 4.74 รองลงมา คือ “ส่งเสริมการปลูกพืชปลอดสารพิษ” มีค่าเฉลี่ย 4.73 แสดงให้เห็นว่าผู้ประเมินเห็นความสำคัญของการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและการส่งเสริมแนวทางเกษตรปลอดภัย ซึ่งสะท้อนถึงคุณค่าด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์ ด้านที่มีคะแนนเฉลี่ยสูงรองลงมา ได้แก่ “ลดการใช้ปุ๋ยและสารเคมี” มีค่าเฉลี่ย 4.69 และ “รูปทรง รูปร่างพอเหมาะ” มีค่าเฉลี่ย 4.67 แสดงว่าผลิตภัณฑ์สามารถช่วยลดต้นทุนและลดผลกระทบจากสารเคมีทางการเกษตรได้ อีกทั้งยังมีลักษณะภายนอกที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ในส่วนของประสิทธิภาพด้านการใช้งาน พบว่า “สามารถยับยั้งเชื้อราได้” มีค่าเฉลี่ย 4.64 และ “สามารถเพิ่มผลผลิตได้” รวมถึง “สามารถผลิตใช้ได้เอง” มีค่าเฉลี่ย 4.65 เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าผู้ใช่มองว่าผลิตภัณฑ์มีศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและสามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคการเกษตร ส่วนหัวข้อที่มีคะแนนเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ “ดินร่วนซุยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น” มีค่าเฉลี่ย 4.58 แม้ว่าจะเป็นคะแนนต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับหัวข้ออื่น แต่ยังคงอยู่ในระดับ “มากที่สุด” แสดงว่าผู้ประเมินยังคงมีความคิดเห็นเชิงบวกต่อคุณสมบัติดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการนำดินฮักกรรจ์ไปใช้ในการปลูกพืช จำนวน 178 คน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	แปลผล
1. ผลิตภัณฑ์ใช้ง่าย สะดวก ปลอดภัย	4.61	มากที่สุด
2. ผลิตภัณฑ์ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี	4.62	มากที่สุด
3. ดินร่วนซุยและมีประสิทธิภาพมากขึ้น	4.58	มากที่สุด

4. สามารถเพิ่มผลผลิตได้	4.65	มากที่สุด
5. ลดการใช้ปุ๋ยและสารเคมี	4.69	มากที่สุด
รายการประเมิน	$\bar{X}$	แปลผล
6. สามารถยับยั้งเชื้อราได้	4.64	มากที่สุด
7. ส่งเสริมการปลูกพืชปลอดสารพิษ	4.73	มากที่สุด
8. รูปทรง รูปร่างพอเหมาะ	4.67	มากที่สุด
9. การนำวัสดุที่เหลือใช้มาใช้ประโยชน์	4.74	มากที่สุด
10. สามารถผลิตใช้ได้เอง	4.65	มากที่สุด
เฉลี่ยรวม	4.65	มากที่สุด

ดังนั้น ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ได้รับการยอมรับในระดับสูง ทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความสะดวกในการใช้งาน การลดการใช้สารเคมี การส่งเสริมเกษตรปลอดภัย และการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของผลิตภัณฑ์ในการนำไปใช้จริงเพื่อพัฒนาการเกษตรอย่างยั่งยืนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า มอสส์ ใบมะรุ้ม และกากกาแฟ มีความเป็นกรด-เบส (pH) อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 6.00–6.05 ซึ่งจัดอยู่ในสภาพกรดอ่อน (slightly acidic) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากเป็นช่วงที่ธาตุอาหารในดินสามารถละลายและถูกดูดใช้ได้ดี รวมทั้งเอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อดินและพืช ทั้งนี้ กากกาแฟมีค่า pH สูงที่สุดเล็กน้อย ขณะที่มอสส์มีความเป็นกรดมากกว่าเล็กน้อย แต่ความแตกต่างของค่า pH มีค่าน้อยมาก จึงสามารถนำวัสดุทั้งสามชนิดมาผสมรวมกันได้โดยไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรด-เบสอย่างรุนแรง สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาวัสดุปรับปรุงดินจากทรัพยากรธรรมชาติและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ในการสกัดสารสำคัญจากมอสส์ พบว่าการสกัดด้วยเอทานอลให้สารละลายสีเหลืองใส ซึ่งบ่งชี้ถึงการละลายของสารฟลิกซ์เคมีหลายชนิด โดยเฉพาะสารกลุ่มฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ ขณะที่การกลั่นแบบธรรมดาสามารถแยกได้เฉพาะสารระเหยง่าย จึงอาจให้ปริมาณสารสำคัญน้อยกว่าและมีส่วนประกอบของสารแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าการใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายมีประสิทธิภาพเหมาะสมต่อการสกัดสารสำคัญจากมอสส์มากกว่า

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบกระดาษ (Thin Layer Chromatography: TLC) พบแถบและจุดสีหลายตำแหน่งภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต แสดงว่าสารสกัดจากมอสส์ประกอบด้วยสารหลายชนิดที่มีคุณสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน โดยสารบางชนิดเคลื่อนที่ได้ระยะสั้นเนื่องจากละลายในตัวทำละลายได้น้อยหรือมีแรงยึดเหนี่ยวกับเฟสอยู่กับที่สูง ขณะที่สารบางชนิดเคลื่อนที่ได้ไกลกว่าเนื่องจากมีความสามารถในการละลายสูงกว่า ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความหลากหลายของสารชีวภาพในมอสส์ และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาสารสำคัญทางชีวภาพต่อไป

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy พบว่าสารสกัดจากมอสส์มีการดูดกลืนแสงสูงสุดบริเวณประมาณ 500 นาโนเมตร ซึ่งอาจสัมพันธ์กับสารกลุ่มรงควัตถุธรรมชาติ เช่น แคโรทีนอยด์ คลอโรฟิลล์ หรือสารประกอบฟีนอลิก นอกจากนี้ การดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงใกล้ 380 นาโนเมตร ยังบ่งชี้ถึงการมีสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะคู่คอนจูเกตหรือสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่สามารถดูดกลืนรังสี UV ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ TLC ที่แสดงการมีอยู่ของสารฟลิกซ์เคมีหลายชนิดในสารสกัด

จากการศึกษาฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อรา พบว่าสารสกัดจากมอสส์และสารสกัดใบมะรุมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้โดยประสิทธิภาพในการยับยั้งเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด เมื่อใช้สารสกัดจากมอสส์ที่ความเข้มข้น 5 และ 10 mg/L พบว่าเชื้อราไม่เส้นผ่านศูนย์กลางการเจริญลดลงจาก 6.3 เหลือ 2.1 เซนติเมตร ขณะที่สารสกัดใบมะรุมที่ความเข้มข้นเดียวกันสามารถลดการขยายตัวของเชื้อราจาก 5.0 เหลือ 1.6 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบมะรุมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราได้ดีกว่าสารสกัดจากมอสส์เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และสารต้านจุลชีพในปริมาณที่สูงกว่า ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการยับยั้งการเจริญของเชื้อรา

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของดินชีวภัณฑ์ต่อการเจริญเติบโตของพืช พบว่าพืชที่ปลูกในดินชีวภัณฑ์สูตร 1 และสูตร 2 มีการเจริญเติบโตดีกว่าพืชที่ปลูกในดินธรรมดาอย่างชัดเจน โดยดินชีวภัณฑ์สูตร 2 ให้ผลดีที่สุด พืชมีความสูงเพิ่มขึ้นรวม 17.27 มิลลิเมตร มากกว่าดินธรรมดาที่เพิ่มขึ้นเพียง 8.07 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าดินชีวภัณฑ์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเจริญเติบโตของพืชได้ อาจเนื่องจากมีธาตุอาหารและจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อระบบรากและการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้รวดเร็วและต่อเนื่อง นอกจากนี้ ผลการประเมินความพึงพอใจจากนักเรียนจำนวน 178 คน พบว่าผลิตภัณฑ์ได้รับการประเมินอยู่ในระดับ “มากที่สุด” ทุกด้าน โดยมีค่าเฉลี่ยรวม 4.65 ผู้ประเมินให้ความสำคัญกับการนำวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ การส่งเสริมการปลูกพืชปลอดสารพิษ และการลดการใช้ปุ๋ยและสารเคมี สะท้อนให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และการเกษตรอย่างยั่งยืน รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับชุมชนและสถานศึกษา

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า มอสส์ ใบมะรุม และกากกาแฟ มีคุณสมบัติด้านความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน โดยมีค่า pH อยู่ในช่วงกรดอ่อนที่เอื้อต่อการเจริญของพืชและจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ การสกัดสารสำคัญจากมอสส์ด้วยเอทานอลให้ประสิทธิภาพดีกว่าการกลั่นแบบธรรมดา และสามารถสกัดสารฟอกขาวที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลายชนิด ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC และ UV-Visible spectroscopy สนับสนุนว่าสารสกัดจากมอสส์ประกอบด้วยสารหลายชนิด เช่น สารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และรงควัตถุธรรมชาติ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงและอาจเกี่ยวข้องกับฤทธิ์ทางชีวภาพ สารสกัดจากมอสส์และใบมะรุมสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราได้ โดยประสิทธิภาพในการยับยั้งเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด และสารสกัดใบมะรุมให้ผลดีกว่าสารสกัดจากมอสส์เล็กน้อย นอกจากนี้ ดินชีวภัณฑ์สูตร 1 และสูตร 2 ยังสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ดีกว่าดินธรรมดา โดยเฉพาะดินชีวภัณฑ์สูตร 2 ที่ให้ผลดีที่สุด

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุดในทุกด้าน แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีศักยภาพในการนำไปใช้จริง สามารถช่วยลดการใช้สารเคมี ส่งเสริมการเกษตรปลอดภัย และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติและการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อันจะนำไปสู่การพัฒนาแนวทางเกษตรกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

จากการทำโครงการในครั้งนี้ ผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ควรศึกษาสารสกัดจากพืชชนิดต่างๆ ที่มีในท้องถิ่นเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการยับยั้งเชื้อราและกำจัดศัตรูพืช
2. ควรศึกษา พัฒนา สารสกัดมอสส์ และใบมะรุมให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราในพืชอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านผู้อำนวยการ สุนิษา สาสีพวง ผู้อำนวยการโรงเรียนเขตรังวิทยาคม ที่สนับสนุนงบประมาณ อุปกรณ์ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อรสุรางค์ โสภิพันธ์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว

ที่อนุเคราะห์การตรวจวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทอดเกียรติ แก้วพวง อาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ ให้ความกรุณาเป็นที่ปรึกษาให้ความรู้ คำแนะนำ และวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมวิชาการเกษตร. (2563). การใช้สารเคมีทางการเกษตรและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [2] เจริญ ธีระวรวงศ์ และคณะ. (2560). สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมอสส์และศักยภาพในการต้านจุลชีพ. วารสารวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, 12(2), 45–58.
- [3] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2564). โมเดลเศรษฐกิจ BCG เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน. กรุงเทพฯ.
- [4] Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology (5th ed.). Elsevier Academic Press.
- [5] Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., & Gilani, A. H. (2007). Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses. Phytotherapy Research, 21(1), 17–25.
- [6] Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. Trends in Food Science & Technology, 45(1), 24–36.
- [7] Kyung-Ok Shin, et al. (2016). Antioxidant and antimicrobial activities of phenolic compounds. Journal of Applied Biological Chemistry, 59(3), 1–8.
- [8] Majumder, S., Rani, V., Singh, S., & Srivastava, K. (2024). Antifungal activity of Moringa oleifera leaf extracts against plant pathogens. Indian Journal of Agricultural Sciences, 94(9), 1033–1036.
- [9] Patel, P., et al. (2014). Phytochemical analysis and antifungal activity of Moringa oleifera. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 6(5), 144–147.

การพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วย Raspberry Pi และ Node-RED Dashboard

Development of a Low-Cost Smart Home Control System Based on Internet of Things Architecture Using Raspberry Pi and Node-RED Dashboard

อภิสิทธิ์ เชื้อนุ่น¹, อธิพิพัทธ์ สินธุ¹, และศิริวรรณ พลเศษ^{1,*}

Aphisit Chueanun¹, Itthiphat Sinthu¹ and Siriwan Polset^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปทุมธานี, 13180, ประเทศไทย

¹Mechatronics and Robotics Engineering Department, Faculty of Industrial Technology,
Valaya Alongkorn Rajabhat University Under Royal Patronage, Pathum Thani, 13180, Thailand

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

รับบทความ (Received) : May 09, 2026 /ปรับปรุงแก้ไข (Revised) : June 18, 2026 /ตอบรับบทความ (Accepted) : June 26, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลักร่วมกับ Node-RED Dashboard เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ตรวจสอบสภาพแวดล้อม และแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย DHT11 Sensor สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูล LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม Servo Motor สำหรับจำลองการเปิด-ปิดประตู และ Maker Drive สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ วิธีดำเนินการวิจัยเริ่มจากการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ การพัฒนา Node-RED Dashboard และโพลีควบคุม จากนั้นทดสอบการทำงานของระบบใน 3 ด้าน ได้แก่ การควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Dashboard การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และการควบคุมพัดลมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถควบคุม LED ทั้ง 4 ดวง และควบคุมประตูจำลองผ่าน Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่ง สามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor และแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ระบบสามารถสั่งให้พัดลมจำลองทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard สามารถใช้พัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำได้อย่างเหมาะสมในระดับต้นแบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ด้าน IoT ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติได้

คำสำคัญ : โมเดลต้นแบบบ้านอัจฉริยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, Raspberry Pi, Node-RED Dashboard, ระบบควบคุมต้นทุนต่ำ

Abstract

This research aimed to design and develop a low-cost smart home control system prototype based on Internet of Things architecture using Raspberry Pi 3 as the main control unit and Node-RED Dashboard as the user interface. The system was designed to control household electrical devices, monitor environmental conditions, and display real-time data. The developed prototype consisted of a DHT11 sensor for temperature and humidity measurement, an OLED display for local data visualization, four LEDs for simulating lighting control, a DC motor for simulating a ventilation fan, a servo motor for simulating door opening and closing, and a Maker Drive module for motor control. The research methodology included system architecture design, hardware integration, Node-RED Dashboard development, and control flow implementation. The system was then evaluated in three aspects: device control through the dashboard, environmental data measurement and display, and automatic fan control based on temperature conditions. The experimental results showed that the system could accurately control all four LEDs and operate the simulated door through the servo motor according to user commands. The system was also able to read temperature and humidity values from the DHT11 sensor and continuously display the data through both the Node-RED Dashboard and OLED display. In addition, the simulated fan was activated when the temperature exceeded 30°C and stopped when the temperature decreased to 30°C or below. The findings indicate that Raspberry Pi 3 and Node-RED Dashboard can be effectively applied to develop a low-cost smart home control system at the prototype level. The proposed system is suitable for use as a learning platform for IoT, embedded systems, and basic automatic control applications.

Keywords: Smart home prototype model, Internet of Things, Raspberry Pi, Node-RED Dashboard, Low-cost control system

บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ Internet of Things (IoT) มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาระบบอัตโนมัติในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้ในระบบบ้านอัจฉริยะ ซึ่งเป็นแนวทางการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซอร์โวมอเตอร์ และระบบสื่อสารเครือข่ายมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบ ควบคุม และจัดการอุปกรณ์ภายในบ้านได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาบนพื้นฐานของ IoT จึงไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการเปิด-ปิด อุปกรณ์ไฟฟ้าจากระยะไกลเท่านั้น แต่ยังรวมถึงการรับข้อมูลจากสภาพแวดล้อม การประมวลผลตามเงื่อนไข และการสั่งงานอุปกรณ์แบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกสบาย ความปลอดภัย และการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมภายในที่อยู่อาศัย [1,2] (Cui et al., 2023; Kim, 2023)

ปัจจุบันระบบบ้านอัจฉริยะเชิงพาณิชย์จำนวนมากยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน ความซับซ้อนของการติดตั้ง และการพึ่งพาแพลตฟอร์มเฉพาะของผู้ผลิต ส่งผลให้ผู้ใช้งานทั่วไปหรือผู้เรียนในสาขาวิศวกรรมและเทคโนโลยีอาจเข้าถึงการพัฒนาและปรับแต่งระบบได้ไม่เต็มที่ แนวคิดการพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญ เนื่องจากสามารถใช้เป็นต้นแบบสำหรับการเรียนรู้ การทดลอง และการต่อยอดเชิงวิศวกรรมได้ โดยเฉพาะการเลือกใช้บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก เช่น Raspberry Pi ซึ่งมีความสามารถในการประมวลผล รองรับระบบปฏิบัติการ มีพอร์ต GPIO สำหรับเชื่อมต่อกับเซนเซอร์และอุปกรณ์ภายนอก อีกทั้งยังรองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สาย ทำให้เหมาะสำหรับใช้เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบ IoT ภายใน

บ้าน [3] (Raspberry Pi Ltd., n.d.) เพื่อการต่อยอดการใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard เป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะ เนื่องจาก Node-RED เป็นเครื่องมือพัฒนาแบบ low-code ที่ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ บริการออนไลน์ และข้อมูลจากระบบต่าง ๆ ผ่านรูปแบบการสร้างโฟลว์การทำงาน ทำให้การออกแบบเงื่อนไขควบคุมและส่วนติดต่อผู้ใช้งานสามารถทำได้ง่ายและยืดหยุ่นมากขึ้น [4] (OpenJS Foundation, n.d.) นอกจากนี้ Node-RED Dashboard ยังช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมอุปกรณ์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องพัฒนาแอปพลิเคชันเฉพาะ จึงเหมาะสำหรับระบบต้นแบบที่ต้องการลดต้นทุน ลดความซับซ้อน และเปิดโอกาสให้สามารถปรับปรุงฟังก์ชันการทำงานได้ในอนาคต

จากแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นแบบบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้ Node-RED Dashboard เป็นส่วนติดต่อสำหรับควบคุมและแสดงผลระบบที่พัฒนาประกอบด้วย การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น หลอด LED พัดลมจำลอง และกลไกเปิด-ปิดประตู รวมถึงการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นด้วยเซนเซอร์ DHT11 และการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ผ่านจอ OLED แนวทางดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ทั้งในรูปแบบการควบคุมโดยผู้ใช้งานและการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม เช่น การสั่งให้พัดลมทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนด

ดังนั้น การพัฒนาระบบนี้จึงมีความสำคัญทั้งในด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการจัดการอุปกรณ์ภายในบ้าน และในด้านการสร้างต้นแบบทางวิศวกรรมที่สามารถนำไปใช้เป็นการเรียนรู้หรือต่อยอดสู่ระบบอัตโนมัติที่ซับซ้อนมากขึ้นได้ในอนาคต เช่น การเพิ่มระบบแจ้งเตือนผ่านเครือข่าย การบันทึกข้อมูลสภาพแวดล้อมลงฐานข้อมูล การควบคุมผ่านระบบคลาวด์ หรือการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รักษาความปลอดภัยภายในบ้าน ทั้งนี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีต้นแบบเพื่อสนับสนุนการเรียนรู้ด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เมคาทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัว และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งอย่างเป็นรูปธรรม

1. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.1 เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นแบบโดยใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard
- 1.2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบ IoT
- 1.3 เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติตามสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องเนื่องจากสามารถเชื่อมโยงอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ และระบบควบคุมให้ทำงานร่วมกันผ่านเครือข่ายได้ งานของ Stolojescu-Crisan, Crisan, and Butunoi (2021) [5] ได้นำเสนอระบบบ้านอัจฉริยะแบบ IoT ที่ใช้ Raspberry Pi เป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุมและเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์สั่งงานภายในบ้าน โดยระบบสามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมอุณหภูมิ ไฟฟ้า ระบบรักษาความปลอดภัย และการติดตามพลังงานได้ แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่มุ่งใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบบ้านอัจฉริยะต้นแบบ

ในด้านการออกแบบระบบให้ตอบสนองรวดเร็วและทำงานใกล้แหล่งข้อมูล งานของ Yar, Imran, Khan, Sajjad, and Kastrati (2021) [6] เสนอระบบบ้านอัจฉริยะที่ใช้แนวคิด edge computing ร่วมกับ IoT และ Raspberry Pi เพื่อลดการพึ่งพาระบบคลาวด์และเพิ่มความเร็วในการควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้าน งานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ประมวลผลปลายทางที่เหมาะสมกับระบบควบคุมอัตโนมัติในบ้าน โดยมีผลทดสอบด้านเวลาตอบสนองของระบบควบคุม

หลอดไฟและรีเลย์ในระดับมิลลิวัตต์ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญต่อการพัฒนาระบบควบคุมที่ต้องการความเสถียรและตอบสนองทันต่อการใช้งานจริง

นอกจากนี้ Thomas, MV, SL, and BS (2023) [7] ได้ศึกษาการใช้ IoT, Node-RED และเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย สำหรับระบบบ้านอัจฉริยะ โดยติดตั้ง Node-RED บน Raspberry Pi และสร้าง Dashboard เพื่อควบคุมอุปกรณ์ เช่น ไฟและพัดลม งานนี้แสดงให้เห็นจุดเด่นของ Node-RED ในการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการกำหนดเงื่อนไขควบคุมระบบได้โดยไม่ต้องพัฒนาโปรแกรมที่ซับซ้อนมากนัก จึงสนับสนุนแนวทางของงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้ Node-RED Dashboard เป็นเครื่องมือหลักสำหรับควบคุมและแสดงผลข้อมูลภายในระบบ

ด้านการประยุกต์ใช้ Node-RED ร่วมกับ MQTT และ Raspberry Pi ในระบบควบคุมสิ่งแวดล้อม Chen, Wu, Huang, Huang, and Yang (2024) [8] ได้นำเสนอระบบ IoT สำหรับติดตามสภาพแวดล้อมและควบคุมแสงสว่าง โดยใช้ Raspberry Pi 4B เป็นแพลตฟอร์ม Linux ผังตัว ทำหน้าที่เป็นทั้ง MQTT broker และ Node-RED server ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า Node-RED สามารถใช้สร้างเว็บ HMI สำหรับติดตามข้อมูลและควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวคิดนี้มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้โดยตรง เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นต้องการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสดงผลข้อมูลจากเซนเซอร์ผ่าน Dashboard เช่นเดียวกัน

งานของ Alam, Rokonzaman, Sarker, Abadin, Debnath, and Hossain (2024) [9] ได้ขยายขอบเขตระบบบ้านอัจฉริยะไปสู่การประมวลผลที่ปลายทาง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็น Home Server ร่วมกับ MQTT, ฐานข้อมูล และระบบตรวจจับความผิดปกติ เช่น คิวน์ แก๊ส อุณหภูมิ และเปลวไฟ งานดังกล่าวเน้นให้เห็นว่าระบบบ้านอัจฉริยะไม่ควรจำกัดอยู่เพียงการควบคุมอุปกรณ์ แต่ควรมีความสามารถในการตรวจวัด เฝ้าระวัง และแจ้งเตือนตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมด้วย ประเด็นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ใช้เซนเซอร์ DHT11 ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น เพื่อสั่งงานพัดลมแบบอัตโนมัติเมื่อค่าที่ตรวจวัดสูงกว่าค่าที่กำหนด

ในมิติของการจัดการพลังงานภายในบ้าน Bahmanyar, Razmjoo, and Mirjalili (2022) [10] ได้นำเสนอระบบ Home Energy Management System ที่ใช้ Raspberry Pi, Node-RED และ NodeMCU ร่วมกับอัลกอริทึมเพิ่มประสิทธิภาพเพื่อจัดการการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า ลดค่าไฟฟ้า ลดภาระการใช้พลังงานช่วงพีค และเพิ่มความสะดวกของผู้ใช้ งานนี้สะท้อนให้เห็นว่า Node-RED สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของสถาปัตยกรรมระบบจัดการพลังงานภายในบ้านได้ ไม่ใช่เพียงเครื่องมือควบคุมพื้นฐาน ดังนั้น ระบบต้นแบบในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่การบันทึกข้อมูลพลังงานหรือการควบคุมอุปกรณ์ตามรูปแบบการใช้พลังงานได้ในอนาคต

La Tona, Luna, Di Piazza, and Di Piazza (2019) [11] ศึกษาการนำ Raspberry Pi ไปใช้กับระบบจัดการพลังงานในบ้านอัจฉริยะ โดยมุ่งสู่การใช้งานจริงของระบบควบคุมที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน งานดังกล่าวสนับสนุนแนวคิดที่ว่าบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กสามารถนำมาใช้เป็นหน่วยควบคุมสำหรับระบบบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อระบบต้องการประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์หลายชนิดและตอบสนองต่อเงื่อนไขการใช้งานภายในอาคาร

อีกแนวโน้มหนึ่งของงานบ้านอัจฉริยะคือการเพิ่มความปลอดภัยและการใช้งานที่สะดวกขึ้น Irugalbandara, Naseem, Perera, Kiruthikan, and Logeeshan (2023) [12] ได้นำเสนอระบบบ้านอัจฉริยะที่รองรับการสั่งงานด้วยเสียง การวัดกำลังไฟฟ้า และการทำงานแบบออฟไลน์ เพื่อลดการพึ่งพาบริการคลาวด์และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งาน งานนี้ชี้ให้เห็นว่าแนวทางการออกแบบบ้านอัจฉริยะควรคำนึงถึงความเสถียร ความปลอดภัย และความเหมาะสมกับบริบทของผู้ใช้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ระบบอินเทอร์เน็ตอาจไม่เสถียร ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวคิดต่อยอดจากระบบควบคุมพื้นฐานในงานวิจัยนี้ได้

โดยสรุป งานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่า Raspberry Pi เป็นแพลตฟอร์มที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นศูนย์กลางของระบบบ้านอัจฉริยะ เนื่องจากรองรับการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ อุปกรณ์สั่งงาน และซอฟต์แวร์ควบคุมได้หลากหลาย ขณะที่ Node-RED มีจุดเด่นด้านการสร้างโฟลว์ควบคุมและ Dashboard ที่ใช้งานง่าย งานวิจัยนี้จึงต่อยอดจากองค์ความรู้ดังกล่าว โดยมุ่งพัฒนา

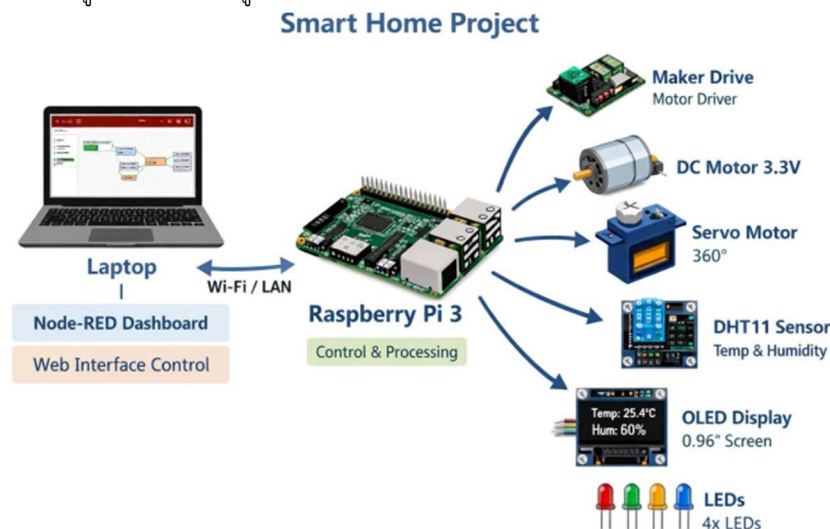
ระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำที่สามารถสั่งงานอุปกรณ์ไฟฟ้า ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น แสดงผลแบบเรียลไทม์ และควบคุมพัดลมอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

วิธีดำเนินการวิจัย

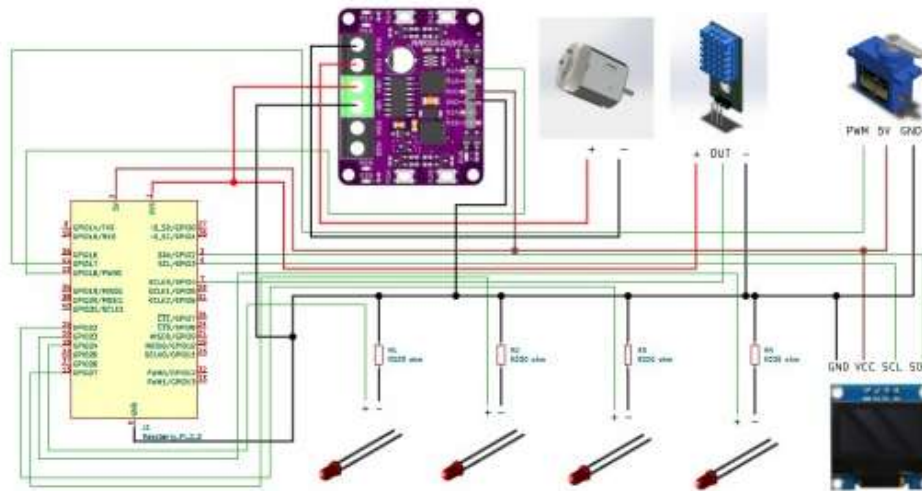
การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงพัฒนา มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลัก และใช้ Node-RED Dashboard เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นมุ่งเน้นการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน การตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น การแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการควบคุมอุปกรณ์ตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม โดยอุปกรณ์หลักของระบบประกอบด้วย Raspberry Pi 3, Maker Drive, DC Motor 3.3V, Servo Motor 360°, DHT11 Sensor, OLED Display ขนาด 0.96 นิ้ว และ LED จำนวน 4 ดวง ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบของระบบต้นแบบในรายงานเดิม

1. การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ

การออกแบบระบบเริ่มจากการกำหนดสถาปัตยกรรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ส่วนประมวลผลกลาง ส่วนควบคุมอุปกรณ์ และส่วนแสดงผลข้อมูล ผู้วิจัยกำหนดให้ Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของระบบ เนื่องจากสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านพอร์ต GPIO และรองรับการสื่อสารผ่านเครือข่าย Wi-Fi/LAN ได้ ส่วน Node-RED Dashboard ใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ เพื่อให้สามารถสั่งงานและตรวจสอบสถานะของระบบได้จากหน้าจอเดียว ส่วนด้านระบบฮาร์ดแวร์ประกอบด้วย DHT11 Sensor สำหรับตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูลภายในระบบ LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม และ Servo Motor สำหรับจำลองกลไกเปิด-ปิดประตู โดยมี Maker Drive ทำหน้าที่เป็นวงจรขับมอเตอร์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของการควบคุมและลดภาระกระแสไฟฟ้าที่ส่งผ่าน Raspberry Pi โดยตรง โครงสร้างการทำงานของระบบและการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังรูปภาพที่ 1 และรูปภาพที่ 2



รูปภาพที่ 1 แผนผังสถาปัตยกรรมระบบและการเชื่อมต่อวงจรของระบบบ้านอัจฉริยะ



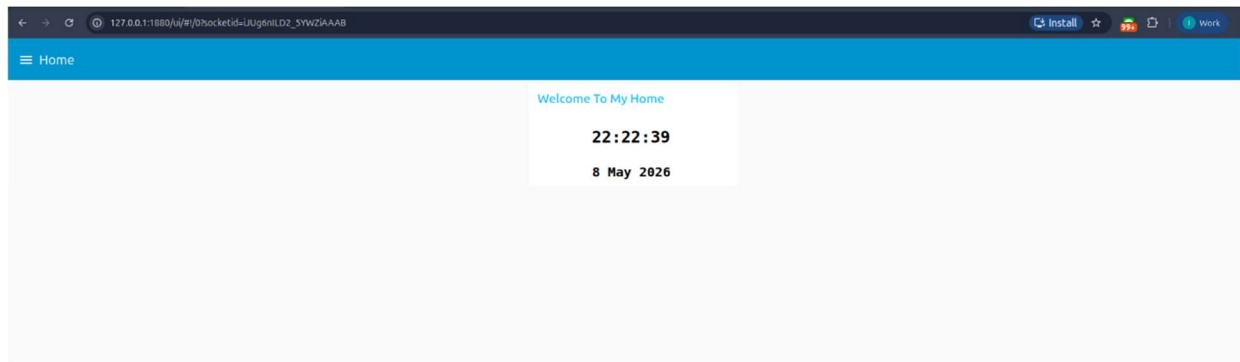
รูปภาพที่ 2 ผังวงจรการเชื่อมต่อวงจรของระบบบ้านอัจฉริยะ

2. การติดตั้งฮาร์ดแวร์และการเชื่อมต่ออุปกรณ์

การติดตั้งฮาร์ดแวร์ดำเนินการโดยเชื่อมต่ออุปกรณ์แต่ละชนิดเข้ากับ Raspberry Pi 3 ตามหน้าที่ของระบบ เริ่มจากการเชื่อมต่อ DHT11 Sensor เพื่อรับค่าอุณหภูมิและความชื้นเข้าสู่ระบบ จากนั้นเชื่อมต่อ OLED Display เพื่อใช้แสดงข้อมูลพื้นฐานของระบบ เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้น หรือสถานะของอุปกรณ์ การแสดงผลผ่าน OLED ช่วยให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้โดยไม่ต้องเปิด Dashboard ตลอดเวลา ในส่วนของอุปกรณ์สั่งงาน LED จำนวน 4 ดวงถูกใช้จำลองระบบแสงสว่างภายในบ้าน โดยควบคุมผ่าน GPIO ที่กำหนดแยกกันแต่ละดวง DC Motor 3.3V ใช้จำลองพัดลมภายในบ้าน และเชื่อมต่อผ่าน Maker Drive เพื่อช่วยขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับการทำงานของมอเตอร์ ลดภาระทางไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นกับ Raspberry Pi 3 โดยตรง ส่วน Servo Motor 360° ใช้จำลองกลไกเปิด-ปิดประตู โดยควบคุมผ่านสัญญาณ PWM จากนั้นภาคส่วนการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ถูกออกแบบให้สามารถตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละส่วนได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ เซนเซอร์ทำหน้าที่รับข้อมูลจากสภาพแวดล้อม Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่ประมวลผลและตัดสินใจตามคำสั่งหรือเงื่อนไข และอุปกรณ์ปลายทางทำหน้าที่ตอบสนองต่อผลการประมวลผล การจัดวางโครงสร้างเช่นนี้ทำให้ระบบมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบด้าน IoT และสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมได้ในอนาคต

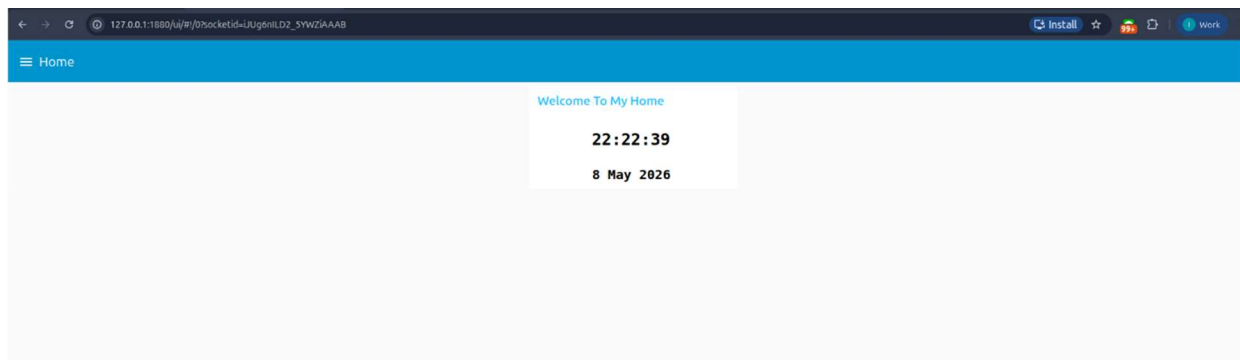
3. การพัฒนา Node-RED Dashboard และโฟลว์ควบคุมระบบ

หลังจากติดตั้งฮาร์ดแวร์แล้ว ได้พัฒนา Node-RED Dashboard เพื่อใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งาน โดยออกแบบหน้าจอให้ใช้งานง่ายและสอดคล้องกับฟังก์ชันหลักของระบบ ได้แก่ การแสดงข้อมูลเบื้องต้น การควบคุมอุปกรณ์ และการติดตามสถานะของระบบ หน้าแรกของ Dashboard ถูกออกแบบให้แสดงข้อความต้อนรับ เวลา และวันที่ของระบบ เพื่อใช้เป็นหน้าจอเริ่มต้นก่อนเข้าสู่การควบคุมอุปกรณ์ ดังรูปภาพที่ 3



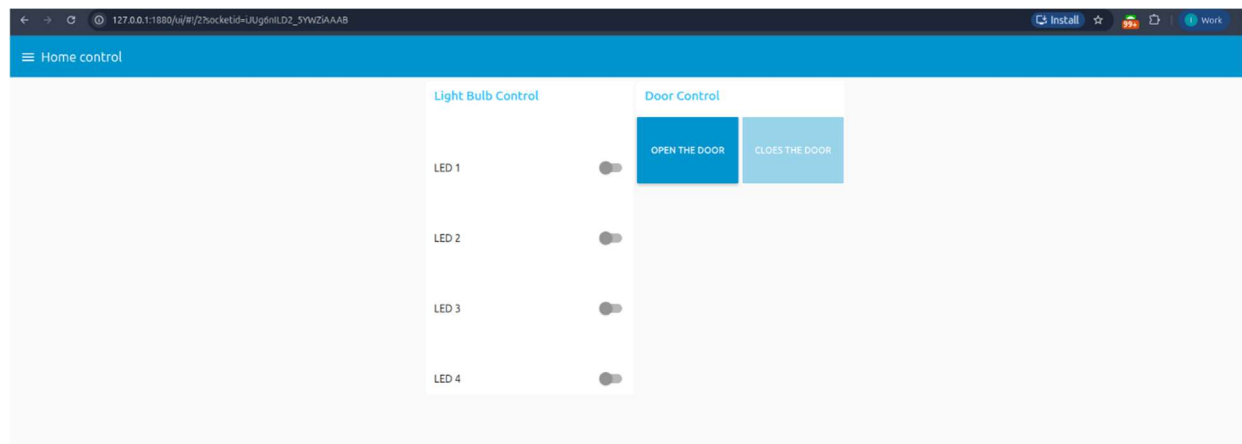
รูปภาพที่ 3 หน้าจอหลักของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 3 หน้าจอหลักทำหน้าที่แสดงสถานะความพร้อมของระบบ โดยแสดงข้อความ “Welcome To My Home” พร้อมเวลาและวันที่ปัจจุบัน ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานทราบว่าระบบ Dashboard สามารถทำงานและเชื่อมต่อกับ Node-RED ได้ตามปกติ ถัดมาได้พัฒนาหน้าจอควบคุมอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเปิด-ปิด LED จำนวน 4 ดวง และควบคุมประตูจำลอง ผ่านปุ่ม OPEN THE DOOR และ CLOSE THE DOOR เมื่อผู้ใช้งานกดปุ่มหรือสวิตช์บน Dashboard คำสั่งจะถูกส่งไปยัง Raspberry Pi 3 เพื่อควบคุมอุปกรณ์ปลายทางผ่าน GPIO และ PWM ตามที่กำหนดไว้ หน้าจอควบคุมอุปกรณ์แสดงดังรูปภาพที่ 4



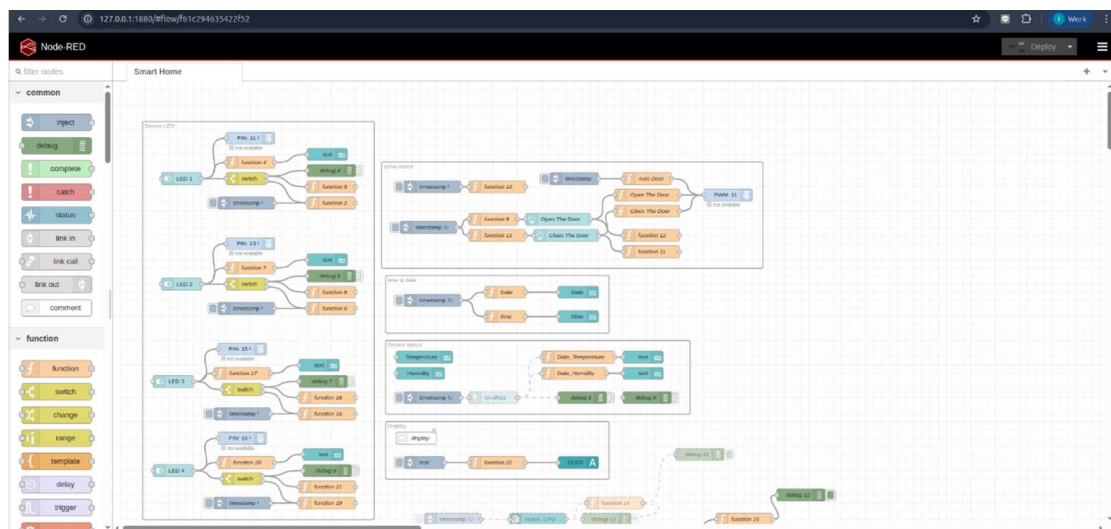
รูปภาพที่ 4 หน้าจอหลักของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 4 แสดงส่วนควบคุมหลอดไฟ LED 1-LED 4 และส่วนควบคุมประตูจำลอง ซึ่งออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานได้โดยตรงผ่านเว็บเบราว์เซอร์ การออกแบบลักษณะนี้ช่วยให้การควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้านทำได้สะดวก โดยไม่ต้องสั่งงานผ่านโค้ดหรือเข้าถึงวงจรถ่ายทอดโดยตรง นอกจากนี้ ยังได้พัฒนาหน้าจอแสดงสถานะของระบบ เพื่อใช้ติดตามข้อมูลระหว่างการทำงาน โดยแสดงค่าอุณหภูมิของ CPU ของ Raspberry Pi 3 และพื้นที่สำหรับแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor หน้าจอดังกล่าวมีประโยชน์ต่อการตรวจสอบความพร้อมของระบบและใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินผลการดำเนินงาน ดังรูปภาพที่ 5



รูปภาพที่ 5 หน้าจอแสดงสถานะของระบบบน Node-RED Dashboard

จากรูปภาพที่ 5 ระบบสามารถแสดงสถานะของอุปกรณ์ประมวลผล โดยตัวอย่างหน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ประมาณ 46 องศาเซลเซียส พร้อมตำแหน่งสำหรับแสดงค่าอุณหภูมิและความชื้นของสภาพแวดล้อม การมีหน้าจอติดตามสถานะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถสังเกตการทำงานของระบบได้สะดวกขึ้นระหว่างการพัฒนาโปรแกรม และการพัฒนาโปรแกรมบน Node-RED ได้ออกแบบให้โปรแกรมแต่ละกลุ่มทำงานแยกตามหน้าที่ของระบบ ได้แก่ กลุ่มควบคุม LED กลุ่มควบคุม Servo Motor สำหรับประตูกำลึง กลุ่มแสดงเวลาและวันที่ กลุ่มรับค่าจาก DHT11 Sensor กลุ่มแสดงผลผ่าน OLED Display และกลุ่มตรวจสอบข้อมูลด้วย debug node โดยโปรแกรมควบคุม LED เชื่อมโยงกับ GPIO ที่กำหนดไว้ ได้แก่ PIN 11, PIN 13, PIN 15 และ PIN 16 ส่วนโปรแกรมควบคุมประตูกำลึงใช้สัญญาณ PWM เพื่อควบคุม Servo Motor โครงสร้างโปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะบน Node-RED Editor แสดงดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 6 โปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะบน Node-RED Editor

จากรูปภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าโปรแกรมการทำงานของระบบบ้านอัจฉริยะถูกจัดกลุ่มตามหน้าที่ของระบบอย่างชัดเจน โดยแต่ละกลุ่มมีการเชื่อมโยงระหว่างโหนดรับคำสั่ง โหนดประมวลผล และโหนดส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ปลายทาง การจัดโครงสร้างโปรแกรมในลักษณะ

นี้ช่วยให้การตรวจสอบข้อผิดพลาดทำได้ง่าย ลดความซับซ้อนในการพัฒนา และรองรับการเพิ่มฟังก์ชันเพิ่มเติมในอนาคต เช่น การแจ้งเตือนผ่านเครือข่าย การบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล หรือการควบคุมผ่านระบบคลาวด์

4. การทดสอบและการประเมินผลระบบ

การทดสอบระบบดำเนินการหลังจากติดตั้งฮาร์ดแวร์และพัฒนาโพล์ควบคุมเสร็จสมบูรณ์ โดยกำหนดแนวทางการทดสอบให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3 ด้าน ได้แก่ การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ การทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และการทดสอบการทำงานแบบอัตโนมัติตามเงื่อนไขของสภาพแวดล้อม ดังนี้ (1) การทดสอบด้านแรกเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard โดยให้ผู้ใช้งานสั่งเปิด-ปิด LED ทั้ง 4 ดวง และสั่งเปิด-ปิดประตูจำลองผ่านปุ่มบน Dashboard จากนั้นตรวจสอบว่า LED และ Servo Motor ตอบสนองตรงตามคำสั่งหรือไม่ เกณฑ์การประเมินพิจารณาจากความถูกต้องของสถานะอุปกรณ์หลังได้รับคำสั่ง เช่น LED ติดหรือดับตรงตามสวิตช์ และ Servo Motor หมุนสอดคล้องกับคำสั่งเปิดหรือปิดประตู (2) การทดสอบด้านที่สองเป็นการตรวจสอบการรับค่าและการแสดงผลข้อมูลจาก DHT11 Sensor โดยระบบต้องสามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้น ส่งข้อมูลไปยัง Node-RED Dashboard และแสดงผลผ่าน OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง เกณฑ์การประเมินพิจารณาจากความต่อเนื่องของการรับส่งข้อมูล ความสอดคล้องของค่าที่แสดงผล และความสามารถในการแสดงข้อมูลแบบเรียลไทม์ (3) การทดสอบด้านที่สามเป็นการตรวจสอบการควบคุมพัดลมจำลองแบบอัตโนมัติ โดยกำหนดเงื่อนไขให้ DC Motor ทำงานเมื่อค่าอุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่อค่าอุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส การทดสอบนี้ใช้เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมภายในบ้าน และตรวจสอบความถูกต้องของตรรกะควบคุมที่พัฒนาขึ้น

การประเมินผลโดยรวมพิจารณาจาก 4 ตัวชี้วัด ได้แก่ ความถูกต้องของการควบคุมอุปกรณ์ ความต่อเนื่องของการแสดงผลข้อมูล ความถูกต้องของการทำงานตามเงื่อนไขอัตโนมัติ และความเสถียรของระบบเมื่อใช้งานผ่านเครือข่าย Wi-Fi/LAN ข้อมูลจากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์เชิงพรรณนา โดยเปรียบเทียบคำสั่งที่กำหนดบน Dashboard กับการตอบสนองของอุปกรณ์จริง รวมถึงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้กับสถานะการทำงานของพัดลมจำลอง หากระบบสามารถควบคุมอุปกรณ์แสดงผลข้อมูล และทำงานตามเงื่อนไขได้อย่างถูกต้อง จะถือว่าต้นแบบระบบบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และมีศักยภาพสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้และการพัฒนาระบบ IoT ต้นทุนต่ำต่อไป

ผลการวิจัย

การนำเสนอผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย ได้แก่ ผลการพัฒนาด้านแบบระบบ ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล และผลการทดสอบการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ โดยระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลัก เชื่อมต่อกับ Node-RED Dashboard, DHT11 Sensor, OLED Display, LED จำนวน 4 ดวง, DC Motor, Servo Motor และ Maker Drive ตามโครงสร้างของระบบบ้านอัจฉริยะที่ออกแบบไว้

1. ผลการพัฒนาด้านแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะ

ผลการพัฒนาระบบพบว่า ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะสามารถทำงานได้ตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดย Raspberry Pi 3 ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับคำสั่งจาก Node-RED Dashboard และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านพอร์ต GPIO และสัญญาณ PWM ระบบสามารถรองรับการควบคุมหลอด LED จำนวน 4 ดวง การควบคุมประตูจำลองด้วย Servo Motor การตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นด้วย DHT11 Sensor และการแสดงผลข้อมูลผ่าน Dashboard และ OLED

Display ได้ครบตามฟังก์ชันที่กำหนดดังแสดงตารางที่ 1 นอกจากนี้ Node-RED Dashboard ที่พัฒนาขึ้นสามารถแบ่งหน้าจอการใช้งานออกเป็นหน้า Home, Home Control และ Home Status ได้อย่างเป็นระบบ โดยหน้า Home ใช้แสดงข้อความต้อนรับเวลา และวันที่ หน้า Home Control ใช้ควบคุม LED และประตูจำลอง ส่วนหน้า Home Status ใช้ติดตามสถานะของระบบ เช่น อุณหภูมิ CPU อุณหภูมิ และความชื้น การออกแบบดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงฟังก์ชันของระบบได้ง่ายผ่านเว็บเบราว์เซอร์ภายในเครือข่ายเดียวกัน

ตารางที่ 1 ผลการพัฒนาฟังก์ชันหลักของระบบต้นแบบ

ลำดับ	ฟังก์ชันของระบบ	อุปกรณ์/ซอฟต์แวร์ที่ใช้	ผลการพัฒนา	สถานะ
1	หน่วยควบคุมกลาง	Raspberry Pi 3	สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับข้อมูลและอุปกรณ์สั่งงานได้	ผ่าน
2	ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน	Node-RED Dashboard	สามารถสร้างหน้า Home, Home Control และ Home Status ได้	ผ่าน
3	การควบคุมแสงสว่าง	LED 1-LED 4	สามารถควบคุมการเปิด-ปิดผ่าน Dashboard ได้	ผ่าน
4	การควบคุมประตูจำลอง	Servo Motor 360°	สามารถสั่งเปิด-ปิดผ่านปุ่มบน Dashboard ได้	ผ่าน
5	การตรวจวัดสภาพแวดล้อม	DHT11 Sensor	สามารถอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นเข้าสู่ระบบได้	ผ่าน
6	การแสดงผลข้อมูล	OLED Display และ Dashboard	สามารถแสดงข้อมูลสถานะของระบบได้	ผ่าน

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าระบบต้นแบบสามารถพัฒนาฟังก์ชันหลักได้ครบตามขอบเขตที่กำหนด โดยเฉพาะการเชื่อมโยงระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ผ่าน Node-RED ซึ่งเป็นจุดสำคัญของระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุ่นต่ำ

2. ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard ดำเนินการโดยสั่งงานอุปกรณ์จากหน้า Home Control ได้แก่ การเปิด-ปิด LED จำนวน 4 ดวง และการควบคุมประตูจำลองผ่านปุ่ม OPEN THE DOOR และ CLOSE THE DOOR ผลการทดสอบพบว่า เมื่อผู้ใช้งานกดสวิทช์หรือปุ่มคำสั่งบน Dashboard ระบบสามารถส่งคำสั่งไปยัง Raspberry Pi 3 และควบคุมอุปกรณ์ปลายทางได้ตรงตามสถานะที่กำหนด สำหรับ LED แต่ละดวง ระบบสามารถแยกการควบคุมได้อย่างอิสระ ทำให้สามารถเปิด-ปิด LED แต่ละตำแหน่งได้โดยไม่กระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์อื่น ส่วนการควบคุมประตูจำลองพบว่า Servo Motor สามารถตอบสนองต่อคำสั่งเปิดและปิดประตูได้ตามลำดับดังแสดงตารางที่ 2 การทำงานดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า Dashboard สามารถทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานสำหรับควบคุมอุปกรณ์ภายในบ้านได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

ลำดับ	รายการทดสอบ	คำสั่งที่กำหนดบน Dashboard	ผลตอบสนองของอุปกรณ์	ผลการประเมิน
1	LED 1	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 1	LED 1 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
2	LED 2	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 2	LED 2 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
3	LED 3	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 3	LED 3 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
4	LED 4	เปิด/ปิดผ่านสวิตช์ LED 4	LED 4 เปลี่ยนสถานะตามคำสั่ง	ผ่าน
5	ประตูจำลอง	กดปุ่ม OPEN THE DOOR	Servo Motor หมุนเพื่อจำลองการเปิดประตู	ผ่าน
6	ประตูจำลอง	กดปุ่ม CLOSE THE DOOR	Servo Motor หมุนเพื่อจำลองการปิดประตู	ผ่าน

จากตารางที่ 2 พบว่าระบบสามารถควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Dashboard ได้ครบทุกฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ แสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างสอดคล้อง ทั้งในส่วนของการรับคำสั่งจากผู้ใช้ และการส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทาง

3. ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลของระบบ

ผลการทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลพบว่า ระบบสามารถรับค่าจาก DHT11 Sensor เพื่อใช้ติดตามอุณหภูมิและความชื้นภายในสภาพแวดล้อมจำลองได้ โดยค่าที่ตรวจวัดถูกส่งเข้าสู่ Raspberry Pi 3 และนำไปแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display การแสดงผลบน Dashboard ช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบข้อมูลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้สะดวก ขณะที่ OLED Display ช่วยให้สามารถตรวจสอบค่าพื้นฐานของระบบได้โดยตรงจากอุปกรณ์ต้นแบบ นอกจากนี้ หน้าจอ Home Status ยังสามารถแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ของ Raspberry Pi 3 ได้ โดยตัวอย่างหน้าจอที่ได้จากการทดสอบแสดงค่าอุณหภูมิ CPU ประมาณ 46 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยสามารถติดตามสถานะการทำงานของอุปกรณ์ประมวลผลระหว่างการทดลองได้ดังแสดงตารางที่ 3 การมีทั้ง Dashboard และ OLED Display จึงช่วยเพิ่มความชัดเจนในการตรวจสอบข้อมูล และลดข้อจำกัดของการพึ่งพาหน้าจอควบคุมเพียงช่องทางเดียว

ตารางที่ 3 ผลการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลของระบบ

รายการทดสอบ	แหล่งข้อมูล/อุปกรณ์	ช่องทางแสดงผล	ผลที่ได้จากการทดสอบ	ผลการประเมิน
อุณหภูมิภายในสภาพแวดล้อมจำลอง	DHT11 Sensor	Node-RED Dashboard	ระบบสามารถรับค่าและแสดงผลได้	ผ่าน
ความชื้นภายในสภาพแวดล้อมจำลอง	DHT11 Sensor	Node-RED Dashboard	ระบบสามารถรับค่าและแสดงผลได้	ผ่าน
อุณหภูมิและความชื้น	DHT11 Sensor	OLED Display	แสดงข้อมูลจากเซนเซอร์บนอุปกรณ์ต้นแบบได้	ผ่าน
อุณหภูมิ CPU	Raspberry Pi 3	Home Status Dashboard	แสดงค่าอุณหภูมิ CPU ของระบบได้	ผ่าน
เวลาและวันที่	Node-RED Flow	Home Dashboard	แสดงเวลาและวันที่ปัจจุบันได้	ผ่าน

4. ผลการทดสอบการควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

การทดสอบการควบคุมอัตโนมัติดำเนินการโดยใช้ค่าอุณหภูมิจาก DHT11 Sensor เป็นเงื่อนไขในการสั่งงาน DC Motor ผ่าน Maker Drive เพื่อจำลองการทำงานของพัดลมภายในบ้าน ระบบถูกกำหนดให้พัดลมทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ตามตรรกะการควบคุมที่ออกแบบไว้ในระบบต้นแบบ ผลการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 28 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าเงื่อนไขที่กำหนด พัดลมจำลองไม่ทำงาน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 31 องศาเซลเซียส ระบบสามารถสั่งให้ DC Motor ทำงานได้ และเมื่ออุณหภูมิลดลงกลับมาที่ 30 องศาเซลเซียส ระบบสั่งให้พัดลมหยุดทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ตั้งแสดงตารางที่ 4 การทำงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อค่าตรวจวัดจากสภาพแวดล้อมและสั่งงานอุปกรณ์โดยอัตโนมัติได้

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการควบคุมพัดลมจำลองตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

กรณีทดสอบ	ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้	เงื่อนไขที่กำหนด	ผลการทำงานของพัดลมจำลอง	ผลการประเมิน
กรณีที่ 1	28 °C	ต่ำกว่า 30 °C	พัดลมหยุดทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 2	31 °C	สูงกว่า 30 °C	พัดลมทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 3	30 °C	เท่ากับ 30 °C	พัดลมหยุดทำงาน	ผ่าน
กรณีที่ 4	ค่าที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม	ประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด	ระบบตอบสนองตามสถานะอุณหภูมิ	ผ่าน

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมพัดลมจำลองได้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยการใช้ DHT11 Sensor ร่วมกับ Raspberry Pi 3 และ Maker Drive ทำให้ระบบสามารถทำงานในลักษณะอัตโนมัติได้ ไม่จำเป็นต้องอาศัยการสั่งงานจากผู้ใช้งานตลอดเวลา ผลการทดสอบนี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์ตามสภาพแวดล้อมภายในบ้าน

โดยสรุป ผลการวิจัยทั้ง 4 ส่วนแสดงให้เห็นว่า ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ครบตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ การพัฒนาระบบต้นแบบด้วย Raspberry Pi 3 และ Node-RED Dashboard การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านระบบ IoT การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ และการควบคุมอุปกรณ์อัตโนมัติตามค่าอุณหภูมิ ระบบจึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้ด้าน IoT ระบบสมองกลฝังตัว และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมต้นทุนต่ำในบริบทของบ้านอัจฉริยะต่อไป

อภิปรายผล

จากผลการพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งด้วย Raspberry Pi และ Node-RED Dashboard สามารถอภิปรายผลให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ วิธีดำเนินการวิจัย และผลการทดลองได้ดังนี้

1. การพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า Raspberry Pi 3 สามารถทำหน้าที่เป็นหน่วยควบคุมกลางของระบบบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากสามารถรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ประมวลผลเงื่อนไข และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางผ่านพอร์ต GPIO ได้ในระบบเดียว องค์ประกอบที่ใช้ ได้แก่ DHT11 Sensor, OLED Display, LED, DC Motor, Servo Motor และ Maker Drive สามารถเชื่อมโยงการทำงานร่วมกันได้ตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 ที่มุ่งออกแบบและ

พัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำโดยใช้ Raspberry Pi ร่วมกับ Node-RED Dashboard และเมื่อพิจารณาในเชิงวิศวกรรม ระบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นคือการจัดโครงสร้างอุปกรณ์อย่างเป็นระบบ โดยแยกหน้าที่ของแต่ละส่วนอย่างชัดเจน ได้แก่ ส่วนรับข้อมูล ส่วนประมวลผล ส่วนควบคุมอุปกรณ์ และส่วนแสดงผลข้อมูล การออกแบบเช่นนี้ช่วยให้ระบบสามารถตรวจสอบการทำงานของแต่ละส่วนได้ง่าย ลดความซับซ้อนของการพัฒนา และเหมาะต่อการต่อยอดในอนาคต เช่น การเพิ่มระบบแจ้งเตือน การบันทึกข้อมูล หรือการเชื่อมต่อกับบริการคลาวด์ อย่างไรก็ตาม ระบบยังอยู่ในระดับต้นแบบ จึงเหมาะกับการทดลองและการเรียนรู้มากกว่าการใช้งานจริงในระดับบ้านพักอาศัยเต็มรูปแบบ เนื่องจากยังไม่ได้ประเมินความทนทานของระบบในระยะยาว ความปลอดภัยทางไฟฟ้า และความมั่นคงปลอดภัยของเครือข่ายอย่างละเอียด

2. การควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard

ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard พบว่าระบบสามารถควบคุม LED จำนวน 4 ดวง และควบคุมประตูลงด้วย Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่งของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่า Node-RED Dashboard สามารถทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานที่เหมาะสมสำหรับระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ โดยผู้ใช้งานสามารถสั่งงานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องเข้าถึงโค้ดหรือวงจรฮาร์ดแวร์โดยตรง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ประเด็นที่น่าสนใจคือ การออกแบบ Dashboard ให้แยกหน้าใช้งานออกเป็น Home, Home Control และ Home Status ช่วยให้ระบบมีความชัดเจนต่อผู้ใช้งาน หน้า Home ใช้แสดงความพร้อมของระบบ หน้า Home Control ใช้ควบคุมอุปกรณ์โดยตรง และหน้า Home Status ใช้ติดตามสถานะของระบบ การจัดรูปแบบเช่นนี้ทำให้ต้นแบบมีความใกล้เคียงกับระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะเชิงประยุกต์มากกว่าการสั่งงานผ่านโปรแกรมหรือคำสั่งพื้นฐานเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การควบคุมยังจำกัดอยู่ภายในเครือข่าย Wi-Fi/LAN เดียวกัน หากต้องการนำไปใช้งานจริงควรพัฒนาให้รองรับการเข้าถึงจากภายนอกอย่างปลอดภัย เช่น การกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน การเข้ารหัสข้อมูล และการเชื่อมต่อผ่านระบบคลาวด์ที่มีมาตรการรักษาความปลอดภัย

3. การตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์

ผลการทดลองด้านการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลพบว่า ระบบสามารถรับค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor และนำข้อมูลไปแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้ตามที่ออกแบบไว้ การแสดงผลผ่านสองช่องทางช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตามสถานะของระบบ โดย Dashboard เหมาะสำหรับการตรวจสอบผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ส่วน OLED Display เหมาะสำหรับการตรวจสอบข้อมูลโดยตรงที่ตัวอุปกรณ์ต้นแบบ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยที่กำหนดให้ระบบมีทั้งส่วนแสดงผลผ่านซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ จากนั้นในเชิงการใช้งาน ระบบดังกล่าวสะท้อนแนวคิดของ IoT ที่ไม่ได้มุ่งเน้นเฉพาะการควบคุมอุปกรณ์เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการรับรู้ข้อมูลจากสภาพแวดล้อมและนำข้อมูลนั้นมาประกอบประกอบการตัดสินใจของระบบ อย่างไรก็ตาม เซนเซอร์ DHT11 มีข้อจำกัดด้านความละเอียดและความแม่นยำเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ที่มีคุณภาพสูงกว่า ดังนั้น หากต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลในงานวิจัยระยะต่อไป ควรเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมือมาตรฐาน หรือเปลี่ยนไปใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงขึ้น เช่น DHT22, SHT31 หรือ BME280 เพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการตรวจวัด

4. การควบคุมอัตโนมัติตามเงื่อนไขอุณหภูมิ

ผลการทดสอบการควบคุมพัดลมจำลองตามเงื่อนไขอุณหภูมิพบว่า ระบบสามารถสั่งให้ DC Motor ทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียสได้ตามตรรกะที่กำหนด ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 ซึ่งต้องการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติตาม

สภาพแวดล้อมภายในบ้าน ซึ่งการควบคุมในลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้มากกว่าการควบคุมแบบผู้ใช้งานสั่งงานโดยตรง เนื่องจากระบบสามารถใช้ค่าจากเซนเซอร์เป็นเงื่อนไขในการตัดสินใจและสั่งงานอุปกรณ์ได้เอง แนวทางดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญของระบบบ้านอัจฉริยะ เนื่องจากช่วยลดภาระของผู้ใช้งาน เพิ่มความสะดวก และอาจช่วยสนับสนุนการใช้พลังงานอย่างเหมาะสม โดยให้พัดลมทำงานเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนด อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขการควบคุมที่ใช้ในการทดลองยังเป็นรูปแบบพื้นฐานแบบค่าขีดแบ่งเดียว จึงอาจเกิดการเปิด-ปิดถี่หากค่าอุณหภูมิแกว่งอยู่บริเวณใกล้ 30 องศาเซลเซียส ในการพัฒนาต่อควรเพิ่มช่วงฮิสเทอรีซิส เช่น เปิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 31 องศาเซลเซียส และปิดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 29 องศาเซลเซียส เพื่อให้ระบบทำงานเสถียรมากขึ้น

5. ความสอดคล้องของผลการวิจัยกับแนวทางการพัฒนาระบบ IoT ต้นทุนต่ำ

เมื่อพิจารณาผลการวิจัยโดยรวม พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองแนวคิดของระบบ IoT ต้นทุนต่ำได้ในระดับต้นแบบ เนื่องจากใช้ฮาร์ดแวร์ที่หาได้ง่าย มีต้นทุนไม่สูง และใช้ซอฟต์แวร์แบบเปิดที่สามารถปรับแต่งได้ตามความต้องการ Node-RED ช่วยลดความซับซ้อนของการพัฒนาโปรแกรม ทำให้ผู้พัฒนาสามารถสร้างระบบที่เชื่อมโยงระหว่าง Dashboard, เซนเซอร์ และอุปกรณ์ปลายทางได้โดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมทั้งหมดจากศูนย์ ดังนั้นจึงได้ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นว่าการใช้ Raspberry Pi 3 ร่วมกับ Node-RED Dashboard เหมาะสำหรับการพัฒนาต้นแบบด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เมคคาทรอนิกส์ ระบบสมองกลฝังตัว และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เนื่องจากระบบมีองค์ประกอบครบทั้งการรับข้อมูล การประมวลผล การควบคุมอุปกรณ์ และการแสดงผลข้อมูล อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้งานจริงควรพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม ได้แก่ ความเสถียรของเครือข่ายความปลอดภัยของระบบควบคุม การป้องกันความเสียหายจากกระแสไฟฟ้าเกิน และการทดสอบการทำงานต่อเนื่องในระยะยาว

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำบนสถาปัตยกรรมอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยใช้ Raspberry Pi 3 เป็นหน่วยควบคุมหลักร่วมกับ Node-RED Dashboard สำหรับการควบคุมและแสดงผลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ DHT11 Sensor สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น OLED Display สำหรับแสดงผลข้อมูล LED จำนวน 4 ดวงสำหรับจำลองระบบแสงสว่าง DC Motor สำหรับจำลองพัดลม Servo Motor สำหรับจำลองการเปิด-ปิดประตู และ Maker Drive สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์

ผลการพัฒนาระบบพบว่า ต้นแบบสามารถทำงานได้ครบตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดย Raspberry Pi 3 สามารถทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับข้อมูลจากเซนเซอร์ ประมวลผลคำสั่ง และส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ปลายทางได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่ Node-RED Dashboard สามารถออกแบบเป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานได้ 3 ส่วน ได้แก่ หน้า Home สำหรับแสดงข้อความต้อนรับ เวลา และวันที่ หน้า Home Control สำหรับควบคุม LED และประตูจำลอง และหน้า Home Status สำหรับแสดงสถานะของระบบ เช่น อุณหภูมิ CPU อุณหภูมิ และความชื้น การจัดโครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ระบบมีความชัดเจน ใช้งานง่าย และเหมาะสมต่อการพัฒนาต้นแบบระบบ IoT ต้นทุนต่ำ และผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ผ่าน Node-RED Dashboard พบว่า ระบบสามารถสั่งเปิด-ปิด LED ทั้ง 4 ดวง และควบคุมการเปิด-ปิดประตูจำลองผ่าน Servo Motor ได้ตรงตามคำสั่งของผู้ใช้งาน แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโยงระหว่าง Dashboard, Raspberry Pi 3 และอุปกรณ์ปลายทางสามารถทำงานร่วมกันได้ตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรับค่าอุณหภูมิและความชื้นจาก DHT11 Sensor แล้วแสดงผลผ่าน Node-RED Dashboard และ OLED Display ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะของระบบและข้อมูลสภาพแวดล้อมได้แบบเรียลไทม์ ในส่วนของการควบคุมอัตโนมัติ ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถใช้ค่าอุณหภูมิจาก DHT11 Sensor เป็นเงื่อนไขในการสั่งงาน DC Motor ผ่าน Maker Drive ได้ โดยพัดลมจำลองทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส และหยุด

ทำงานเมื่ออุณหภูมิลดลงเท่ากับหรือต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการควบคุมแบบผู้ใช้งานสั่งงานโดยตรง แต่สามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมและควบคุมอุปกรณ์แบบอัตโนมัติได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

โดยสรุป ต้นแบบระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของการวิจัยได้ครบทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำ การทดสอบการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านผ่านระบบ IoT และการประเมินความสามารถของระบบในการตรวจวัดและควบคุมอุปกรณ์อัตโนมัติตามสภาพแวดล้อม ระบบดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นต้นแบบการเรียนรู้ด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติในระดับพื้นฐาน อีกทั้งยังสามารถนำไปต่อยอดสู่การพัฒนาบ้านอัจฉริยะที่มีฟังก์ชันซับซ้อนมากขึ้นในอนาคต ดังนั้นระบบยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ ความแม่นยำของเซนเซอร์ DHT11 ซึ่งเหมาะสำหรับการทดลองระดับต้นแบบมากกว่าการตรวจวัดที่ต้องการความละเอียดสูง การควบคุมพัดลมยังใช้เงื่อนไขแบบค่าขีดแบ่งเดียว ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปิด-ปิดถี่เมื่อค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงใกล้ค่าที่กำหนด และการใช้งาน Dashboard ยังจำกัดอยู่ภายในเครือข่ายเดียวกัน ดังนั้น การพัฒนาต่อไปควรเพิ่มระบบบันทึกข้อมูลลงฐานข้อมูล ระบบแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์พกพา การควบคุมผ่านระบบคลาวด์ การกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งาน และการใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเสถียร ความปลอดภัย และความพร้อมของระบบต่อการประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถนำผลการวิจัยไปใช้เป็นต้นแบบสำหรับการเรียนรู้และพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะต้นทุนต่ำในด้านอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบสมองกลฝังตัว และระบบควบคุมอัตโนมัติได้ เนื่องจากผลการทดลองพบว่า Raspberry Pi 3 สามารถเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ อุปกรณ์แสดงผล และอุปกรณ์สั่งงานได้อย่างเป็นระบบ ขณะที่ Node-RED Dashboard สามารถใช้เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้งานสำหรับควบคุม LED ประตูลง และแสดงสถานะของระบบได้อย่างสะดวก ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปใช้ควรเน้นการประยุกต์เป็นชุดฝึกปฏิบัติหรือระบบต้นแบบ โดยควรเพิ่มการจัดระเบียบวงจร แหล่งจ่ายไฟ และอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าให้เหมาะสม หากต้องการต่อยอดไปใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าจริง เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัย เสถียร และเกิดประโยชน์สูงสุดต่อการเรียนรู้และการใช้งานเชิงประยุกต์

การวิจัยในครั้งต่อไปควรพัฒนาระบบให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นในด้านการบันทึกข้อมูล การแจ้งเตือน และการควบคุมจากระยะไกล เนื่องจากงานวิจัยครั้งนี้ยังเน้นการควบคุมและแสดงผลแบบเรียลไทม์ภายในเครือข่าย Wi-Fi/LAN เป็นหลัก แต่ยังไม่ได้พัฒนาระบบฐานข้อมูล การแจ้งเตือนผ่านอุปกรณ์พกพา หรือมาตรการความปลอดภัยสำหรับการเข้าถึงจากภายนอก นอกจากนี้ ควรปรับปรุงการควบคุมพัดลมจากเงื่อนไขอุณหภูมิแบบค่าขีดแบ่งเดียวให้มีความเสถียรมากขึ้น เช่น การเพิ่มช่วงฮิสเทรีซิส และควรเปรียบเทียบเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงกว่า DHT11 เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงทดสอบระบบในระยะยาวเพื่อประเมินความเสถียรและความพร้อมต่อการใช้งานจริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cui, J., Du, Z., Liu, K., & Cao, J. (2023). The simulation design of smart home system based on Internet of Things. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 23(6). <https://doi.org/10.3233/JCM-226995>
- [2] Kim, H. (2023). Machine learning-based cost-effective smart home data analysis and forecasting for energy saving. *Buildings*, 13(9), 2397. <https://doi.org/10.3390/buildings13092397>
- [3] Raspberry Pi Ltd. (n.d.). Raspberry Pi 3 Model B. Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [4] OpenJS Foundation. (n.d.). Node-RED: Low-code programming for event-driven applications. Node-RED. <https://www.node-red.dev/>

- [5] Stolojescu-Crisan, C., Crisan, C., & Butunoi, B.-P. (2021). An IoT-based smart home automation system. *Sensors*, 21(11), 3784. <https://doi.org/10.3390/s21113784>
- [6] Yar, H., Imran, A. S., Khan, Z. A., Sajjad, M., & Kastrati, Z. (2021). Towards smart home automation using IoT-enabled edge-computing paradigm. *Sensors*, 21(14), 4932. <https://doi.org/10.3390/s21144932>
- [7] Thomas, L., MV, M. K., SL, S. D., & BS, P. (2023). Towards comprehensive home automation: Leveraging the IoT, Node-RED, and wireless sensor networks for enhanced control and connectivity. *Engineering Proceedings*, 59(1), 173. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059173>
- [8] Chen, C.-Y., Wu, S.-H., Huang, B.-W., Huang, C.-H., & Yang, C.-F. (2024). Web-based Internet of Things on environmental and lighting control and monitoring system using Node-RED, MQTT and Modbus communications within embedded Linux platform. *Internet of Things*, 27, 101305. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101305>
- [9] lam, T., Rokonzaman, M., Sarker, S., Abadin, A. F. M. Z., Debnath, T., & Hossain, M. I. (2024). Internet of Things-based home automation with network mapper and MQTT protocol. *Computers and Electrical Engineering*, 120, 109807. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109807>
- [10] Bahmanyar, D., Razmjoo, N., & Mirjalili, S. (2022). Multi-objective scheduling of IoT-enabled smart homes for energy management based on Arithmetic Optimization Algorithm: A Node-RED and NodeMCU module-based technique. *Knowledge-Based Systems*, 247, 108762. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108762>
- [11] La Tona, G., Luna, M., Di Piazza, A., & Di Piazza, M. C. (2019). Towards the real-world deployment of a smart home EMS: A DP implementation on the Raspberry Pi. *Applied Sciences*, 9(10), 2120. <https://doi.org/10.3390/app9102120>
- [12] Irugalbandara, C., Naseem, A. S., Perera, S., Kiruthikan, S., & Logeeshan, V. (2023). A secure and smart home automation system with speech recognition and power measurement capabilities. *Sensors*, 23(13), 5784. <https://doi.org/10.3390/s23135784>