



การประชุมวิชาการระดับชาติ ตรงเท่าวิจัย

2025 8th EEAAT & ARU CON.

โดยสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

Proceedings

ภาคบรรยาย | ภาคโปสเตอร์

18 ธันวาคม 2568

ณ โรงแรมคลาสสิก คามีโอ อยุธยา
อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา



2025 8th EEAAT & ARU CON PROCEEDINGS

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ
“กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8
(2025 8th EEAAT & ARU CON.)

โดย สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2568
ณ โรงแรมคลาสสิก คามิโอ ออยุธยา
จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

คำนำ

ด้วยมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ดำเนินการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติขึ้น เพื่อให้คณาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา บุคลากรในแวดวงวิชาการและวิจัยทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ภาคประชาสังคม และภาคประชาสังคม ได้มีโอกาสนำเสนอผลงานทางวิจัย รวมทั้งแลกเปลี่ยนประสบการณ์ด้านการวิจัย มีการเรียนรู้ร่วมกันเพื่อพัฒนาคุณภาพด้านวิจัยในสาขาต่าง ๆ โดยสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย ได้แก่ มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย สมาคมพัฒนาชุมชน ท้องถิ่นและสังคม (สพช.) สมาคมพัฒนาวิชาชีพการบริหารการศึกษาแห่งประเทศไทย สมาคมวิชาการรัฐศาสตร์และรัฐประศาสนศาสตร์ สมาคมเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา (ThaiAECT) สมาคมปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย (AIAT) สมาคม IEEE Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Society และสมาคมเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา (ThaiAECT)

ในปี พ.ศ.2568 โดยสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย ดำเนินการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8 (2025 8th EEAAT & ARU CON.) วันที่ 18 ธันวาคม 2568 ณ โรงแรมคลาสสิก คามีโอ อยุธยา ซึ่งบทความวิจัยที่ได้รับการคัดเลือกให้นำเสนอในการประชุมนี้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพของบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบบทความ (Peer Reviewer) ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิจากหลากหลายสถาบัน ที่เชี่ยวชาญ หรือเกี่ยวข้องในสาขานั้น

เนื้อหาในเล่มประกอบด้วย บทความวิจัยของผู้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัย ในภาคบรรยาย (Oral Presentation) จำนวน 46 บทความ ผ่านการตรวจประเมินคุณภาพทางวิชาการจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ โดยแยกตามกลุ่มสาขา 4 กลุ่ม ดังนี้ 1) กลุ่มการศึกษา จำนวน 13 บทความ 2) กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ จำนวน 4 บทความ 3) กลุ่มวิทยาการจัดการและบริหารธุรกิจ จำนวน 8 บทความ และ 4) กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมจำนวน 21 บทความ

บทความวิจัยของผู้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิจัย ในภาคโปสเตอร์ (Poster Presentation) จำนวน 27 บทความ ผ่านการตรวจประเมินคุณภาพทางวิชาการจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ โดยแยกตามกลุ่มสาขา 2 กลุ่ม ดังนี้ 1) กลุ่มการศึกษา จำนวน 10 บทความ และ 2) กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม จำนวน 17 บทความ

คณะผู้จัดงานหวังเป็นอย่างยิ่งว่า การจัดประชุมวิชาการระดับชาติในครั้งนี้ จะเป็นเวทีที่เปิดโอกาสให้อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา บุคลากรในแวดวงวิจัย ตลอดจนผู้สนใจทุกท่าน ได้แลกเปลี่ยนเรียนรู้ร่วมกัน เป็นเครือข่ายในการสร้างสรรค์ผลงาน วิจัย นวัตกรรม และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อท้องถิ่น สังคมและประเทศชาติสืบไป

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ธันวาคม 2568

การประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8
(2025 8th EEAAT & ARU CON.)
โดย สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2568
ณ โรงแรมคลาสสิก คามิโอ อโยธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

หน่วยงานร่วมจัดการประชุมวิชาการ

เจ้าภาพหลัก สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

เจ้าภาพร่วม สมาคมพัฒนาชุมชน ท้องถิ่นและสังคม (สพช.)
สมาคมพัฒนาวิชาชีพการบริหารการศึกษาแห่งประเทศไทย
สมาคมวิชาการรัฐศาสตร์และรัฐประศาสนศาสตร์
สมาคมเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา (ThaiAECT)
สมาคมปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย (AIAT)
สมาคม IEEE Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Society
สมาคมเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา (ThaiAECT)
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อติคม ฤกษ์บุตร	นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
รองศาสตราจารย์ ดร.เอมอร แสนภูวา	นายกสมาคมพัฒนาชุมชน ท้องถิ่นและสังคม
รองศาสตราจารย์ ดร.จินฉัตร ปะโคทั้ง	นายกสมาคมพัฒนาวิชาชีพการบริหารการศึกษาแห่งประเทศไทย
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สุยะพรหม	นายกสมาคมวิชาการรัฐศาสตร์และรัฐประศาสนศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล บุญลือ	นายกสมาคมเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา (ThaiAECT)
รองศาสตราจารย์ ดร.มหศักดิ์ เกตุฉ่ำ	นายกสมาคม IEEE Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Society
รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย แหวนเพชร	นายกสมาคมนักเทคโนโลยี
อาจารย์ ดร.เทพชัย ทรัพย์นิธิ	นายกสมาคมปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย (AIAT)
รองศาสตราจารย์ ดร.ชูสิทธิ์ ประดับเพ็ชร	อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

คณะกรรมการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลวรรณ วรรณธำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลิศชาย สติยพนาวงศ์
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมอลิน
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญโรตม
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี มหันตรัตน์
อาจารย์จรัสศักดิ์ ชุมวรานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณทิพย์ เนียมถนอม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตารัตน์ เกลี้ยงสะอาด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ยุพิน พวงยะ
อาจารย์นรินทร์ อุ้นแก้ว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกัลยา คงประดิษฐ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บริบูรณ์ ขอบทำดี
รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคิน โชติเวศย์ศิลป์
อาจารย์ ดร.สมเกียรติ แดงเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรภักษ์ แซ่เจี๋ย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ พานสุวรรณ
อาจารย์ ดร.กันยาลักษณ์ โพธิ์ตง
อาจารย์ ดร.สุรินทร์ ศรีสังข์งาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญภา หวังที่ชอบ
นางสาวรพี พูลศิริ
รองศาสตราจารย์ ดร.กานดา เต๊ะขันหมาก
อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ มีสง่า
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรประภา ดีประดิษฐ์
นางลักขณา เตชวงษ์

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัย นวัตกรรมและพัฒนาท้องถิ่น
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
รองอธิการบดีฝ่ายบริหารทรัพยากร
รองอธิการบดีฝ่ายยุทธศาสตร์และแผนงาน
รองอธิการบดีฝ่ายบริหารงานวิชาการ
รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนานักศึกษาและกิจการสภามหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายประกันคุณภาพการศึกษา
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายบริหารงานทั่วไปและกฎหมาย
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการพิเศษ
คณบดีคณะครุศาสตร์
คณบดีคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
คณบดีคณะวิทยาการจัดการ
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
ผู้อำนวยการสำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ
ผู้อำนวยการสถาบันอยุธยาศึกษา
ผู้อำนวยการโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
ผู้อำนวยการกองกลาง
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ผู้อำนวยการสำนักงานอธิการบดี

คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติฝ่ายต่างๆ

ตามคำสั่งมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ที่ 1617/2568
เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8

บรรณาธิการ/กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลวรรณ วรรณธำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลิศชาย สติยพนาวงศ์

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัย นวัตกรรมและพัฒนาท้องถิ่น
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กรรมการและกองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริประภา ดีประดิษฐ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กานดา เต๊ะชั้นหมาก
อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ มีสง่า
นางสาวสุจิตรา งามบุญปลอด
นางสาวสมจิตร์ สอนดา
นางสาวอัจฉรา วงษ์หา
นางวรรณิศา นัยชิต

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
กรรมการ
กรรมการ
กรรมการและเลขานุการ
กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

คณะกรรมการพิชญพิจารณ์ (Peer Review) ในกองบรรณาธิการ (ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน)

มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

รองศาสตราจารย์ ดร.กานดา เต๊ะชั้นหมาก
รองศาสตราจารย์ ดร.พิทยา ใจคำ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลพรรณ รุ่งพรหม
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพล แสนบุญส่ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา สว่างคง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา แก้วกระจ่าย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นงเยาว์ ในอรุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริบูรณ์ ชอบทำดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประดินันท์ เอี่ยมสะอาด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ เนตรสว่าง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุพาภรณ์ วิริยะนานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลิศชาย สถิตย์พนางค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรภรณ์ ตันติพนาทิพย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพงษ์ แ่งใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริประภา ดีประดิษฐ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล สุขญาณกิจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวัชร์ แซ่เจีย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บังอร บุญปิ่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุพิชญา คำคม
ว่าที่ร้อยตรี ดร.คณศ พุกกะพันธุ์
ดร.กันยาลักษณ์ โพธิ์คง
ดร.ธานี ชูกำเนิด
ดร.ปรีชวณี พิบำรุง
ดร.พัชรภกร พูลบุญ
ดร.วิโรจน์ ยอดสวัสดิ์

คณะกรรมการพิชญพิจารณ์ (Peer Review) ในกองบรรณาธิการ (ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก)

รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎดา เสือเอี่ยม
รองศาสตราจารย์ ดร.กาสัก เต๊ะชั้นหมาก
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธิดา ชัยชนะ
รองศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ คณานุรักษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ปณณนุช นิลแสง
รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์
รองศาสตราจารย์ ดร.วารินทร์ แก้วอุไร
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระศักดิ์ ชมภูคำ
รองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูลเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ จัวยทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิจักร์ พุกสวัสดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อัฐพล อินตะเสนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยหัวเฉียว
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.ทิลดิสร์ รุ่งเรืองกิจไกร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ฉันทนารุ่งภักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กั้ววาน ยอดวิเศษศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติมา ไชยสง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยการ ศิริรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐ์ ศิริสวัสดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต หามนตรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถิรพร แสงพิรุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ นนทมาลย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมพงศ์ กุ๊กแก้ว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาวรรณ แพงศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณณรภัส ถกลภักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พอเจตน์ ธรรมศิริขวัญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรา เดชโฮม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งโรจน์ สุขใจมุข
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.वासना บุญส่ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ นิยม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สีบวงศ์ กาพวงค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพิชชา ชีวพฤษ์
ดร.ปิยาภรณ์ พิษณุภรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยบูรพา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิให้ข้อเสนอแนะ ภาคบรรยาย

รองศาสตราจารย์ ดร.เชมณัฐ มิ่งศิริธรรม
รองศาสตราจารย์ ดร.จิราภา วิทยาภิรักษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา มิ่งฉาย
รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์
รองศาสตราจารย์ ดร.สาโรช พูลเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.เอมอร แสนภูวา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมพงศ์ กุ๊กแก้ว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา พยุงสิน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญโรตม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์รณรงค์ จันใด

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิให้ข้อเสนอแนะ ภาคโปสเตอร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม
รองศาสตราจารย์ ดร.สีบวงศ์ กาพวงค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณะ ช่องศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวลิต หามนตรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.ทิลดิสร์ รุ่งเรืองกิจไกร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรณวิภา แพงศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐพงษ์ ประพฤติ

มหาวิทยาลัยศิลปากร
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผลการนำเสนอผลงานวิจัยดีเด่น

ภาคบรรยาย (Best Oral Presentation Award)

ชื่อผลงาน	ผู้นำเสนอ	สังกัด
1. กลุ่มการศึกษา		
ED-157 การพัฒนารูปแบบการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสาน ร่วมกับการเรียนรู้ด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ เพื่อส่งเสริมการ เรียนรู้เชิงรุกและทักษะแห่งอนาคต ในรายวิชาเกษตรอินทรีย์ สำหรับนิสิตระดับปริญญาตรี	ธนกร วังสว่าง สุนนา วังสว่าง	มหาวิทยาลัย ศรีนครินทรวิโรฒ
2. กลุ่มมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์		
HS-137 แนวทางการเพิ่มคุณค่าผลิตภัณฑ์ชุมชนผ่านกิจกรรมการ ท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์: กรณีศึกษาเค้กมะดัน ชุมชนเมืองมะดัน	ปรียา สมพีช ประเสริฐ โยธินาร์ มรกต บุญศิริชัย อัยย์ญดา สิริินจุลพงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนคร
3. กลุ่มวิทยาการจัดการและบริหารธุรกิจ		
MB-160 การยกระดับทักษะเทคโนโลยีนวัตกรรมสำหรับแรงงาน กลุ่มเยาวชนเพื่อส่งเสริมการประกอบอาชีพรองรับอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก	ปรีดาพร อารักษ์สมบูรณ์ ชุตินา นุตยะสกุล วรภัทร เมฆขจร ณัฐพล บัวเปลี่ยนสี นิชชีชญา เกิดช่วย ธีระพงษ์ ทศวัฒน์ ปราริชาติ รื่นพงษ์พันธ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏ ราชนครินทร์
4. กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี		
ST-243 การสร้างเส้นพลาสติกผสมจากพอลิแลคติกแอซิดและ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ผ่านเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายสำหรับ การใช้งานการพิมพ์ 3 มิติ	ธนาภรณ์ วงษ์ธานี สุรพงษ์ เนตรประสม พัชรินทร์ แนมจันทร์ แสงกฤษฎา กลั่นบุศย์ กิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี
ST-268 ผลของอนุภาคโคโตะซานระดับนาโนต่อการเจริญเติบโต ของสมุนไพรวัวบกที่ปลูกในฤดูที่แตกต่างกัน	สถาพร ดียิ่ง กนกทิพย์ บุญยรัตกลิน ศักดิ์ชัย หงษ์ทอง ชาญชัย สุขคุ้ม กฤษณะ ช่องศรี จักรี เหล็กกล้า	มหาวิทยาลัยราชภัฏ ราชนครินทร์

ผลการนำเสนอผลงานวิจัยดีเด่น

ภาคโปสเตอร์ (Best Poster Presentation Award)

ชื่อผลงาน	ผู้นำเสนอ	สังกัด
1. กลุ่มการศึกษา		
ED-170 การพัฒนาบทเรียนท้องถิ่น เรื่อง การผลิตฝ้ายอินทรีย์ย้อมสีธรรมชาติ สำหรับนักเรียนระดับชั้นประถมศึกษา	สรินทร์ คุ่มเขต ชมภูนาฏ ชมภูพันธ์ ปานฤทัย พุทธทองศรี สุภาวดี สำราญ ชัยพลฤกษ์ หงษ์ลัดดาพร กานต์ จันทระ ยุทธศิลป์ ชัยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย
2. กลุ่มวิทยาการจัดการและบริหารธุรกิจ		
MB-252 การค้นหาและออกแบบตราสัญลักษณ์ชุมชนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านเกาะบรเพชร จังหวัดฉะเชิงเทรา	วิชาญ ตอรบรัมย์ จักรกริช ไชยเนตร สินีนารถ เริ่มลาวรรณ บรรพจน์ มีสา	มหาวิทยาลัยราชภัฏ ราชนครินทร์
3. กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี		
ST-262 ระบบแสดงผลและแจ้งเตือนการนับแผ่นเหล็กในโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้การประมวลผลปัญญาประดิษฐ์ที่ขอบเครือข่าย	วิโรจน์ ยอดสวัสดิ์ ธนวัฒน์ สังข์วงศ์ อัศรพล พูลสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏ พระนครศรีอยุธยา

การประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8
(2025 8th EEAAT & ARU CON.)

โดย สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย
วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2568
ณ โรงแรมคลาสสิก คามิโอ ออยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

.....

08.00 – 08.45 น.	ลงทะเบียน
08.45 – 09.00 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการระดับชาติ “กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8
09.00 – 12.00 น.	การบรรยายพิเศษ หัวข้อ “การใช้ AI และการเขียนงานวิจัย : จากผู้ช่วยสู่ผู้ร่วมสร้างที่มีจริยธรรม” โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.พัชรภรณ์ สุดชาภา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและเลขานุการของคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
11.00 – 12.00 น.	นำเสนอผลงานวิจัย แบบบรรยาย (Oral Presentation)
12.00 – 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 – 17.30 น.	นำเสนอผลงานวิจัย แบบโปสเตอร์ (Poster Presentation) แบบบรรยาย (Oral Presentation)



การใช้ AI และการเขียนงานวิจัย : จากผู้ช่วยสู่ผู้ร่วมสร้างที่มีจริยธรรม

รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.พัชราภรณ์ สูดชาภา

กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและเลขานุการ

ของคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ในยุคที่เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มีความก้าวหน้าอย่างก้าวกระโดด บทบาทของ AI ในแวดวงวิชาการได้เปลี่ยนผ่านจากเพียง "เครื่องมือ" (Tool) ในอดีต มาเป็น "ผู้ช่วย" (Co-Pilot) และกำลังก้าวสู่การเป็น "ผู้ร่วมสร้างสรรค์" (Co-Creator) ที่มีศักยภาพสูง เป็นการนำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ Generative AI ในกระบวนการวิจัยอย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นการยกระดับคุณภาพงานวิจัยควบคู่ไปกับการรักษาจริยธรรมทางวิชาการ

1. การเปลี่ยนผ่านบทบาทและเครื่องมือ (Role & Tools Evolution) ภาพรวมของเครื่องมือ AI ในปัจจุบันที่แบ่งตามวัตถุประสงค์การใช้งานอย่างชัดเจน อาทิ กลุ่มผู้ช่วยทั่วไป (General Assistants เช่น ChatGPT, Claude, Gemini, NotebookLM) และกลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านวิชาการ (Academic Specialists เช่น Perplexity, Consensus, SciSpace) เพื่อให้ นักวิจัยเลือกใช้เครื่องมือได้ตรงกับโจทย์วิจัย ไม่ว่าจะเป็นการสืบค้นวรรณกรรม การวิเคราะห์ข้อมูล หรือการเขียนเชิงวิชาการ

2. กรอบแนวคิดและจริยธรรม (Mindset & Ethics) เน้นย้ำหลักการสำคัญ "Trust, but Verify" คือการเชื่อถือแต่ต้องตรวจสอบเสมอ เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากข้อจำกัดของ AI เช่น การที่ AI สร้างข้อมูลหรือเนื้อหาที่ไม่ถูกต้อง ไม่เป็นความจริง หรือไม่สมเหตุสมผล โดยมั่นใจว่าผลลัพธ์ที่สร้างขึ้นมานั้นถูกต้อง (Hallucination) ข้อมูลที่ไม่เป็นปัจจุบัน (Knowledge Cutoff) และอคติ (Bias) รวมถึงข้อควรระวังสูงสุดด้านความเป็นส่วนตัว (Data Privacy) โดยห้ามนำข้อมูลส่วนบุคคลหรือความลับทางการค้าเข้าสู่ระบบ AI สาธารณะ

3. กลยุทธ์วิศวกรรมคำสั่ง (Prompt Engineering Strategy) กลยุทธ์ในการใช้ข้อความหรือคำสั่งเพื่อกระตุ้นให้ระบบ AI สร้างผลลัพธ์ตามที่ต้องการ ถ่ายทอดเทคนิคการสั่งงาน AI ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผ่านโครงสร้างคำสั่งที่ดี (Role, Task, Context, Constraints) และเทคนิคขั้นสูงอย่าง Few-Shot Prompting (การยกตัวอย่าง) และ Chain of Thought (การคิดเป็นลำดับขั้น) เพื่อให้ AI สามารถช่วยงานวิจัยที่ซับซ้อนได้แม่นยำยิ่งขึ้น

4. การประยุกต์ใช้ในกระบวนการวิจัย (Application in Research Process) แสดงให้เห็นถึงการนำ AI มาใช้ในทุกขั้นตอนของการวิจัย ตั้งแต่การระดมสมองหาหัวข้อ (Brainstorming), การทบทวนวรรณกรรมและหาช่องว่างของงานวิจัย (Literature Review & Gaps), การออกแบบระเบียบวิธีวิจัยและเครื่องมือ (Methodology & Instruments), ไปจนถึงการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ (Data Analysis)

ความสามารถในการใช้ AI (AI Literacy) กำลังกลายเป็นทักษะจำเป็นสำหรับนักวิจัยยุคใหม่ ความสำเร็จไม่ใช่การให้ AI ทำงานแทนทั้งหมด แต่เป็นการทำงานร่วมกัน (Human-AI Collaboration) โดยมนุษย์ยังคงเป็นผู้กำกับดูแล รับผิดชอบ และตรวจสอบความถูกต้อง เพื่อให้ผลงานวิจัยที่ได้มีความถูกต้อง แม่นยำ และทรงคุณค่าทางวิชาการสูงสุด

สารบัญ
บทความวิจัยภาคบรรยาย

ลำดับที่	รหัสบทความ	กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (ST)	หน้า
1	ST-141	การพัฒนามาตรวัดความจุไฟฟ้าแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า <i>พิเชฐ ศรีสังข์งาม วรากร ภูขาว วีรภัทร เรืองเกษม และควิน แซ่เรือ</i>	259
2	ST-142	การพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญออนไลน์สำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ <i>นนิดา สร้อยดอกสน สิริธร จิยาศักดิ์ อีทัช โกศลบุญมี วีรภัทร บุญเจริญบัวทอง และณัฐวุฒิ นาเวช</i>	265
3	ST-164	เกมระบายสี 2 สี บนกราฟของทรงหลายหน้าปกติ และกึ่งปกติบางประเภท <i>บุญฤทธิ์ บุญอิม และ บวร คูหิรัญ</i>	277
4	ST-188	คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทดสอบประตู หน้าต่าง และผนังกระจก ตามมาตรฐานมอก. และ ASTM <i>ชนมน จันทนา วัชมา โพธิ์ทอง และศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล</i>	289
5	ST-194	ชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน <i>จิรพงศ์ จีบกล้า กษิตศ ด้วงบาง ประดิษฐ์ ฉายแสง และจักรกฤษณ์ เคลือบวัง</i>	301
6	ST-207	การพัฒนาเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ <i>ธีรพันธ์ สุดสถาน อนุสรณ์ สิ้นสะอาด นัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์ และอาศิรา สนธิธรรม</i>	311
7	ST-226	การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน <i>ปุณยนุช ลักษณะ และ ธณภณ อารังคุณานัน</i>	321
8	ST-230	การพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ <i>มณียา อุทรักษ์ สิริวิมล ลิตะเสน แมรีเกรซ เฮอแนนเดซ เมทีนี แปงแก้ว ครรชิต นุชเวช และสุธีรา พิงสวัสดิ์</i>	332

สารบัญ
บทความวิจัยภาคบรรยาย

ลำดับที่	รหัสบทความ	กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (ST)	หน้า
9	ST-237	การพัฒนาแซทเทลต์แบบเพื่อแนะนำการบริหารร่างกายด้วยท่าอาชีดัดตน <i>ศรัณยู ทาคายามะ พิมพ์พลัส ดาวหาร ญัฐธนิชา สิริสุนทร วรรณช มีภูมิรู้ เปรมรัตน์ พูลสวัสดิ์ ยุวธิดา ชิวปรีชา และสุธีรา พึ่งสวัสดิ์</i>	342
10	ST-240	การเปรียบเทียบโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขีรถยนต์ด้วยมีเดียไปป์เฟรมเวิร์ก <i>ภัทรภรณ์ ไชยยาว พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์ มุhammad เต๊ะยอ และชลธิศา รัตน์ชู</i>	354
11	ST-242	การเปรียบเทียบการสกัดเคอร์คูมินจากมันชันด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน <i>ธนาภรณ์ วงษ์ธานี ญัฐมน เทวรังษี พชรินทร์ แนมจันทร์ เกรียงไกร วันทอง และกิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์</i>	366
12	ST-243	การสร้างเส้นพลาสติกผสมจากพอลิแลคติกแอซิดและไฮดรอกซีอะพาไทต์ผ่านเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายสำหรับการใช้งานการพิมพ์ 3 มิติ <i>ธนาภรณ์ วงษ์ธานี สุรพงษ์ เนตรประสม พชรินทร์ แนมจันทร์ แสงกฤษ กลั่นบุศย์ และกิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์</i>	379
13	ST-244	การสังเคราะห์แผ่นยางพาราคอมโพสิตด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยใช้กรดและศึกษาผลของการเติมวัสดุเติมแต่ง <i>สมญา ทันสมัย สุรพัศ พันธสำโรง พชรินทร์ แนมจันทร์ แสงกฤษ กลั่นบุศย์ และกิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์</i>	391
14	ST-249	การประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยชุมชนในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา <i>สุรีย์พร ธรรมิกพงษ์ ภัทรพร คุณาพงษ์กิติ จงภร มหาดเล็ก จักรกริช ไชยเนตร ญัฐพร สนั่นเือก และผุสดี ภูมรา</i>	402
15	ST-261	การเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในการทำนายการจัดส่งสินค้าตรงเวลา <i>นัฐธิดา เงินประเสริฐ ไชยวัฒน์ ศรีแสง และชนิดา แก้วเพชร</i>	412

สารบัญ
บทความวิจัยภาคบรรยาย

ลำดับที่	รหัสบทความ	กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (ST)	หน้า
16	ST-263	การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของงานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ สุวัจนรัตน์ จารุจารีตร์ ทรงกฤต ตรีรัตน์พิจารณ์ วรานนท์ คงสง และชัยวัฒน์ ภูวกรกุลชัย	422
17	ST-265	การพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ จิรศักดิ์ ชุมวรานนท์ ณัฐนิชา สารณะพันธ์ และสาโรช ปุริสังคหะ	430
18	ST-269	วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอเดรเจอร์ โหมดกระแส ที่ปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ CCCCTAs สุทธิพงษ์ พุ่งเดช	440
19	ST-270	การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว ปิยะ มัชฌมัตติ อาภัสรา ยอดนุ่น จิรเมธ ปัตะเวสลัง อาศิรา สนธิธรรม กฤษณะ ยอดนิล อำนาจ ประจง อนุสรณ์ สิ้นสะอาด และณัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์	448
20	ST-271	การพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ณัฐภัสสร พูลสวัสดิ์ เผด็จ เปียทงค์ ภูริพัฒน์ อินทใจดี อาศิรา สนธิธรรม กฤษณะ ยอดนิล อำนาจ ประจง อนุสรณ์ สิ้นสะอาด และณัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์	460
21	ST-272	การพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด ปรัชญ์ ใจกว้าง กิตติศักดิ์ วาดสันทด ชุมพล ปทุมมาเกษร และศิริวรรณ พลเศษ	472

2025 8th EEAAT & ARU CON

PROCEEDINGS

รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ
“กรุงเก่าวิจัย” ครั้งที่ 8
(2025 8th EEAAT & ARU CON.)

โดย สมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)
ร่วมกับมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
และภาคีเครือข่ายสถาบันอุดมศึกษาไทย

บทความวิจัย

ภาคบรรยาย
(Oral Presentation)

กลุ่มวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี
และนวัตกรรม (ST)

18 ธันวาคม พ.ศ. 2568

ณ โรงแรมคลาสสิค คามีโอ อโยธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การพัฒนามาตรวัดความจุไฟฟ้าแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า

A Low-Cost Digital Capacitance Meter for Electrical Engineering Laboratory

พิเชฐ ศรีสังข์งาม^{1*} วรกร ภูขาว¹ วีรภัทร เรืองเกษา¹ คาวิน แซ่เรือง¹

Pichet Srisnagngam^{1*} Warakon Phukhao¹ Weerapat Reangkesa¹ Kawin Sae-rueng¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology,

Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University

*Email : spichet@aru.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนามาตรวัดความจุไฟฟ้าแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า โดยใช้แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดุยโน (Arduino Uno) เป็นตัววัดค่าคงที่เวลา (Time constant) ที่ใช้ในการประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ เพื่อนำค่าคงที่เวลานี้ มาใช้ในการคำนวณหาความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ผลการวิจัยที่ได้จากการนำตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน จำนวน 10 ตัว มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 0.47-4700 ไมโครฟารัดมาทำการทดสอบ โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าแต่ละตัวด้วยมาตรวัดที่พัฒนาขึ้น แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้ามาตรฐาน พบว่ามาตรวัดความจุไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 3.48 เมื่อเทียบกับมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้ามาตรฐาน MICROTTEST 6364

คำสำคัญ: มาตรวัด, ความจุ, ประหยัด

Abstract

This research presents the development of a low-cost digital capacitance meter for electrical engineering laboratories, using an Arduino Uno microcontroller board as the measuring device for the time constant during capacitor charging and discharging. This time constant is then utilized to calculate the capacitance value of the capacitor. The study tested 10 different capacitors with capacitance values ranging from 0.47 μF to 4700 μF . The capacitance of each capacitor was measured using the developed meter, and the obtained values were compared with those from a standard reference capacitance meter (MICROTTEST 6364) to determine the percentage error. The results indicate that the developed capacitance meter has an average error of 3.48% compared to the standard reference meter.

Keywords: Meter, Capacitance, Low-cost

1. บทนำ

การฝึกปฏิบัติทางวิศวกรรมไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการเป็นสิ่งที่ยังจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า เพราะนอกจากจะเป็นการเชื่อมโยงทฤษฎีสู่การปฏิบัติในโลกแห่งความเป็นจริงแล้ว นักศึกษายังจะได้ฝึกปฏิบัติ เพื่อพัฒนาทักษะทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอีกด้วย ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานแบบพาสซีฟที่ค่าความจุไฟฟ้ามีหน่วยเป็นฟารัด [1-2] ค่าความจุไฟฟ้าบ่งบอกถึงความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ อย่างไรก็ตาม ค่าที่แสดงบนตัวเก็บประจุมักจะคลาดเคลื่อนจากค่าจริง เนื่องจากตัวเก็บประจุมีช่วงความคลาดเคลื่อน ซึ่งแน่นอนว่าสิ่งนี้มีอิทธิพลอย่างมากต่อการวัดและประสิทธิภาพของวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตัวเก็บประจุ นอกจากนี้มาตรวัดหลายหน้าที่หรือมัลติมิเตอร์ (Multimeter) ที่เป็นมาตรวัดทางไฟฟ้าพื้นฐานในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ส่วนมากยังไม่สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ ส่วนมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้าแบบดิจิทัล (Digital capacitance meter) ก็มีราคาแพง ทำให้ผู้สอนต้องจำกัดอยู่เพียงการสาธิตให้ผู้เรียนดู ผู้เรียนจึงเป็นเพียงผู้มีส่วนร่วมเฉย ๆ (Passive participants) เท่านั้น [3] ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนามาตรวัดความจุแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าขึ้น

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

- 2.1 เพื่อออกแบบและพัฒนามาตรวัดความจุแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า
- 2.2 เพื่อหาประสิทธิภาพของมาตรวัดความจุแบบดิจิทัลราคาประหยัดสำหรับห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบและการสร้างมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้าราคาประหยัด

การวิจัยครั้งนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ดังนี้

3.1 การหาค่าความจุไฟฟ้าจากค่าคงที่เวลา (Time constant) การประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรที่มีตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (RC series circuit) ตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor) จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของตัวเก็บประจุ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลา (Time Constant) หรือค่า " τ " ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ ดังสมการ

$$\tau = RC$$

ส่วนแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า เมื่อเกิดการคายประจุ เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$v_c(t) = v_c(0) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}, t \geq 0$$

เมื่อ $V_c(0)$ คือ แรงดันเริ่มต้นของตัวเก็บประจุ เมื่อเวลา $t=0$ ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{v_c(t)}{v_c(0)} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขว่า ถ้าให้เวลาผ่านไปจน $t = t_d$ ซึ่งเป็นเวลาที่ตัวเก็บประจุใช้ในการคายประจุไฟฟ้า จนแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นครึ่งของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น จะหาค่าเวลา t_d ได้ดังนี้

$$1/2 = e^{-\frac{t_d}{RC}}$$

$$\ln(1/2) = -t_d/RC$$

$$-0.6931472 = -t_d/RC$$

$$t_d = 0.6931472 \cdot RC$$

ดังนั้น ถ้าสามารถวัดเวลาตั้งแต่เริ่มคายประจุไฟฟ้าจนแรงดันไฟฟ้าลดลงเป็นครึ่งหนึ่งได้ และทราบค่าความต้านทานก็จะสามารถหาความจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ ดังสมการ

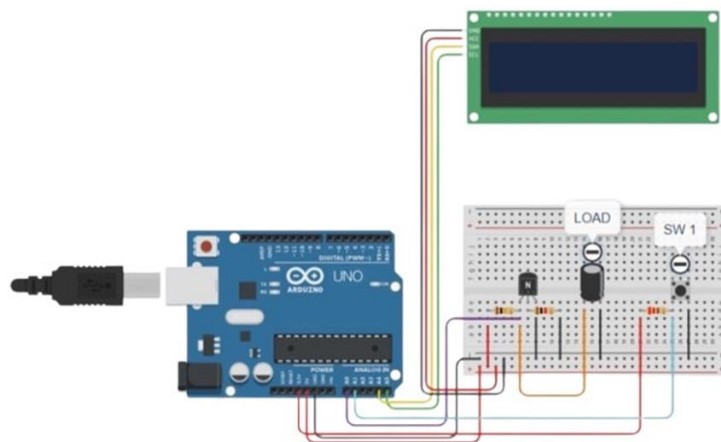
$$C = \frac{t_d}{0.6931472 \cdot R}$$

เมื่อ C เป็นค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นไมโครฟารัด

t_d เป็นเวลามีหน่วยเป็นไมโครวินาที

3.2 การออกแบบมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้าและการจำลองการทำงานของมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า

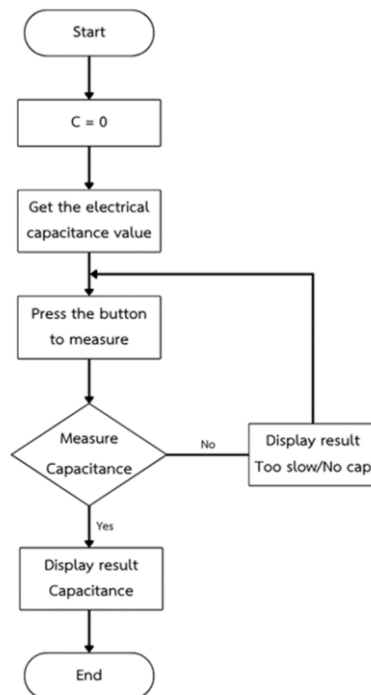
จากทฤษฎีที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 3.1 ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและจำลอง (Simulate) การวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยแผงวงจรอาร์ดยูโนบนแพลตฟอร์ม TinkerCad [4] แสดงดังภาพที่ 1 จากภาพจะเห็นว่า ระบบหรือมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้าประกอบด้วยแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดยูโน จอแสดงภาพแบบผลึกเหลวหรือจอแอลซีดี ตัวต้านทานจำนวน 3 ตัว มีค่า 100 กิโลโอห์ม 10 กิโลโอห์ม และ 220 โอห์ม ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN สวิตช์ และตัวเก็บประจุที่ต้องการวัดค่าความจุไฟฟ้า



ภาพที่ 1 การจำลองการวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดยูโน

ในส่วนของโปรแกรมนั้น มีขั้นตอนวิธี (Algorithm) ของโปรแกรม ดังผังงาน (Flowchart) ที่แสดงในภาพที่ 2 โดยเริ่มต้นจะทำการคายประจุ โดยการสั่งให้ทรานซิสเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทำงาน (Turn on) กระแสจะไหลออกจากคาปาซิเตอร์ผ่านทรานซิสเตอร์ลงกราวด์ จากนั้นทำการตรวจสอบว่าสวิตช์ SW1 ถูกกดใช้หรือไม่ ถ้าไม่ใช้หน้าจอลซีดีจะแสดงข้อความให้ผู้กดสวิตช์ ถ้าใช้หน้าจอลซีดีจะแสดงข้อความให้ผู้ทราบค่า มาตรวัดกำลังทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการคายประจุซ้ำอีกครั้ง จากนั้นจะเริ่มจับเวลาการประจุจนกว่าแรงดันจะถึงร้อยละ 63.2 ของแรงดันแหล่งจ่าย (Vcc) ซึ่งมีค่าที่ได้จากการแปลงค่าแอนะล็อกเป็นดิจิทัลประมาณ 648 จาก 1023 ในระหว่างนี้จะทำการตรวจสอบเวลาด้วยว่านานกว่า 3 วินาทีหรือไม่ ถ้าใช่มาตรวัดจะแสดงข้อความให้ผู้ทราบค่า เวลานานเกินไปหรือไม่

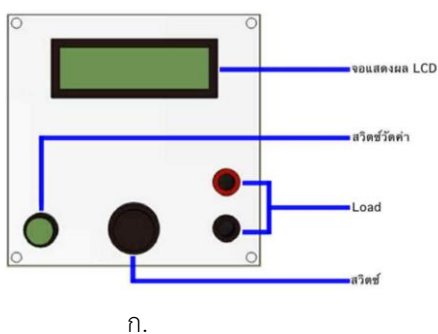
ต่อคาปาซิเตอร์แล้วออกจากอุปกรณ์จับเวลา ถ้าไม่ใช่จะนำเวลาในการประจุที่วัดได้ไปทำการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้า โดยการนำเวลาที่ใช้ในการประจุหารด้วยค่าความต้านทาน แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ไปแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดี



ภาพที่ 2 ผังงานของโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า

3.3 การพัฒนามาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า

เมื่อออกแบบมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า และจำลองการทำงานของมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า จนได้ผลการจำลองเป็นไปตามทฤษฎีแล้ว ผู้วิจัยจะทำการออกแบบบรรจุภัณฑ์เครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรม Sketch Up โดยบรรจุภัณฑ์มีขนาดกว้าง 6 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว และสูง 3 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 3 ก. จากนั้นนำไปสร้างจริง และนำอุปกรณ์ทั้งหมดติดตั้งในบรรจุภัณฑ์เครื่องต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 3 ข. และ ค. ตามลำดับ



ภาพที่ 3 การออกแบบบรรจุภัณฑ์และการสร้างมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เมื่อสร้างมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบจริง โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ที่มีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกัน จำนวน 10 ตัว มีค่าความจุไฟฟ้าตั้งแต่ 0.47 – 4700 ไมโครฟารัด แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากมาตรวัดค่าความจุไฟฟ้า Microtest 6364 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบมาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้าไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับมาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้าไฟฟ้า Microtest 6364

ครั้งที่	ค่าความจุไฟฟ้า ของตัวเก็บประจุ ไฟฟ้า (μF)	ค่าความจุไฟฟ้าไฟฟ้าจาก มาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้า ไฟฟ้า Microtest 6364 (μF)	ค่าความจุไฟฟ้าไฟฟ้า จาก มาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้า ที่พัฒนา (μF)	ค่าความคลาดเคลื่อนของ มาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้า ที่พัฒนา (%)
1.	0.47	0.48	0.47	2.08
2.	2.2	2.18	2.12	2.75
3.	4.7	4.6	4.47	2.83
4.	10	10.1	9.78	3.17
5.	22	22.1	21.37	3.30
6.	33	33.75	32.58	3.47
7.	47	46.06	44.42	3.56
8.	100	101.7	97.67	3.96
9.	1000	1010	968.42	4.12
10.	4700	4750	4485.45	5.57
ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย				3.48

จากตารางที่ 1 จะพบว่าตัวเก็บประจุขนาด 0.47 ไมโครฟารัดมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 2.08 และตัวเก็บประจุขนาด 4,700 ไมโครฟารัดมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ ร้อยละ 5.57 โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของมาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีค่าร้อยละ 3.48 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายิ่งค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนก็จะยิ่งมากขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีผลมาจากความคลาดเคลื่อนในการวัดเวลาในการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ แนวทางในการแก้ไข คือ ต้องออกแบบมาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้าให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ เพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุ (Charge) ที่เหมาะสม และวัดค่าความจุไฟฟ้าหลาย ๆ ค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยความจุไฟฟ้า ซึ่งอาจใช้เทคนิคทางสถิติ เช่น การถดถอยพหุนาม ร่วมด้วยก็น่าจะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงได้

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบ จำลองการทำงาน และสร้างมาตรฐานวัดค่าความจุไฟฟ้าราคาประหยัด โดยใช้แผงวงจรอาร์ดุยโนทำการคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าด้วยการจับเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุและคายประจุ จากนั้นจะนำเวลาที่ได้ไปหารด้วยค่าความต้านทานที่ทราบค่า ผลการวิจัยพบว่ามาตรฐานวัดที่พัฒนาขึ้น มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการวัดค่าความจุไฟฟ้าร้อยละ 3.48 โดยค่าความคลาดเคลื่อนแปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hardiyanto, D., Endramawan, P., Nur Taufiqul M., R., & Anggun S., D. “Arduino implementation for development digital capacitance meters as laboratory measurement devices.” Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika, 6(3), 2022, pp.784-790, <https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i3.11456>
- [2] Sachin Satheesh, Prasad T, Unais V M, Smitha Paulose. “Microcontroller Based LCR Meter” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3(6), 2016, pp.1790-1792. [Http://www.irjet.net](http://www.irjet.net)

- [3] Sanket Sanjay Patil, Rohit Yuvaraj Madigar, Prashant Jaywant Koli, Vishal Shridhar Wadkar. “Design of LC Meter Using Arduino” Journal of Instrumentation and Innovation Sciences, 4(1), 2019, pp. 1-4, <http://doi.org/10.5281/zenodo.2598878>
- [4] Autodesk. (30 กรกฎาคม 2568). Tinkercad. สืบค้นจาก <https://www.tinkercad.com/dashboard/designs/circuits>.

การพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญออนไลน์สำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหาร กิจการ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

Development of an Online Expert Appointment Booking System for the School of Entrepreneurship and Management, Bangkok University

ณินดา สร้อยดอกสน^{1*} สิริธร จิยาตักดิ์² ธีทัช โกศลบุญมี³ วีรภัทร บุญเจริญบัวทอง⁴
และ ณัฐวุฒิ นาเวช⁵

^{1*}สาขาวิชาการเป็นเจ้าของธุรกิจ คณะการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

^{2,3,4,5}สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

^{1*}nanida.u@bu.ac.th; ²sirinthorn.c@bu.ac.th; ³theethat.koso@bumail.net; ⁴werapat.boon@bumail.net; ⁵natthawut.nawe@bumail.net

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญออนไลน์สำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ และศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ ระบบแบ่งกลุ่มผู้ใช้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผู้ใช้งานระบบ สามารถเข้าสู่ระบบ ค้นหาผู้เชี่ยวชาญ นัดหมายผู้เชี่ยวชาญ ประเมินผู้เชี่ยวชาญ และได้รับการแจ้งเตือนการนัดหมายผ่านอีเมล และส่วนผู้ดูแลระบบ สามารถเข้าสู่ระบบ จัดการบัญชีผู้ใช้ จัดการข้อมูลผู้เชี่ยวชาญ จัดการเวลานัดหมายผู้เชี่ยวชาญ ค้นหาผู้เชี่ยวชาญ ดูข้อมูลการนัดหมายทั้งหมดของผู้เชี่ยวชาญ ดูข้อมูลผลประเมินผู้เชี่ยวชาญ และการแจ้งเตือนการยกเลิกการนัดหมายผ่านอีเมล ระบบถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมภาษา HTML, CSS, JavaScript, PHP จัดการฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม MySQL ใช้เทคนิค Responsive เพื่อให้รองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์หลากหลายขนาด และออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ใช้งาน (UI/UX) ด้วยโปรแกรม Figma ระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ได้ทำแบบประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานทั้งหมด 32 คน พบว่า ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งานระบบและความถูกต้อง ($\bar{x} = 4.73$) และระดับความพึงพอใจด้านการออกแบบและความสวยงาม ($\bar{x} = 4.43$) การวิจัยนี้ถูกนำไปใช้จริง เกิดประโยชน์ต่ออาจารย์และนักศึกษาของคณะ ในการบริหารจัดการจองนัดผู้เชี่ยวชาญให้กับนักศึกษาได้สะดวกมากขึ้น จองผ่านระบบออนไลน์ได้ทุกที่ทุกเวลา และข้อมูลมีความถูกต้อง

คำสำคัญ: ระบบจองนัดออนไลน์ การจัดการนัดหมายผู้เชี่ยวชาญ การพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชัน

Abstract

The objectives of this research were to develop an Online Appointment Booking System for Experts: A Case of the School of Entrepreneurship and Management, Bangkok University, and to assess user satisfaction with the system. The system was designed to accommodate two user types: general users and administrators. General users can log in, search for experts, schedule appointments, evaluate those experts, and receive appointment notifications via email. In contrast, administrators can log in, manage user accounts and expert information, arrange appointment schedules, search for experts, review all expert appointments and evaluation results, and receive cancellation notifications through email. The system was developed using HTML, CSS, JavaScript, PHP, and MySQL for database management. Utilizing responsive techniques to ensure that the application can display properly on

various device screen sizes. The user interface and user experience (UI/UX) were designed using Figma to ensure both usability and a modern design. A user satisfaction survey was conducted with 32 participants. The results revealed that users rated their satisfaction with system functionality and accuracy at the highest level ($\bar{x} = 4.73$), while the satisfaction with the interface design and aesthetics was rated as good ($\bar{x} = 4.43$). The system has been practically implemented and has provided tangible benefits to both lecturers and students by improving the efficiency of managing expert appointments. It enables students to conveniently make appointments anytime and anywhere through the online platform, while ensuring accuracy and reliability of the information.

Keywords: Online Appointment Booking System, Expert Appointment Management, Web Application Development

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันเทคโนโลยีดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของผู้คนมากขึ้น ผู้คนนิยมใช้เทคโนโลยีดิจิทัลทั้งในการติดต่อสื่อสาร การทำงาน การเรียนรู้ และการใช้บริการต่างๆ รวมไปถึงการจองคิว การนัดหมาย หรือการทำนัด ซึ่งมีความสำคัญมากกับทุกคนและทุกอาชีพ ในการนัดหมายแต่ละครั้งหากบุคคลที่เราต้องการพบเป็นบุคคลสำคัญ เช่น อาจารย์ แพทย์ ผู้เชี่ยวชาญ หรือผู้มีชื่อเสียง จำเป็นต้องมีการนัดจองล่วงหน้าเพื่อให้เรามั่นใจว่าเราสามารถพบบุคคลเหล่านั้นได้อย่างแน่นอน และสามารถไปตามวัน เวลา นัดหมายได้ถูกต้อง

คณะกรรมการเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการมหาวิทยาลัยกรุงเทพ มีกิจกรรมให้คำปรึกษาธุรกิจ โดยมีผู้เชี่ยวชาญจากภายนอกเข้ามาให้คำปรึกษากับนักศึกษา โดยนักศึกษาจะต้องทำการจองนัดหมายผู้เชี่ยวชาญล่วงหน้า ปัจจุบันใช้การจองคิวผ่านกระดาษในรูปแบบออฟไลน์ หรือ Google sheet ในรูปแบบออนไลน์ ซึ่งปัญหาของรูปแบบออฟไลน์คือ สั้นเปลืองทรัพยากรด้านกระดาษ เวลา และค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ปัญหารูปแบบออนไลน์คือ นักศึกษาที่เข้าไปจองคิวผู้เชี่ยวชาญจะมีสิทธิ์ในการแก้ไขข้อมูลการจอง ทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดและสับสนในบางครั้ง ข้อมูลในรูปแบบออฟไลน์และรูปแบบออนไลน์ไม่ตรงกัน

คณะผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การพัฒนาระบบแจ้งเตือนกิจกรรมและการนัดหมายอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยประยุกต์ใช้ Google Application และ Line Notification สามารถส่งการแจ้งเตือนอัตโนมัติไปยังผู้ใช้งาน ผ่านแอปพลิเคชันไลน์บนโทรศัพท์มือถือเมื่อถึงเวลาที่นัดหมายไว้ได้อย่างถูกต้อง มีการแจ้งสรุปรายการกิจกรรมหรือการนัดหมายในแต่ละวันให้รับทราบล่วงหน้า ช่วยเตือนความจำและทำให้สามารถเข้าร่วมกิจกรรมได้มากขึ้น ในส่วนของข้อมูลกิจกรรมที่บันทึกไว้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนการจัดกิจกรรมล่วงหน้า และสร้างรายงานสรุปกิจกรรมในแต่ละปี เพื่อแสดงผลการจัดกิจกรรมที่สอดคล้องกับตัวชี้วัดตามพันธกิจของหน่วยงานที่ดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว [1] การพัฒนาระบบจองคิวออนไลน์สำหรับการเข้ารับบริการดูแลรักษารถยนต์ ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับลูกค้าให้สามารถเรียกดูข้อมูลการให้บริการต่างๆ รวมถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น และทำการจองคิวการรับบริการผ่านระบบได้ด้วยตนเอง นอกจากนี้ยังทำให้ร้านค้าสามารถบันทึกข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกรายงานสรุปต่างๆ รวมถึงทำการวิเคราะห์ต่าง ๆ ต่อไปได้ในอนาคตได้สะดวกและรวดเร็ว [2] การพัฒนาต้นแบบแอปพลิเคชันการจัดการคิวสำหรับห้องตรวจผู้ป่วยนอก เป็นแอปพลิเคชันต้นแบบช่วยให้การจัดการคิวในห้องตรวจผู้ป่วยนอก โดยผู้รับบริการสามารถลงทะเบียนรับคิวผ่านเว็บไซต์ พร้อม QR code และติดตามสถานะคิวแบบเรียลไทม์ รวมถึงได้รับการแจ้งเตือนผ่าน LINE หรือ SMS ได้ ช่วยลดความแออัดของการรอคอย แต่ระบบยังไม่สามารถให้ผู้รับบริการสามารถจองคิวได้ด้วยตนเอง และเลือกเวลาเข้ารับบริการตามที่ต้องการได้ [3] งานวิจัยเรื่อง The Design of Online Expert System as an Alternative Guidance with the Academic Advisory Lecturer of University Students of State University of Malang งานวิจัยนี้เกิดจากปัญหาที่นักศึกษาของ State University of Malang ไม่สามารถปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาได้เต็มที่ เนื่องจากมีเวลาและสถานที่จำกัด ผู้วิจัยจึงเสนอแนวทางพัฒนาระบบผู้เชี่ยวชาญออนไลน์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้นักศึกษาสามารถใช้นัดหมายการให้คำปรึกษากับอาจารย์ที่ปรึกษา และเป็น

เครื่องมือช่วยในการจัดการคำถามด้านการเรียนการสอน แต่ระบบอยู่ในขั้นตอนการออกแบบเท่านั้น ยังไม่ได้ถูกพัฒนาและทดลองใช้งานจริง [4] งานวิจัยเรื่อง Online Appointment Booking and Patient Management System เป็นระบบออนไลน์สำหรับการจองนัดหมายแพทย์และจัดการผู้ป่วย โดยมีจุดประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาในระบบเดิมของโรงพยาบาลหรือคลินิกที่มักใช้วิธีแบบทำด้วยมือ ได้แก่ เวลารอคอยนาน ข้อมูลผู้ป่วยไม่ครบถ้วน การบันทึกข้อมูลที่ไม่เป็นระบบ การจองซ้ำ หรือไม่มีการแจ้งเตือนนัด ระบบสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้ แต่ในงานวิจัยยังไม่ได้ระบุว่านำไปใช้งานจริงต่อเนื่อง [5]

นอกจากนี้ การพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญออนไลน์มีประสิทธิภาพการให้บริการ ความสำเร็จของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับด้านเทคนิคเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับ “ระดับการยอมรับของผู้ใช้” ซึ่งเป็นตัวกำหนดการใช้งานจริงในระยะยาว ทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) ที่พัฒนาโดย Davis (1989) [6] เป็นกรอบแนวคิดสำคัญที่ใช้อธิบายพฤติกรรมผู้ใช้ในการยอมรับเทคโนโลยี โดยระบุว่า การยอมรับระบบเกิดจากการรับรู้ประโยชน์ในการใช้งาน (Perceived Usefulness) และการรับรู้ความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) ซึ่งส่งผลต่อทัศนคติและความตั้งใจใช้ระบบ TAM จึงเป็นทฤษฎีที่สามารถนำมาใช้ประเมินว่าผู้ใช้จะยอมรับหรือใช้งานระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญหรือไม่ รวมถึงช่วยระบุปัจจัยที่ต้องพัฒนาหรือปรับปรุงเพื่อให้ระบบตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ได้ดียิ่งขึ้น ช่วยให้ผู้ใช้เข้าใจพฤติกรรมและความคาดหวังของผู้ใช้ สามารถออกแบบระบบให้ใช้งานง่าย มีประโยชน์ชัดเจน และส่งเสริมการยอมรับระบบในระดับองค์กร นำไปสู่การใช้งานจริงอย่างยั่งยืนและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด และคณะผู้วิจัยยังได้ศึกษางานวิจัย พบว่าทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) ถูกนำไปใช้ในงานวิจัย ได้แก่ งานวิจัยเรื่อง An Implementation and Evaluation of Web-Based Appointment System for the Mindanao State University – Main Campus ใช้ TAM ประเมินระบบจองนัดผ่านเว็บของสำนักงานอธิการบดี [7] งานวิจัยเรื่อง Blood donors' usage intentions of donation appointment-scheduling systems during the COVID-19 pandemic and beyond ได้พัฒนากรอบแนวคิดเพื่ออธิบายความตั้งใจใช้ระบบนัดหมายบริจาคโลหิต โดยอาศัยโครงสร้างจาก TAM [8] และงานวิจัยเรื่อง Patient Satisfaction with the Mawiidi Hospital Appointment System ได้ศึกษาความพึงพอใจต่อระบบจองนัดโรงพยาบาล โดยใช้กรอบคิดจาก TAM และการยอมรับเทคโนโลยีด้านสุขภาพ [9]

จากที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยได้คิดพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ เพื่อการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ ลดปริมาณกระดาษ และการสนับสนุนการใช้เทคโนโลยีที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ สามารถจองนัดหมายผู้เชี่ยวชาญล่วงหน้าได้ มั่นใจว่าสามารถพบผู้เชี่ยวชาญได้ตามวัน เวลา นัดหมายได้ถูกต้อง และได้ทดลองใช้กับนักศึกษาของคณะการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ ซึ่งเป็นผู้ใช้งานจริงและทำแบบประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์
2. เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ สามารถรองรับการเข้าใช้บริการทั้งบนคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือ โดยมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้

ส่วนของผู้ใช้งานระบบ

1. ฟังก์ชันการเข้าสู่ระบบ
2. ฟังก์ชันค้นหา
3. ฟังก์ชันการจัดการนัดหมายผู้เชี่ยวชาญ
4. ฟังก์ชันประเมินผู้เชี่ยวชาญ
5. ฟังก์ชันการแจ้งเตือนการนัดหมายผ่านอีเมลหัวหน้ากลุ่ม

ส่วนของผู้ดูแลระบบ

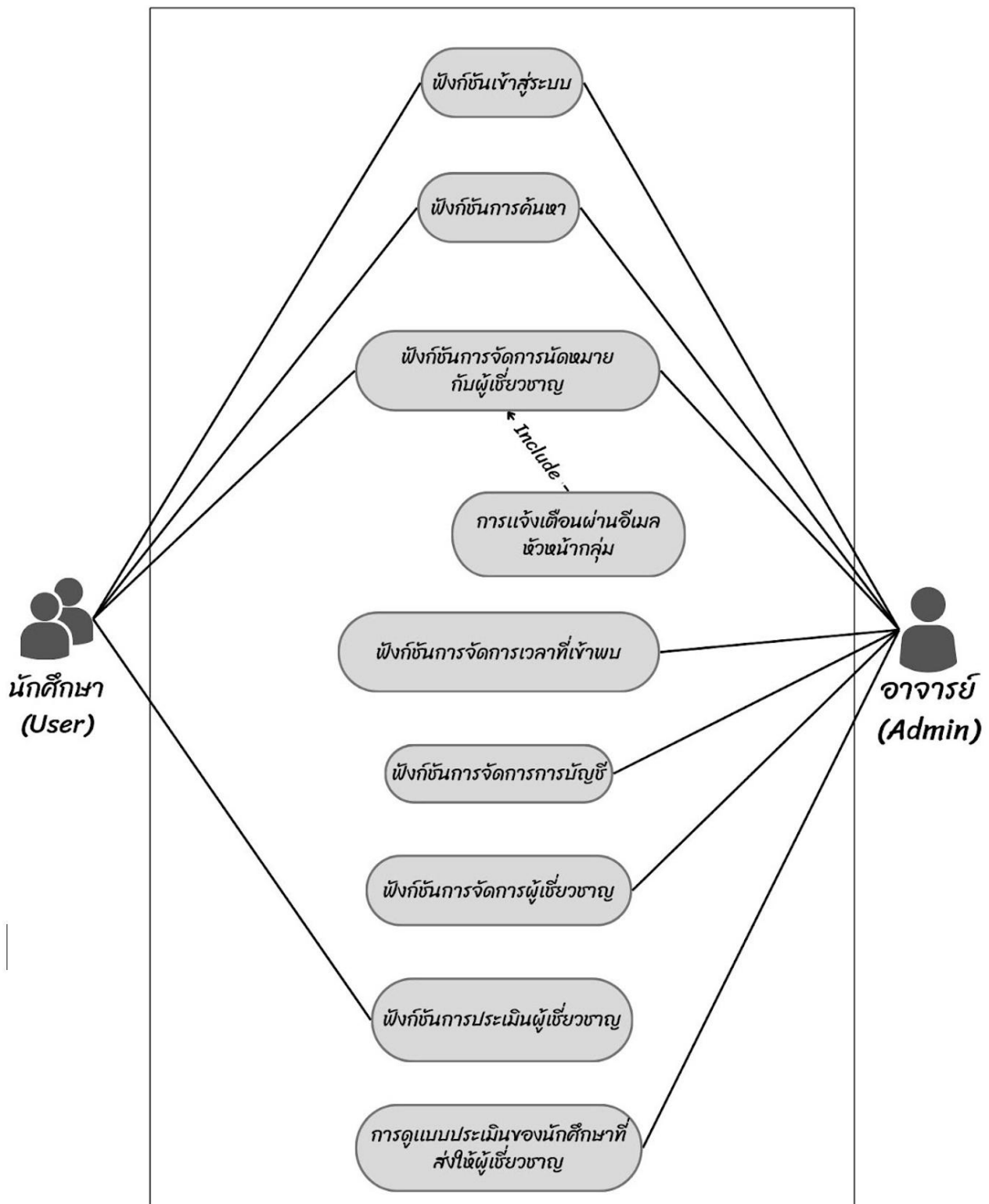
1. ฟังก์ชันการเข้าสู่ระบบ
2. ฟังก์ชันการจัดการบัญชี

3. ฟังก์ชันการจัดการผู้เชี่ยวชาญ
4. ฟังก์ชันการจัดการเวลาที่เข้าพบ
5. ฟังก์ชันค้นหา
6. ฟังก์ชันดูการนัดหมายทั้งหมดของผู้เชี่ยวชาญ
7. ฟังก์ชันการดูแบบประเมินของนักศึกษาที่ส่งให้ผู้เชี่ยวชาญ
8. ฟังก์ชันแจ้งเตือนการยกเลิกการนัดหมายผ่านอีเมลหัวหน้ากลุ่ม

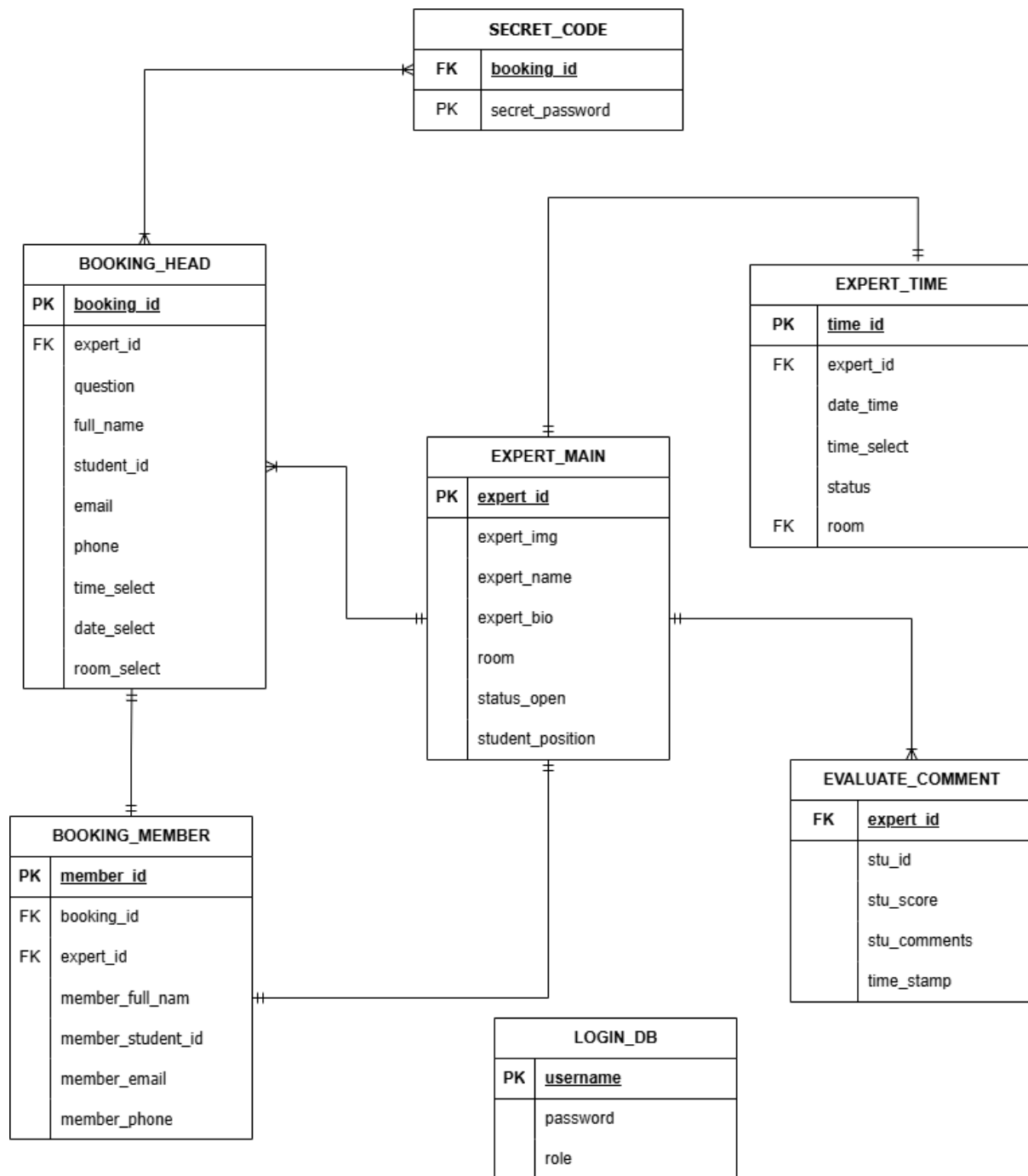
2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ ได้จำแนกวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยทำการศึกษาระบบจองคิวหรือระบบนัดหมายที่ใช้อยู่ในปัจจุบันผ่าน Google sheet และระบบจองคิวหรือระบบนัดหมายของหน่วยงานต่างๆ รวมถึงได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบจองคิวหรือระบบนัดหมายจากเอกสารต่างๆ ได้แก่ บทความ งานวิจัย และเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบจองคิว หรือระบบนัดหมาย
2. วิเคราะห์และกำหนดขอบเขต หลังจากได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลแล้ว ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้เพื่อกำหนดขอบเขตฟังก์ชันการทำงานของระบบทั้งหมด และกำหนดระยะเวลาการทำงานทั้งหมด
3. การออกแบบ ได้ออกแบบแผนภาพ Use Case Diagram แสดงฟังก์ชันการทำงานของกลุ่มผู้ใช้ 2 ส่วน คือ ผู้ใช้งานระบบ (นักศึกษา) และ ส่วนของผู้ดูแลระบบ (อาจารย์) ดังรูปที่ 1 และแผนภาพโครงสร้างของฐานข้อมูล (Entity Relationship Diagram) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 Use Case Diagram ระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์



รูปที่ 2 แผนภาพโครงสร้างของฐานข้อมูล (Entity Relationship Diagram)

หลังจากได้ขอบเขตของระบบจากการวิเคราะห์พร้อมทั้งออกแบบ และได้สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบทั้ง 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการใช้งานระบบและความถูกต้อง และด้านการออกแบบและความสวยงาม

4. การพัฒนาระบบหลังจากออกแบบระบบแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ การพัฒนาระบบของนักผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ ด้วยโปรแกรมภาษา HTML, CSS, JavaScript, PHP จัดการฐานข้อมูลด้วยโปรแกรม MySQL และออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (UI/UX) ด้วยโปรแกรม Figma
5. การทดสอบระบบหลังจากพัฒนาระบบเรียบร้อยแล้ว ก่อนจะนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้จริงนั้น ต้องมีการทดสอบระบบก่อน โดยผู้พัฒนาระบบจะเป็นผู้ทดสอบระบบ ทำการทดสอบการเชื่อมโยง และการแสดงผลของทุกหน้าจอ ตรวจสอบความถูกต้อง

ต้องของเนื้อหาที่แสดงผลทุกหน้าจอ และทดสอบการทำงานของระบบทุกขั้นตอนของผู้ใช้งานระบบ และผู้ดูแลระบบ หากพบข้อผิดพลาด จะดำเนินการแก้ไขจนได้ระบบที่เสร็จสมบูรณ์

6. การทดสอบใช้ระบบ เมื่อได้ระบบที่สมบูรณ์แล้ว ผู้วิจัยได้ให้ผู้ใช้งานจำนวน 32 คน โดยสุ่มนักศึกษาคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจ และการบริหารกิจการ ชั้นปีที่ 4 ที่ต้องใช้ระบบจริงจองนัดพบผู้เชี่ยวชาญของคณะ และทำแบบประเมินความพึงพอใจต่อระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ ทั้ง 2 ด้าน ได้แก่ ด้านการใช้งานระบบและความถูกต้อง และด้านการออกแบบและความสวยงาม
7. การวิเคราะห์ข้อมูล และการสรุปผล เมื่อได้ข้อมูลจากแบบประเมิน ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละด้าน เมื่อได้ค่าเฉลี่ยแล้วก็จะนำมาหาค่าเฉลี่ยรวมเพื่อหาผลสรุปของความพึงพอใจโดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินค่า (Rating Scale) 5 ระดับ [10]

4.51-5.00 หมายถึง มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดีที่สุด

3.51-4.50 หมายถึง มีความพึงพอใจอยู่ในระดับดี

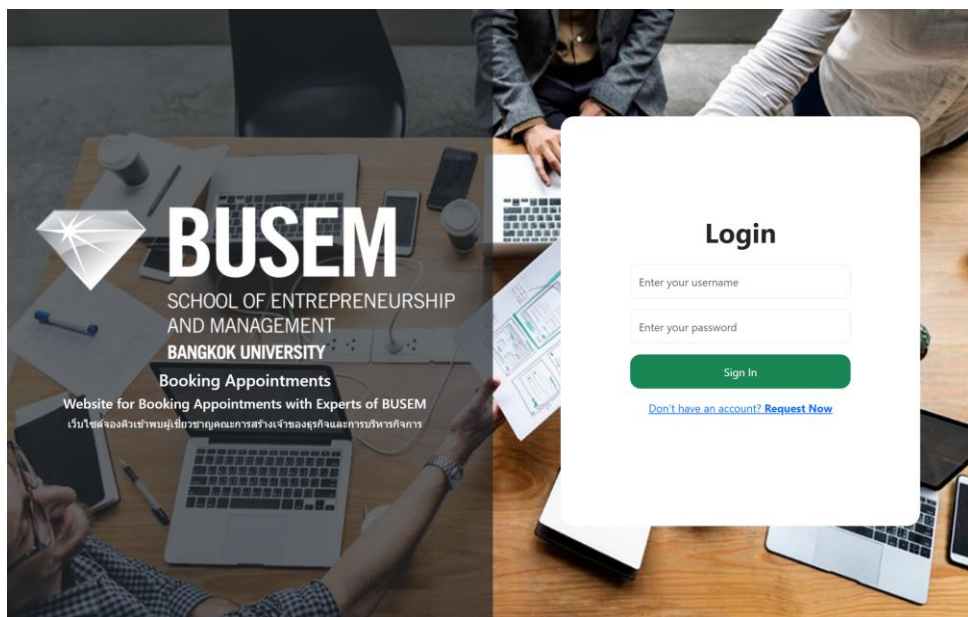
2.51-3.50 หมายถึง มีความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

1.51-2.50 หมายถึง มีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อย

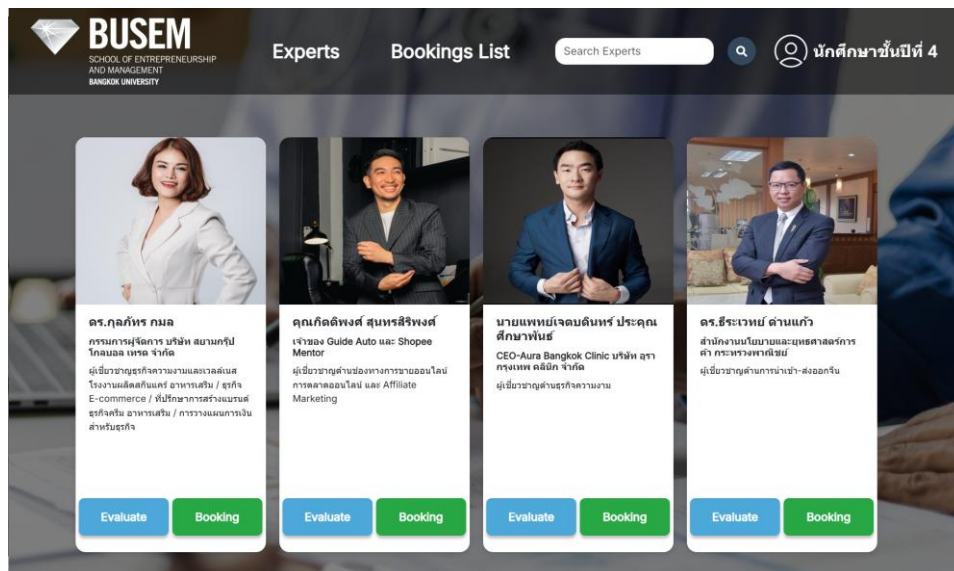
1.00-1.50 หมายถึง มีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อยที่สุด

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

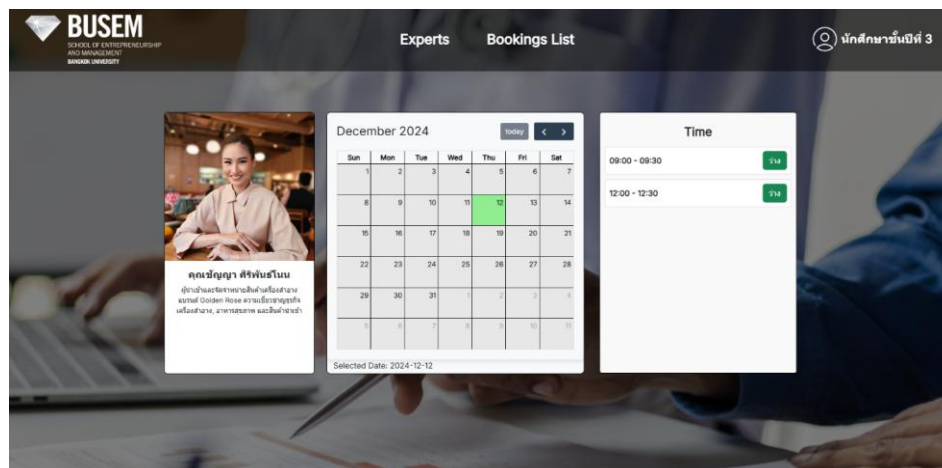
ผลการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้ ได้ระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์สำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ เพื่อทำการจองนัดผู้เชี่ยวชาญในการขอรับบริการขอคำปรึกษาธุรกิจ โดยกลุ่มผู้ใช้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผู้ใช้งานระบบ สามารถเข้าสู่ระบบ ค้นหาผู้เชี่ยวชาญ นัดหมายผู้เชี่ยวชาญ ประเมินผู้เชี่ยวชาญ และได้รับการแจ้งเตือนการนัดหมายผ่านอีเมล ตัวอย่างหน้าจอเข้าสู่ระบบ หน้าจอค้นหาผู้เชี่ยวชาญ หน้าจอการนัดหมายผู้เชี่ยวชาญ และหน้าจอการแจ้งเตือนนัดหมายผ่านอีเมล ดังรูปที่ 3-6



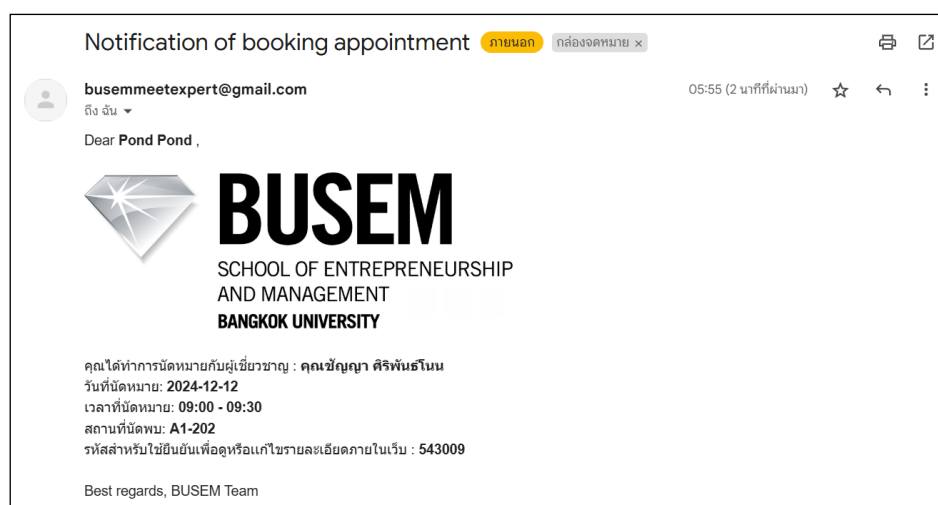
รูปที่ 3 หน้าจอเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4 หน้าจอค้นหาผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 5 หน้าจอการนัดหมายผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 6 หน้าจอการแจ้งเตือนนัดหมายผ่านอีเมล

ส่วนผู้ดูแลระบบ สามารถเข้าสู่ระบบ จัดการบัญชีผู้ใช้ จัดการข้อมูลผู้เชี่ยวชาญ จัดการเวลานัดหมายผู้เชี่ยวชาญ ค้นหาผู้เชี่ยวชาญ ดูข้อมูลการนัดหมายทั้งหมดของผู้เชี่ยวชาญ ดูข้อมูลผลประเมินผู้เชี่ยวชาญ และการแจ้งเตือนการยกเลิกการนัดหมายผ่านอีเมล ตัวอย่างหน้าจอจัดการข้อมูลผู้เชี่ยวชาญ หน้าจอจัดการเวลานัดหมายผู้เชี่ยวชาญ หน้าจอดูข้อมูลการนัดหมายทั้งหมดของผู้เชี่ยวชาญ และหน้าจอข้อมูลผลประเมินผู้เชี่ยวชาญ ดังรูปที่ 7-10

BUSEM
SCHOOL OF ENTREPRENEURSHIP
AND MANAGEMENT
BANGKOK UNIVERSITY

Experts Manages Accounts

Search Experts

ผู้ดูแลระบบ (Administrator)

Edit Profile

Name:
ดร.กุลภัทร กมล

Position:
กรรมการผู้จัดการ บริษัท สยามกรุ๊ป โกลบอล เทรด จำกัด

Bio:
ผู้เชี่ยวชาญธุรกิจความงามและเวชภัณฑ์ โรงงานผลิตสกินแคร์ อาหารเสริม / ธุรกิจ E-commerce / ที่ปรึกษาการสร้างแบรนด์ ธุรกิจเสริม อาหารเสริม / การวางแผนการเงินสำหรับธุรกิจ

Room:
A1-207

● ป 3 ● **ป 4** ● ป 3 และ ป 4

Cancel Save

รูปที่ 7 หน้าจอจัดการข้อมูลผู้เชี่ยวชาญ

BUSEM
SCHOOL OF ENTREPRENEURSHIP
AND MANAGEMENT
BANGKOK UNIVERSITY

Experts

ผู้ดูแลระบบ (Administrator)

เพิ่มช่วงเวลา

เลือกเวลา:

ป 3

09:00 - 09:30

09:30 - 10:00

10:00 - 10:30

10:30 - 11:00

สถานะ:

ว่าง

ยกเลิก บันทึก

Time

Time slots for 2025-08-08:

12:00 - 12:30 ไม่ว่าง

12:30 - 13:00 ไม่ว่าง

13:00 - 13:30 ว่าง

13:30 - 14:00 ว่าง

14:00 - 14:30 ว่าง

+ เพิ่มช่วงเวลา - ลบช่วงเวลา

รูปที่ 8 หน้าจอจัดการเวลานัดหมายผู้เชี่ยวชาญ

BUSEM
SCHOOL OF ENTREPRENEURSHIP
AND MANAGEMENT
BANGKOK UNIVERSITY

Experts Manages Accounts ผู้ดูแลระบบ (Administrator)

ดร.กุลภัทร กมล
กรรมการผู้จัดการ บริษัท สยามกรุ๊ป
โกลบอล เทรด จำกัด
ผู้เชี่ยวชาญธุรกิจความงามและเวลดับเบิล
โรงงานผลิตสกินแคร์ อาหารเสริม / ธุรกิจ
E-commerce / ที่ปรึกษาการสร้างแบรนด์
ธุรกิจเสริม อาหารเสริม / การวางแผนการเงิน
สำหรับธุรกิจ

Date: 2025-08-08 Time: 12:00 - 12:30 Room: A1-207

Question: การผลิตเครื่องสำอาง ตลาดเกี่ยวกับธุรกิจความงาม

First Name: สุธิดา Last Name: จินสุนทร

Email: suthida.junn@bumail.net Phone: 0812225550

More Details

Date: 2025-08-08 Time: 12:30 - 13:00 Room: A1-207

Question: ธุรกิจความงาม และการทำครีม

First Name: ณัฐยา Last Name: มหาชัยพัฒน์

Email: nuttaya.maha@bumail.net Phone: 0895556660

More Details

รูปที่ 9 หน้าจอข้อมูลการนัดหมายทั้งหมดของผู้เชี่ยวชาญ

BUSEM
SCHOOL OF ENTREPRENEURSHIP
AND MANAGEMENT
BANGKOK UNIVERSITY

Experts Manages Accounts ผู้ดูแลระบบ (Administrator)

ผู้เชี่ยวชาญที่ดู: ดร.กุลภัทร กมล

5 ★ (2)

4 ★ (0)

3 ★ (0)

2 ★ (0)

1 ★ (0)

Score: 5/5
Total Feedback: 2

Search by Date Range

Start Date: วว/ดด/ปปปป End Date: วว/ดด/ปปปป

Comment No. 1

Comment: 6

Date: 2025-08-03

รูปที่ 10 หน้าจอข้อมูลผลประเมินผู้เชี่ยวชาญ

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อระบบของนักผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ มีผู้เข้าร่วมประเมินเป็นจำนวนทั้งหมด 32 คน โดยใช้แบบประเมินความพึงพอใจของระบบ พบว่า ระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบของนักผู้เชี่ยวชาญผ่านเว็บไซต์ มีดังนี้

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบ

ข้อคำถาม	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความหมาย
ด้านการใช้งานระบบและความถูกต้อง			
1. ระบบมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ	4.88	0.49	ดีที่สุด
2. ระบบมีความสะดวกในการจองผู้เชี่ยวชาญ	4.72	0.58	ดีที่สุด
3. ระบบมีฟังก์ชันการใช้งานครอบคลุม	4.63	0.75	ดีที่สุด
4. ระบบมีการตอบสนองการใช้งานที่รวดเร็ว	4.63	0.79	ดีที่สุด
5. ระบบมีประโยชน์และสามารถนำไปใช้จริง	4.81	0.47	ดีที่สุด
ผลค่าเฉลี่ย	4.73	0.62	ดีที่สุด
ด้านการออกแบบและความสวยงาม			
1. การออกแบบหน้าจอสวยงาม	4.38	0.98	ดี
2. การจัดรูปแบบเมนูง่ายต่อการใช้งาน	4.50	0.88	ดี
3. สีสันทันที่ให้ความเหมาะสม	4.31	1.06	ดี
4. รูปแบบตัวอักษรง่ายต่อการใช้งาน	4.59	0.67	ดีที่สุด
5. คำอธิบายและการแจ้งเตือนได้เหมาะสม	4.38	0.94	ดี
ผลค่าเฉลี่ย	4.43	0.90	ดี

จากตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบและความถูกต้อง เท่ากับ 4.73 อยู่ในระดับดีมากที่สุด หัวข้อระบบมีความถูกต้องน่าเชื่อถือเป็นข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 4.88 และในหัวข้อระบบมีฟังก์ชันการใช้งานครอบคลุม และหัวข้อระบบมีการตอบสนองการใช้งานที่รวดเร็ว มีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 4.63

ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจด้านการออกแบบและความสวยงาม เท่ากับ 4.43 อยู่ในระดับดี หัวข้อ รูปแบบตัวอักษรง่ายต่อการใช้งาน เป็นข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 4.59 และในหัวข้อสีสันทันที่ให้ความเหมาะสม มีค่าเฉลี่ยน้อยสุด เท่ากับ 4.31

จากการวิเคราะห์ผลการประเมินความพึงพอใจ ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบและความถูกต้อง เท่ากับ 4.73 มีค่าเฉลี่ยมากกว่า ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจด้านการออกแบบและความสวยงาม เท่ากับ 4.43 เนื่องจากภาพรวมการทำงานของระบบมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ สะดวก ฟังก์ชันการทำงานครอบคลุม และใช้งานได้ง่าย แต่ยังคงขาดด้านความสวยงามของการออกแบบหน้าจอ การใช้สี ตัวอักษร และคำอธิบายต่างๆ ยังต้องปรับปรุงต่อไปในอนาคต

4. สรุปผลการวิจัย

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบจองนัดผู้เชี่ยวชาญออนไลน์สำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ ที่สามารถใช้งานได้จริง แต่ยังมีข้อจำกัดของการวิจัย (Limitations) หลายประเด็น ได้แก่ จำนวนกลุ่มตัวอย่างมาจากคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการเท่านั้น และเป็นการทดสอบระบบในระยะเวลาที่สั้น และการออกแบบระบบได้กำหนดขอบเขตสำหรับคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการเท่านั้น

5. ข้อเสนอแนะ

สำหรับแนวทางในการพัฒนาต่อยอดในอนาคตจะมีการปรับปรุงความสวยงามของหน้าจอ และความเหมาะสมของคำอธิบายและการแจ้งเตือนให้ชัดเจนขึ้น รวมถึงการพัฒนาฟังก์ชันการทำงานเพิ่มเติม เช่น ส่วนของผู้เชี่ยวชาญ สามารถเข้าสู่ระบบเพื่อเก็บข้อมูลการ

ให้คำปรึกษา และสามารถดูประวัติการให้คำปรึกษา นอกจากนี้ระบบไม่ควรจำกัดการใช้งานเพียงคนเดียว ควรออกแบบให้นำไปใช้ได้กับคนอื่นๆ ได้ด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักศึกษาคณะกรรมการสร้างเจ้าของธุรกิจและการบริหารกิจการ ที่ช่วยทำแบบประเมินให้กับการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ถนอม กองใจ และ อริษา ทาทอง, “การพัฒนาระบบแจ้งเตือนกิจกรรมและการนัดหมายอัตโนมัติผ่านแอปพลิเคชันไลน์ โดยประยุกต์ใช้ Google Application และ Line Notification,” Mahidol R2R e-Journal, ปีที่ 9, ฉบับที่ 2, หน้า 32-45, 2565.
- [2] ธนกฤต ดินพ, สุธารัตน์ ขาวนาฟาง และ อุษณีย์ ภักดีตระกูลวงศ์, “การพัฒนาระบบจองคิวออนไลน์สำหรับการเข้ารับบริการดูแลรักษาโรคภัยไข้เจ็บที่สถานบริการการแพทย์,” วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, หน้า 25-37, 2564.
- [3] สุดถนอม กมลเลิศ, รัศมี ภาวะพินิจ, ภาสกร เงามาม, บุชบา บุญกระโทก, เตือนใจ พิทยาวัฒน์ชัย และ โฉมพิไล นันทรักษา, “การพัฒนาระบบแอปพลิเคชันการจัดการคิวสำหรับห้องตรวจผู้ป่วยนอก,” วารสารพยาบาลศาสตร์และสุขภาพ, ปีที่ 48, ฉบับที่ 3, หน้า 155-173, 2568.
- [4] K. Dewantari, M. A. H. S. Hidayat, and N. M. R. Ratman, “The design of online expert system as an alternative guidance with the academic advisory lecturer of university students of State University of Malang,” in *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering, Informatics, and Its Education (ICEEIE 2015)*, Malang, Indonesia, 2015, pp. C-141–C-146.
- [5] M. Meena, H. K. K. Harikes, and T. Alagu Raja, “Online appointment booking and patient management system,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, vol. 14, no. 5, pp. 1–7, May 2025.
- [6] F. D. Davis, “Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology,” *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319–340, 1989.
- [7] A. D. Ampuan and R. D. Delena, “An implementation and evaluation of web-based appointment system for the Mindanao State University – Main Campus,” *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 4, no. 4, pp. 922–936, Dec. 2022.
- [8] P. Saltzmann, “Blood donors’ usage intentions of donation appointment-scheduling systems during the COVID-19 pandemic and beyond,” *Journal of Philanthropy and Marketing*, vol. 27, no. 3, e1768, 2022.
- [9] A. Ouajdouni, K. Chafik, S. Alloui, and M. Jbene, “Patient satisfaction with the Mawiidi hospital appointment-scheduling application: Insights from the Information Systems Success Model and Technology Acceptance Model in a Moroccan healthcare setting,” *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, no. 12, art. 180, Dec. 2024.
- [10] บุญชม ศรีสะอาด, การวิจัยเบื้องต้น, พิมพ์ครั้งที่ 7, กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น, 2545.

เกมระบายสี 2 สี บนกราฟของทรงหลายหน้าปกติ และกึ่งปกติบางประเภท

2-Coloring Impartial Game on Some Regular and Semiregular Polyhedral Graphs

บุญฤทธิ์ บุญอ้อม^{1*} และ บวร คูหิรัญ²

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Department Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 10200, Thailand.

^{1*}Email: boonyarit.boon@dome.tu.ac.th; ²Email: borworkn@mathstat.sci.tu.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาเกมระบายสีจุดยอดซึ่งเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคนสลับกันระบายสีจุดยอดด้วยสี 2 สี ภายใต้เงื่อนไขว่า จุดยอดที่ประชิดกันต้องมีสีต่างกัน นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาเกมระบายสีเส้นเชื่อมซึ่งมีกติกาในการทำงานเดียวกัน โดยจะมีการพิสูจน์ว่าผู้เล่นคนที่สองมีกลยุทธ์ในการชนะได้เสมอ ทั้งในเกมระบายสีจุดยอดของกราฟทรงตันเพลโตและกราฟทรงตันอาร์คิมิดีส และเกมระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟทรงตันเพลโต

คำสำคัญ : เกมระบายสี ทรงตันเพลโต ทรงตันอาร์คิมิดีส

Abstract

We study a vertex coloring game, where two players alternately color vertices using two colors and avoiding adjacent duplicates. We also consider an edge coloring game in which the analogous rule applies. We prove that second player has a winning strategy in both vertex coloring game on Platonic solid graphs and Archimedean solid graphs, as well as edge coloring game on Platonic solid graphs.

Keyword: Coloring game, Platonic solids, Archimedean solids

1. บทนำ

การศึกษาการระบายสีกราฟ (graph coloring) เป็นหนึ่งในหัวข้อของทฤษฎีกราฟ จุดเริ่มต้นเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2395 [2] เมื่อออกัสตัส เดอ มอร์แกน ได้เขียนจดหมายถึงเพื่อนของเขาชื่อ วิลเลียม แอมลิตัน โดยตั้งคำถามว่า เราสามารถระบายสีแผนที่ใดๆ ได้โดยใช้สีเพียงสี่สีเท่านั้นบนบริเวณที่ประชิดกัน (adjacent regions) ได้หรือไม่ แนวคิดนี้กลายมาเป็นที่รู้จักในชื่อ ข้อปัญหาสี่สี (four-color problem) ซึ่งได้เผยแพร่ในปี พ.ศ. 2520 นับแต่นั้นมาการระบายสีกราฟได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการไขปัญหาต่างๆ เช่น ปัญหาพนักงานขายเดินทาง (traveling salesman problem) และปัญหาการจัดตารางเวลา (scheduling problem) เป็นต้น

ในการระบายสีกราฟบริเวณที่ประชิดกันจะแทนด้วยจุดยอด และจะบ่งบอกว่าบริเวณใดอยู่ติดกันโดยเส้นเชื่อม โดยสิ่งที่เราสนใจคือการระบายสีจุดยอด (vertex coloring) เหล่านี้โดยไม่ให้จุดยอดที่เชื่อมโยงกันมีสีเดียวกัน และนอกจากนี้ยังมีศึกษาการระบายสีเส้น

เชื่อม (edge coloring) ซึ่งเป็นการหาจำนวนสีน้อยที่สุดที่สามารถใช้ระบายเส้นเชื่อมของกราฟ โดยมีเงื่อนไขว่าเส้นเชื่อมที่ประชิดกัน ต้องไม่ใช่สีเดียวกัน จุดมุ่งหมายของทั้งสองกรณีคือการใช้จำนวนสีน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ปัญหาที่มีการประยุกต์ใช้จริงในหลายด้าน เช่น การออกแบบเครือข่าย (network design) และการจัดสรรทรัพยากร (resource allocation) อีกทั้งยังได้พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อแก้ปัญหาการระบายสีกราฟเหล่านี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การระบายสีกราฟยังสามารถศึกษาในรูปแบบของเกมที่ได้อีกด้วย โดยในเกมระบายสีกราฟแบบมีผู้เล่นสองผู้เล่น (two-player graph coloring game) ผู้เล่นจะสลับกันระบายสีจุดยอดของกราฟ ภายใต้กติกาที่ว่าจุดยอดที่ประชิดกันต้องไม่ถูกระบายสีเดียวกัน

ในด้านเรขาคณิต รูปทรง 3 มิติ ได้แก่ ทรงหลายเหลี่ยม (polyhedron) สามารถศึกษาได้ผ่านทฤษฎีกราฟ ซึ่งช่วยให้เรามองเห็นและทำความเข้าใจโครงสร้างของมันได้ง่ายขึ้น ทรงหลายเหลี่ยมปกติ หรือที่รู้จักกันว่า ทรงตันเพลโต (Platonic solids) [3] ซึ่งมีหน้าทุกด้านเป็นรูปหลายเหลี่ยมด้านเท่าเพียงชนิดเดียว ส่วนอีกประเภทหนึ่งคือ ทรงหลายเหลี่ยมกึ่งปกติหรือทรงตันอาร์คิมิดีส (Archimedean solids) ซึ่งมีหน้าเป็นรูปหลายเหลี่ยมด้านเท่ามากกว่าหนึ่งชนิด โดยการแปลงทรงหลายหน้าให้เป็นกราฟจะช่วยให้เราอธิบายสมบัติและโครงสร้างของทรงหลายหน้าได้อย่างเป็นระบบด้วยทฤษฎีกราฟแทนที่จะอาศัยการมองจากภาพ 3 มิติเพียงอย่างเดียว

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการศึกษาเกมระบายสีจุดยอดซึ่งเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคนสลับกันระบายสีจุดยอดด้วยสี 2 สี ภายใต้เงื่อนไขจุดยอดที่ประชิดกันต้องมีสีต่างกัน นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเกมระบายสีเส้นเชื่อมซึ่งมีกติกาในทำนองเดียวกัน โดยจะมีการพิสูจน์ว่าผู้เล่นคนที่สองมีกลยุทธ์ในการชนะได้เสมอ ทั้งในเกมระบายสีจุดยอดของกราฟทรงตันเพลโตและกราฟทรงตันอาร์คิมิดีส และเกมระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟทรงตันเพลโต

2. ความรู้พื้นฐาน

ทฤษฎีเกม (game theory)

ทฤษฎีเกมคือการศึกษากการตัดสินใจเชิงตรรกะในสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความขัดแย้งและความร่วมมือ ในเกมผู้เล่นจะต้องเป็นผู้ตัดสินใจ ในขณะที่กลยุทธ์คือแผนการที่ครอบคลุมถึงการตัดสินใจทุกขั้นตอนที่ผู้เล่นจะเลือกเมื่อเกมถูกเล่นจริง เกมจะต้องมีผู้เล่นอย่างน้อยสองคน โดยแต่ละคนมีชุดกลยุทธ์ (strategy) ที่เป็นไปได้ของตนเอง เราจะเรียกเกมว่า เกมจำกัด (finite game) เมื่อจำนวนผู้เล่นและจำนวนการเดินมีค่าจำกัด

บทนิยาม 2.1 เกมเชิงการจัด (combinatorial game) เป็นเกมสองผู้เล่นที่มีลักษณะดังนี้

1. เซตของตำแหน่ง (positions) ที่ผู้เล่นสามารถเดินได้
2. เซตของกฎการเดิน (move rules) ที่ผู้เล่นแต่ละคนสามารถใช้เพื่อเดินไปยังตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง
3. เซตของตำแหน่งที่ทำให้ชนะ (winning positions) ซึ่งเป็นตำแหน่งสุดท้ายในเกม

เกมเชิงการจัดที่เราจะรู้จักกันทั่วไป ได้แก่ เกมหมากรุก และเกมหมากฮอส เป็นต้น

บทนิยาม 2.2 เกมการเล่นตามปกติ (normal play game) คือเกมที่มีเงื่อนไขดังนี้

1. ประกอบด้วยเซตของตำแหน่ง ซึ่งในแต่ละตำแหน่งจะกำหนดได้ว่าผู้เล่นสามารถเดินไปยังตำแหน่งใดได้บ้าง
2. ผู้เล่นคนสุดท้ายที่สามารถเดินได้จะเป็นผู้ชนะ

เกมจะถูกเรียกว่ามีข้อมูลสมบูรณ์ (perfect information) หากผู้เล่นทุกคนรู้ข้อมูลทุกอย่างเกี่ยวกับเกมตลอดเวลา จนกระทั่งเกมสิ้นสุด

ทฤษฎีบท 2.3 ทุกๆ เกมจำกัดที่มีผู้เล่นสองคน และมีข้อมูลสมบูรณ์ หากเกมไม่สามารถจบลงด้วยผลเสมอได้ จะต้องมีการเล่นคนใดคนหนึ่งที่มีกลยุทธ์การชนะ (winning strategy)

ทฤษฎีกราฟ (graph theory)

บทนิยาม 2.4 กราฟ $G = (V, E)$ ประกอบด้วยเซตจำกัดที่ไม่เป็นเซตว่าง V เรียกว่าจุดยอด (vertices) และเซต E ของเซตย่อยที่มีสมาชิก 2 ตัวจาก V ซึ่งเรียกว่าเส้นเชื่อม (edges) โดยเซต V และ E จะถูกเรียกว่า เซตของจุดยอด (vertex set) และเซตของเส้นเชื่อม (edge set) ของกราฟ G ตามลำดับ

ข้อสังเกต 2.5 1. เราใช้สัญลักษณ์ $V(G)$ และ $E(G)$ แทนการเขียน V และ E เพื่อเน้นว่าเซตเหล่านี้คือ เซตของจุดยอด และเซตของเส้นเชื่อมของกราฟ G

2. โดยทั่วไปเราแทนเส้นเชื่อม $\{u, v\}$ ด้วย uv

บทนิยาม 2.6 ให้ u และ v เป็นจุดยอดในกราฟ G ถ้า $e = uv$ เป็นเส้นเชื่อมของ G แล้วจะเรียกว่า u และ v ประชิด (adjacent) กัน และเรียกว่า u และ v ถูกเชื่อมด้วยเส้นเชื่อม e

บทนิยาม 2.7 กราฟ H เรียกว่ากราฟย่อย (subgraph) ของกราฟ G เขียนแทนด้วย $H \subseteq G$ ถ้า $V(H) \subseteq V(G)$ และ $E(H) \subseteq E(G)$ เรายังกล่าวว่า H เป็นกราฟย่อยแผ่ทั่ว (spanning subgraph) ของ G ถ้า H เป็นกราฟย่อยของ G และ $V(H) = V(G)$

บทนิยาม 2.8 ให้ $X \subseteq E(G)$ เรานิยาม $G - X$ ให้เป็นกราฟย่อยแผ่ทั่วของกราฟ G โดยที่ $E(G - X) = E(G) - X$

บทนิยาม 2.9 การกำหนดสีจุดยอดของกราฟ G โดยใช้สีไม่เกิน k สี (vertex k -coloring) คือฟังก์ชัน $\omega : V(G) \rightarrow \{1, 2, 3, \dots, k\}$ เมื่อ $k \in \mathbb{N}$

บทนิยาม 2.10 การกำหนดสีเส้นเชื่อมของกราฟ G โดยใช้สีไม่เกิน k สี (edge k -coloring) คือฟังก์ชัน $\varphi : E(G) \rightarrow \{1, 2, 3, \dots, k\}$ เมื่อ $k \in \mathbb{N}$

บทนิยาม 2.11 แนวเดิน $u - v$ ($u - v$ walk) ในกราฟ G เขียนแทนด้วย W คือ ลำดับของจุดยอดใน G ซึ่งเริ่มต้นที่ u และสิ้นสุดที่ v โดยที่จุดยอดที่ต่อเนื่องกันในลำดับนั้นเป็นจุดยอดที่ประชิดกัน เราสามารถเขียนแนวเดิน W ได้ในรูป

$$W = (u = v_0, v_1, \dots, v_k)$$

เมื่อ $k \geq 0$ และ v_i และ v_{i+1} ประชิดกัน สำหรับทุก $i = 0, 1, 2, \dots, k - 1$

บทนิยาม 2.12 วิธี $u - v$ ($u - v$ path) คือแนวเดิน $u - v$ ในกราฟ G ที่ไม่มีการซ้ำของจุดยอด

บทนิยาม 2.13 กราฟเส้น (line graph) ของกราฟ G เขียนแทนด้วย $L(G)$ คือกราฟที่เซตของจุดยอดคือเซตของเส้นเชื่อมของ G โดยที่สองจุดยอดใดๆ ใน $L(G)$ จะประชิดกัน ก็ต่อเมื่อ เส้นเชื่อมที่สมนัยกันประชิดกันใน G

บทนิยาม 2.14 กราฟ G เรียกว่าเป็นกราฟเชื่อมโยง (connected graph) ถ้าสำหรับทุกคู่ของจุดยอด $u, v \in V(G)$ จะมีวิถีระหว่าง u และ v ใน G

บทนิยาม 2.15 ส่วนประกอบเชื่อมโยง (connected component) ของกราฟไม่ระบุทิศทาง คือกราฟย่อยที่ทุกสองจุดยอดที่ต่างกัน เชื่อมโยงกันด้วยวิถี

บทนิยาม 2.16 ให้ G เป็นกราฟเชื่อมโยง ส่วนตัดเส้นเชื่อม (edge cut) X ของ G คือเซต $X \subseteq E(G)$ ที่ทำให้กราฟ $G - X$ เป็นกราฟไม่เชื่อมโยง (disconnected graph)

ทรงตันเพลโต (Platonic solid)

ทรงหลายหน้า P ในปริภูมิแบบยูคลิด 3 มิติ คือเซตจำกัดของรูปหลายเหลี่ยมบนระนาบที่เป็นรูปนูน ซึ่งเรียกว่าหน้า (face) โดยที่ทุกๆ เส้นขอบของรูปหลายเหลี่ยมแต่ละรูปจะเป็นเส้นขอบของรูปหลายเหลี่ยมอื่นด้วย และเซตของเส้นเชื่อมของทรงหลายหน้าเกิดจากการอินเตอร์เซกชันระหว่างหน้าที่ประชิดกัน และเซตของจุดยอดเกิดจากการอินเตอร์เซกชันระหว่างเส้นเชื่อมที่ประชิดกัน เราจะเรียกทรงหลายหน้า P เรียกว่าทรงหลายหน้าแบบปกติ (regular polyhedron) [3] ถ้าทุกๆ หน้าเป็นรูปหลายเหลี่ยมชนิดเดียวกันเพียงหนึ่งชนิด เราจึงรู้จักกันในชื่อทรงตันเพลโต (Platonic solid) ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ ทรงสี่หน้า ทรงหกหน้า ทรงแปดหน้า ทรงสิบสองหน้า และทรงยี่สิบหน้า ดังรูปที่ 1



ทรงสี่หน้า



ทรงหกหน้า



ทรงแปดหน้า



ทรงสิบสองหน้า



ทรงยี่สิบหน้า

(Tetrahedron) (Hexahedron) (Octahedron) (Dodecahedron) (Icosahedron)

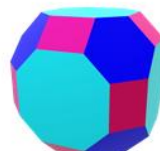
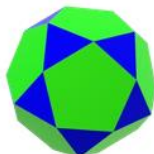
รูปที่ 1 ทรงตันเพลโต

ทรงตันอาร์คิมิดีส (Archimedean solid)

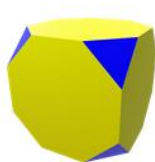
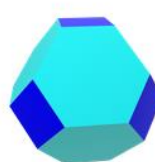
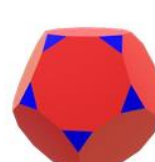
ทรงหลายหน้า P เรียกว่าทรงหลายหน้าแบบกึ่งปกติ (semiregular polyhedron) ถ้ามีหน้าเป็นรูปหลายเหลี่ยมมากกว่าหนึ่งชนิด เรารู้จักกันในชื่อทรงตันอาร์คิมิดีส (Archimedean solid) ซึ่งแบ่งออกเป็น 13 รูปแบบ ดังรูปที่ 2



Cuboctahedron

Rhombi
cuboctahedronRhombitruncated
cuboctahedronSnub
cuboctahedron

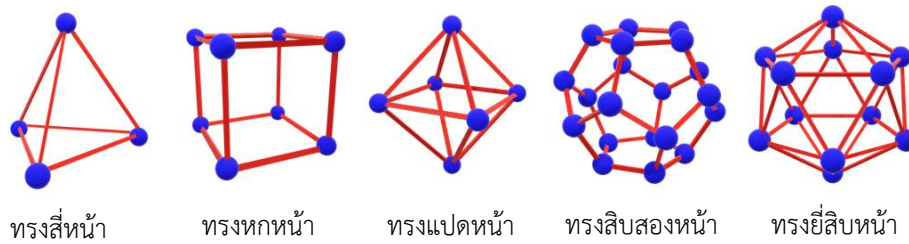
Icosidodecahedron

Rhombicosi
dodecahedronRhombitruncated
IcosidodecahedronSnub
IcosidodecahedronTruncated
tetrahedronTruncated
hexahedronTruncated
octahedronTruncated
dodecahedronTruncated
icosahedron

รูปที่ 2 ทรงตันอาร์คิมิดีส

กราฟทรงหลายหน้า (polyhedron graph)

กราฟทรงหลายหน้า (polyhedron graph) คือกราฟ G ที่ได้มาจากการแปลงทรงหลายหน้า P โดยเส้นขอบของหน้าแต่ละหน้าจะกลายเป็นเส้นเชื่อมของกราฟ และอินเตอร์เซกชันระหว่างเส้นเชื่อมเป็นจุดยอดของกราฟ ดังเช่นกราฟทรงตันหลายหน้าที่แปลงมาจากทรงตันเพลโต ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟทรงตันเพลโต

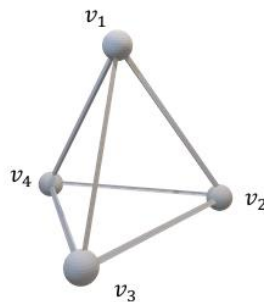
เกมระบายสีจุดยอด และเกมระบายสีเส้นเชื่อม (vertex coloring game and edge coloring game)

การศึกษาเกมระบายสีบนกราฟ โดย กาเบรียล โบลิเยอ กับ ไคล์ เบิร์ก และเอริก ดูเชเน นับว่าเป็นงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง [1] ในปี พ.ศ. 2562 เสี่ยวจ้าวและเจิงเฉิน [4] มุ่งเน้นไปที่การศึกษาเกมระบายสีประเภทหนึ่งที่เรียกว่าเกมระบายสีแบบไม่ลำเอียง ซึ่งเป็นเกมสองผู้เล่น โดยที่จุดยอดของกราฟจะถูกระบายสีสลับกันไปมาจนกว่าจะไม่มีผู้เล่นสามารถระบายสีได้นั้นคือผู้เล่นคนนั้นจะเป็นผู้แพ้ ต่อมาเขาได้ศึกษาเกมระบายสีบนกราฟต้นไม้ และนำเสนอกลยุทธ์การชนะในเกมนี้

ในงานวิจัยฉบับนี้เราจะขยายการศึกษาเกมระบายสีบนกราฟทรงตันเพลโต และทรงตันอาร์คิมิดีส โดยที่เราจะศึกษาหากกลยุทธ์ในการชนะ เริ่มต้นจากการศึกษากราฟทรงตันเพลโตซึ่งมีความซับซ้อนน้อย โดยเกมนี้เรียกว่าเกมระบายสีจุดยอด (vertex coloring game) จะมีผู้เล่นสองคน เราเรียกผู้เล่นคนที่เริ่มเล่นคนแรกว่าอลิซ (Alice) และผู้เล่นคนที่สองเรียกว่าบ๊อบ (Bob) โดยผู้เล่นทั้งสองคนจะสลับกันระบายสีจุดยอด 1 จุดยอด โดยให้เลือกรับใช้สีใดสีหนึ่งใน 2 สีนี้ ในที่นี้เราใช้เป็นสีแดงและสีน้ำเงิน ซึ่งอลิซจะเป็นฝ่ายเริ่มก่อน กติกาก็คือผู้เล่นจะต้องระบายสีจุดยอดที่ประชิดกันห้ามเป็นสีเดียวกัน จากนั้นสลับกันระบายสีไปจนกว่าจะมีผู้เล่นที่ไม่สามารถระบายสีต่อได้ ผู้เล่นที่ระบายสีต่อไม่ได้เป็นคนสุดท้ายจะเป็นผู้แพ้ นอกจากนี้เรายังศึกษาเกมระบายสีเส้นเชื่อม (edge coloring game) ซึ่งใช้กติกาทำนองเดียวกับเกมระบายสีจุดยอด โดยให้ผู้เล่นสลับกันระบายสีเส้นเชื่อมแทน

ต่อไปเราจะแสดงตัวอย่างการเล่นเกมระบายสีจุดยอด

ตัวอย่าง 2.16 เกมระบายสี 2 สีบนจุดยอดของกราฟทรง 4 หน้า



รูปที่ 4 กราฟทรง 4 หน้า

เกมระบายสีต่อไปนี้เป็นเกมระบายสีจุดยอดบนกราฟทรง 4 หน้า ซึ่งมีจุดยอด 4 จุดยอด และเส้นเชื่อม 6 เส้นเชื่อม มีการเชื่อมโยงของคู่จุดยอดและเส้นเชื่อม ดังรูปที่ 4

ผู้เล่น : อลิซ และ บ๊อบ

สี : แดง และ น้ำเงิน

กติกาการเล่น : 1. อลิซเริ่มเล่นก่อน

2. แต่ละรอบ ผู้เล่นจะต้องเลือกระบายสีจุดยอดที่ยังไม่ถูกระบาย และเลือกใช้สีที่จะระบาย
3. ไม่สามารถระบายสีซ้ำกับสีของจุดยอดที่ประชิดกับจุดยอดนั้น
4. ผู้เล่นที่ไม่สามารถระบายสีต่อได้จะเป็นผู้แพ้

ลำดับการเล่นเกม :

รอบที่ 1 อลิชเลือกสีแดง ระบายลงบนจุดยอด v_1

สถานะของกราฟ v_1 (แดง) v_2 (ไม่มีสี) v_3 (ไม่มีสี) และ v_4 (ไม่มีสี)

รอบที่ 2 บ๊อบเลือกสีน้ำเงิน ระบายลงบนจุดยอด v_2

สถานะของกราฟ v_1 (แดง) v_2 (น้ำเงิน) v_3 (ไม่มีสี) และ v_4 (ไม่มีสี)

รอบที่ 3 อลิชไม่สามารถระบายต่อได้

รอบที่	ทางเลือกที่เป็นไปได้				สี
	เส้นเชื่อมของกราฟ				
	$v_1v_2, v_1v_3, v_1v_4, v_2v_3, v_2v_4, v_3v_4$				
1. อลิซ	v_1 แดง, น้ำเงิน	v_2 แดง, น้ำเงิน	v_3 แดง, น้ำเงิน	v_4 แดง, น้ำเงิน	$v_1 =$ แดง
2. บ๊อบ	v_1 -	v_2 น้ำเงิน	v_3 น้ำเงิน	v_4 น้ำเงิน	$v_2 =$ น้ำเงิน
3. อลิซ	v_1 -	v_2 -	v_3 -	v_4 -	-

ตารางที่ 1 ตารางแสดงจุดการเล่นเกมระบายสี 2 สีสบนจุดยอดของกราฟทรงสี่หน้า

ในตารางที่ 1 อลิชไม่สามารถระบายสีจุดยอดที่เหลือในรอบที่ 3 ได้ ดังนั้น บ๊อบเป็นผู้ชนะ

ตัวอย่าง 2.17 เกมระบายสี 2 สีสบนเส้นเชื่อมของกราฟทรง 4 หน้า แสดงดังตารางที่ 2

ลำดับการเล่นเกม :

รอบที่ 1 อลิชเลือกสีแดง ระบายลงบน v_1v_2

สถานะของกราฟ v_1v_2 (แดง) v_1v_3 (ไม่มีสี) v_1v_4 (ไม่มีสี) v_2v_3 (ไม่มีสี) v_2v_4 (ไม่มีสี) v_3v_4 (ไม่มีสี)

รอบที่ 2 บ๊อบเลือกสีน้ำเงิน ระบายลงบน v_1v_3

สถานะของกราฟ v_1v_2 (แดง) v_1v_3 (น้ำเงิน) v_1v_4 (ไม่มีสี) v_2v_3 (ไม่มีสี) v_2v_4 (ไม่มีสี) v_3v_4 (ไม่มีสี)

รอบที่ 3 อลิชเลือกสีน้ำเงิน ระบายลงบน v_2v_4

สถานะของกราฟ v_1v_2 (แดง) v_1v_3 (น้ำเงิน) v_1v_4 (ไม่มีสี) v_2v_3 (ไม่มีสี) v_2v_4 (น้ำเงิน) v_3v_4 (ไม่มีสี)

รอบที่ 4 บ๊อบเลือกสีแดง ระบายลงบน v_3v_4

สถานะของกราฟ v_1v_2 (แดง) v_1v_3 (น้ำเงิน) v_1v_4 (ไม่มีสี) v_2v_3 (ไม่มีสี) v_2v_4 (น้ำเงิน) v_3v_4 (แดง)

รอบที่ 5 อลิชไม่สามารถระบายต่อได้

รอบที่	ทางเลือกที่เป็นไปได้						สี
	เส้นเชื่อมของกราฟ						
	$v_1v_2, v_1v_3, v_1v_4, v_2v_3, v_2v_4, v_3v_4$						
1. อลิช	v_1v_2	v_1v_3	v_1v_4	v_2v_3	v_2v_4	v_3v_4	$v_1v_2 =$ แดง
	แดง, น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	
2. บ๊อบ	v_1v_2	v_1v_3	v_1v_4	v_2v_3	v_2v_4	v_3v_4	$v_1v_3 =$ น้ำเงิน
	-	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	น้ำเงิน	แดง, น้ำเงิน	
3. อลิช	v_1v_2	v_1v_3	v_1v_4	v_2v_3	v_2v_4	v_3v_4	$v_2v_4 =$ น้ำเงิน
	-	-	-	-	น้ำเงิน	แดง	
4. บ๊อบ	v_1v_2	v_1v_3	v_1v_4	v_2v_3	v_2v_4	v_3v_4	$v_3v_4 =$ แดง
	-	-	-	-	-	แดง	
5. อลิช	v_1v_2	v_1v_3	v_1v_4	v_2v_3	v_2v_4	v_3v_4	-
	-	-	-	-	-	-	

ตารางที่ 2 ตารางแสดงจุดการเล่นเกมระบายสี 2 สีสบนจุดยอดของกราฟทรงสี่หน้า

ในตารางที่ 2 อลิซไม่สามารถระบายสีเส้นเชื่อมที่เหลือในรอบที่ 5 ได้ ดังนั้น บ๊อบเป็นผู้ชนะ

3. เกมการระบายสีจุดยอด

ในบทนี้ เราจะนำเสนอกลยุทธ์ที่บ๊อบชนะเกมการระบายสีจุดยอดโดยใช้สี 2 สีบนกราฟทรงตันเพลโตและกราฟทรงตันอาร์คิมิดีสได้เสมอ

บทนิยาม 3.1 ภาพฉายของทรงหลายหน้า P คือกราฟไม่ระบุทิศทางในระนาบที่แปลงจากจุดยอด และเส้นเชื่อมของ P เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $Proj(P)$

บทนิยาม 3.2 ระบายสมมาตร H ของทรงหลายหน้า P คือระนาบใน 3 มิติ ซึ่งแบ่ง P ออกเป็นสองส่วน เรียกว่า P_1 และ P_2 ซึ่งสามารถแปลงเป็นกราฟใน 2 มิติ แทนด้วย $Proj(P_1)$ และ $Proj(P_2)$ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องเงื่อนไขดังนี้

1. มีฟังก์ชันสมมูลฐาน $\varphi : Proj(P_1) \rightarrow Proj(P_2)$ และ
2. สำหรับทุก $u \in V(Proj(P_1))$ และ $v \in V(Proj(P_2))$ จะได้ว่า $uv \in E(Proj(P))$ ก็ต่อเมื่อ $\varphi(u)\varphi^{-1}(v) \in E(Proj(P))$

ทฤษฎีบท 3.3 ให้ P เป็นทรงหลายหน้าที่มีระนาบสมมาตร จะได้ว่า บ๊อบมีกลยุทธ์ในการชนะเกมการระบายสีจุดยอดบน P

บทพิสูจน์ ให้ P เป็นทรงหลายหน้าที่มีระนาบสมมาตร จะสามารถแบ่ง P ออกเป็นสองส่วนให้ชื่อว่า P_1 และ P_2 และมีสมมูลฐาน $\varphi : Proj(P_1) \rightarrow Proj(P_2)$

เราจะพิสูจน์ว่าบ๊อบมีกลยุทธ์การชนะดังนี้ :

- ถ้าอลิซระบายสี $u \in V(Proj(P_1))$ แล้วบ๊อบต้องระบายสีตรงข้ามบน $\varphi(u) \in V(Proj(P_2))$
- ถ้าอลิซระบายสี $u \in V(Proj(P_2))$ แล้วบ๊อบต้องระบายสีตรงข้ามบน $\varphi^{-1}(u) \in V(Proj(P_1))$

สมมติให้อลิซระบายสีใดสีหนึ่งบน $u \in V(Proj(P))$ โดยไม่เสียเงินทั่วไป สมมติว่าอลิซระบายสี $u \in V(Proj(P_1))$ ด้วยสีแดง ต่อไปบ๊อบต้องระบายสี $\varphi(u) \in V(Proj(P_2))$ ด้วยสีน้ำเงิน สมมติให้บ๊อบเป็นผู้แพ้จากการเล่นในรอบนี้ แสดงว่ามี $v \in V(Proj(P))$ ซึ่ง $v\varphi(u) \in E(Proj(P))$ และ v เป็นสีน้ำเงิน

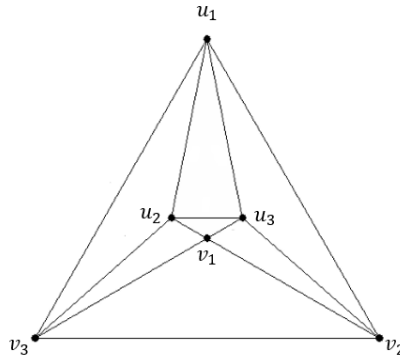
กรณีที่ 1: $v \in V(Proj(P_1))$ จากบทนิยาม 3.2 (2) จะได้ว่า $\varphi(v)u \in E(Proj(P))$ โดยก่อนหน้านี้ $\varphi(v)$ ถูกระบายด้วยสีแดง และ u ก็ถูกระบายด้วยสีแดงเช่นกัน ทำให้ $u\varphi(v)$ เป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีแดง ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง

กรณีที่ 2: $v \in V(Proj(P_2))$ โดยก่อนหน้านี้ $\varphi^{-1}(v) \in V(Proj(P_1))$ ถูกระบายด้วยสีแดง จากบทนิยาม 3.2 (1) นั่นคือ $Proj(P_1)$ และ $Proj(P_2)$ สมมูลกัน เนื่องจาก $v\varphi(u) \in E(Proj(P_2))$ เป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีน้ำเงิน จะได้ว่า $\varphi^{-1}(v)u \in E(Proj(P_1))$ ต้องเป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีแดง ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง

ดังนั้น บ๊อบจึงเป็นผู้ชนะ □

จะเห็นว่าทรงตันเพลโต 5 รูปแบบ และทรงตันอาร์คิมิดีส 13 รูปแบบ มีระนาบสมมาตรเสมอ ดังนั้นบ๊อบมีกลยุทธ์ในการชนะเกมการระบายสีจุดยอดบนทรงตันดังกล่าวเสมอ จากทฤษฎีบท 3.3 โดยในตัวอย่างต่อไปเราจะแสดงว่าทรงตันเพลโตและทรงตันอาร์คิมิดีสมีระนาบสมมาตร

ตัวอย่าง 3.4 ให้ P เป็นทรง 8 หน้า จะได้ว่า $Proj(P)$ เป็นกราฟไม่ระบุทิศทางดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพฉายของทรง 8 หน้า

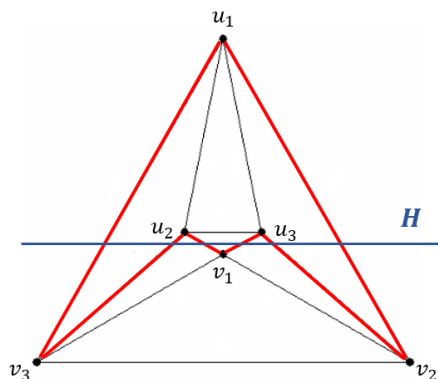
กำหนดให้ $V(Proj(P_1)) = \{u_1, u_2, u_3\}$ และ $V(Proj(P_2)) = \{v_1, v_2, v_3\}$

นิยามฟังก์ชัน $\varphi : V(Proj(P_1)) \rightarrow V(Proj(P_2))$ โดย $\varphi(u_i) = v_i$ สำหรับทุก $i = 1, 2, 3$ จะได้ว่า φ เป็นฟังก์ชันสมสัณฐานต่อไปเราจะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน φ สอดคล้องเงื่อนไขข้อที่ 2 ของระนาบสมมาตร ดังตารางที่ 3

uv	$\varphi(u)\varphi^{-1}(v)$
u_1v_2	v_1u_2
u_1v_3	v_1u_3
u_2v_1	v_2u_1
u_2v_3	v_2u_3
u_3v_1	v_3u_1
u_3v_2	v_3u_2

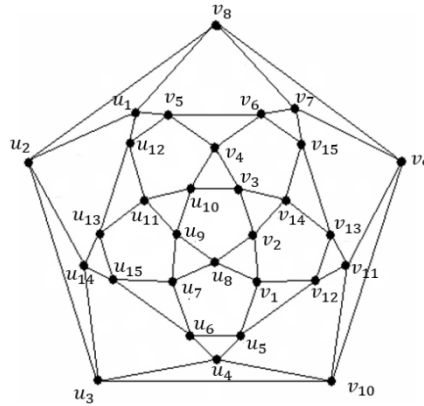
ตารางที่ 3 จุดยอดประชิดระหว่าง $Proj(P_1)$ และ $Proj(P_2)$ ในภาพฉายของทรง 8 หน้า

ดังนั้น กราฟของทรง 8 หน้าจึงมีระนาบสมมาตร ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพฉายของทรง 8 หน้า และระนาบสมมาตร

ตัวอย่าง 3.5 ให้ P เป็น icosidodecahedron จะได้ว่า $Proj(P)$ เป็นกราฟไม่ระบุทิศทางดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ภาพฉายของ icosidodecahedron

กำหนดให้ $V(Proj(P_1)) = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_{15}\}$ และ $V(Proj(P_2)) = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{15}\}$

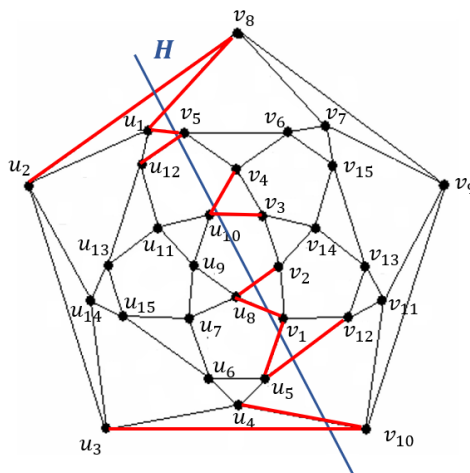
นิยามฟังก์ชัน $\varphi : V(Proj(P_1)) \rightarrow V(Proj(P_2))$ โดย $\varphi(u_i) = v_i$ สำหรับทุก $i = 1, 2, 3, \dots, 15$ จะได้ว่า φ เป็นฟังก์ชันสมสัณฐาน

ต่อไปเราจะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน φ สอดคล้องเงื่อนไขข้อที่ 2 ของระนาบสมมาตร ดังตารางที่ 4

uv	$\varphi(u)\varphi^{-1}(v)$	uv	$\varphi(u)\varphi^{-1}(v)$
u_1v_5	v_1u_5	u_8v_1	v_8u_1
u_2v_8	v_2u_8	u_8v_2	v_8u_2
u_3v_{10}	v_3u_{10}	$u_{10}v_3$	$v_{10}u_3$
u_4v_{10}	v_4u_{10}	$u_{10}v_4$	$v_{10}u_4$
u_5v_{12}	v_5u_{12}	$u_{12}v_5$	$v_{12}u_5$

ตารางที่ 4 จุดยอดประชิดระหว่าง $Proj(P_1)$ และ $Proj(P_2)$ ในภาพฉายของ icosidodecahedron

ดังนั้น กราฟ icosidodecahedron จึงมีระนาบสมมาตร ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ภาพฉายของ icosidodecahedron และระนาบสมมาตร H

4. เกมการระบายสีเส้นเชื่อม

ในบทนี้ เราจะนำเสนอกลยุทธ์ที่บ๊อบชนะเกมการระบายสีเส้นเชื่อมโดยใช้ 2 สีบนกราฟทรงตันเพลโตได้เสมอ

บทนิยาม 4.1 *ทรานกราฟ*ของทรงหลายหน้า P คือ กราฟเส้นของภาพฉายของ P เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $T(P)$ นั่นคือ $T(P) = L(Proj(P))$

บทนิยาม 4.2 ทรานกราฟของทรงหลายหน้า P เรียกว่า *ทรานกราฟสมมาตร* ถ้ามีส่วนตัดเส้นเชื่อม $E \subseteq E(T(P))$ ซึ่งแบ่ง $T(P)$ ออกเป็นสององค์ประกอบเชื่อมโยง เรียกว่า $T(P_1)$ และ $T(P_2)$ ซึ่งสอดคล้องเงื่อนไขดังนี้

1. มีฟังก์ชันสมสัณฐาน $\varphi : T(P_1) \rightarrow T(P_2)$ และ
2. สำหรับทุก $u \in V(T(P_1))$ และ $v \in V(T(P_2))$ จะได้ว่า $uv \in E$ ก็ต่อเมื่อ $\varphi(u)\varphi^{-1}(v) \in E$

ทฤษฎีบท 4.3 ให้ P เป็นทรงหลายหน้าที่มีทรานกราฟสมมาตร จะได้ว่า บ๊อบมีกลยุทธ์ในการชนะเกมการระบายสีเส้นเชื่อมบน P

บทพิสูจน์ ให้ P เป็นทรงหลายหน้าซึ่ง $T(P)$ เป็นทรานกราฟสมมาตร จากบทนิยาม 4.2 จะได้ว่า $T(P)$ มีส่วนตัดเส้นเชื่อม

$E \subseteq E(T(P))$ ซึ่ง $E(T(P)) - E$ มีสององค์ประกอบเชื่อมโยงให้ชื่อว่า $T(P_1)$ และ $T(P_2)$ และมีสมสัณฐาน $\varphi : T(P_1) \rightarrow T(P_2)$

เราจะพิสูจน์ว่าบ๊อบมีกลยุทธ์การชนะดังนี้ :

- ถ้าอลิสระบายสี $u \in V(T(P_1))$ แล้วบ๊อบต้องระบายสีตรงข้ามบน $\varphi(u) \in V(T(P_2))$
- ถ้าอลิสระบายสี $u \in V(T(P_2))$ แล้วบ๊อบต้องระบายสีตรงข้ามบน $\varphi^{-1}(u) \in V(T(P_1))$

สมมติให้อลิสระบายสีใดสีหนึ่งบน $u \in V(T(P))$ โดยไม่เสียเงินทั่วไป สมมติว่าอลิสระบายสี $u \in V(T(P_1))$ ด้วยสีแดง ต่อไปบ๊อบต้องระบายสี $\varphi(u) \in V(T(P_2))$ ด้วยสีน้ำเงิน สมมติให้บ๊อบเป็นผู้แพ้จากการเล่นในรอบนี้ แสดงว่ามี $v \in V(T(P))$ ซึ่ง $v\varphi(u) \in E(T(P))$ และ v เป็นสีน้ำเงิน

กรณีที่ 1: $v \in V(T(P_1))$ ดังนั้น $v\varphi(u) \in E$ จากบทนิยาม 4.2 (2) จะได้ว่ามี $u\varphi(v) \in E$ โดยก่อนหน้านี้ $\varphi(v)$ ถูกระบายด้วยสีแดงและ u ก็ถูกระบายด้วยสีแดงเช่นกัน ทำให้ $u\varphi(v)$ เป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีแดง ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง

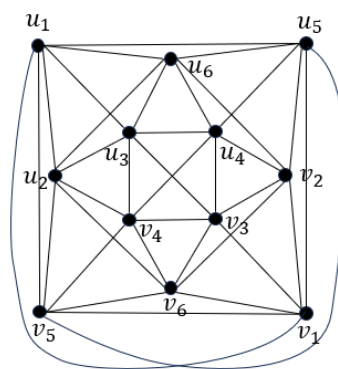
กรณีที่ 2: $v \in V(T(P_2))$ โดยก่อนหน้านี้ $\varphi^{-1}(v) \in V(T(P_1))$ ถูกระบายด้วยสีแดง จากบทนิยาม 3.2 (1) นั่นคือ $T(P_1)$ และ $T(P_2)$ สมสัณฐานกัน เนื่องจาก $v\varphi(u) \in E(T(P_2))$ เป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีน้ำเงิน จะได้ว่า $\varphi^{-1}(v)u \in E(T(P_1))$ ต้องเป็นเส้นเชื่อมระหว่างจุดยอดที่ระบายด้วยสีแดง ซึ่งเกิดข้อขัดแย้ง

ดังนั้น บ๊อบจึงเป็นผู้ชนะ

□

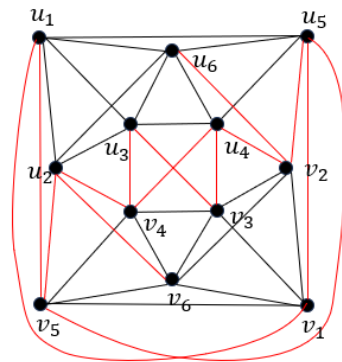
จะเห็นว่าทรงตันเพลโต 5 รูปแบบ มีทรานกราฟสมมาตรเสมอ ดังนั้นบ๊อบมีกลยุทธ์ในการชนะเกมการระบายสีจุดยอดบนทรงตันดังกล่าวเสมอ จากทฤษฎีบท 4.3 โดยในตัวอย่างต่อไปเราจะแสดงว่าทรงตันเพลโตมีทรานกราฟสมมาตร

ตัวอย่าง 4.4 ให้ P เป็นทรง 8 หน้า จะได้ว่า $T(P)$ เป็นกราฟไม่ระบุทิศทางดังรูปที่ 9

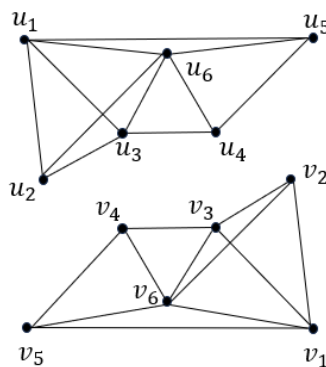


รูปที่ 9 ทรานกราฟของทรง 8 หน้า

กำหนดให้ $E = \{u_1v_1, u_1v_5, u_2v_4, u_2v_5, u_2v_6, u_3v_3, u_3v_4, u_4v_2, u_4v_3, u_4v_4, u_5v_1, u_5v_2, u_5v_5, u_6v_2\}$ ดังเส้นสีแดงในรูปที่ 10 และกำหนดให้ $V(T(P_1)) = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_6\}$ และ $V(T(P_2)) = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_6\}$ ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 ทรานกราฟของทรง 8 หน้า และส่วนตัดเส้นเชื่อม E



รูปที่ 11 กราฟ $T(P_1)$ และ $T(P_2)$ ของทรง 8 หน้า

นิยามฟังก์ชัน $\varphi : V(T(P_1)) \rightarrow V(T(P_2))$ โดย $\varphi(u_i) = v_i$ สำหรับทุก $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ จะได้ว่า φ เป็นฟังก์ชันสมสัณฐานต่อไปเราจะแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชัน φ สอดคล้องเงื่อนไขที่ 2 ทรานกราฟสมมาตร ดังตารางที่ 5

uv	$\varphi(u)\varphi^{-1}(v)$	uv	$\varphi(u)\varphi^{-1}(v)$
u_1v_1	v_1u_1	u_4v_2	v_4u_2
u_1v_5	v_1u_5	u_4v_3	v_4u_3
u_2v_4	v_2u_4	u_4v_4	v_4u_4
u_2v_5	v_2u_5	u_5v_1	v_5u_1
u_2v_6	v_2u_6	u_5v_2	v_5u_2
u_3v_3	v_3u_3	u_5v_5	v_5u_5
u_3v_4	v_3u_4	u_6v_2	v_6u_2

ตารางที่ 5 จุดยอดประชิดระหว่าง $T(P_1)$ และ $T(P_2)$ ใน ทรานกราฟของทรง 8 หน้า

ดังนั้น กราฟของทรง 8 หน้าจึงมีทรานกราฟสมมาตร

5. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้ 1) ในเกมระบายสีจุดยอดของกราฟทรงตันเพลโต และกราฟทรงตันอาร์คิมิดีส ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าผู้เล่นสองคนสลับกันระบายสีจุดยอด และจุดยอดที่ประชิดกันต้องมีสีต่างกัน โดยทฤษฎีบท 3.3 สำหรับทรงหลายหน้าที่มีระนาบสมมาตร จะได้ว่าผู้เล่นคนที่สองมีกลยุทธ์ในการชนะได้เสมอ และเนื่องจากทรงตันเพลโต และทรงตันอาร์คิมิดีสมีระนาบสมมาตร ดังนั้นผู้เล่นคนที่สองจึงมีกลยุทธ์ในการชนะเกมระบายสีจุดยอดของกราฟทรงตันเพลโต และกราฟทรงตันอาร์คิมิดีส ได้เสมอ

2) ในเกมระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟทรงตันเพลโต ภายใต้เงื่อนไขในการทำงานเดียวกัน โดยทฤษฎีบท 4.3 สำหรับทรงหลายหน้าที่มีทรงแกรฟสมมาตร จะได้ว่าผู้เล่นคนที่สองมีกลยุทธ์ในการชนะได้เสมอ และเนื่องจากทรงตันเพลโตมีทรงแกรฟสมมาตร ดังนั้นผู้เล่นคนที่สองจึงมีกลยุทธ์ในการชนะเกมระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟทรงตันเพลโต ได้เสมอ

6. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาเกมระบายสีจุดยอดซึ่งเป็นเกมที่มีผู้เล่นสองคนสลับกันระบายสีจุดยอดด้วยสี 2 สี ภายใต้เงื่อนไขว่าจุดยอดที่ประชิดกันต้องมีสีต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกมระบายสีเส้นเชื่อมซึ่งมีกติกาในการทำงานเดียวกัน โดยจะมีการพิสูจน์ว่าผู้เล่นคนที่สองมีกลยุทธ์ในการชนะได้เสมอ ทั้งในเกมระบายสีจุดยอดของกราฟทรงตันเพลโตและกราฟทรงตันอาร์คิมิดีส และเกมระบายสีเส้นเชื่อมของกราฟทรงตันเพลโต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Beaulieu, K. Burke and E. Duchêne, “Impartial coloring games,” *Congressus Numeranti*, Vol. 212, pp. 11-22, 2012.
- [2] C. J. Casselgren, “On some graph coloring problems,” Doctoral dissertation, Umeå University, Sweden, 2011.
- [3] N. T. Lam, I. Howard and L. Cui, “Path planning for the Platonic solids on prescribed grids by edge-rolling,” *PLoS ONE*, Vol. 16, No. 6, pp. 1-2, 2021.
- [4] X. Zhao and S. Chen, “Proper 2-coloring game on some trees,” *Theoretical Computer Science*, Vol. 778, pp. 1-18, 2019.

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการการทดสอบประตู หน้าต่าง และผนังกระจก ตามมาตรฐานมอก. และ ASTM

Evaluating the Carbon Footprint of Doors, Windows, and Glass Curtain Walls under TIS and ASTM Standards

ชนมน จันทนา^{1*} วังมา โพธิ์ทอง² และ ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่างและระบบผนังกระจกสำหรับงานอาคาร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Email: chanamon.c@ku.th; ²Email: fengwmp@ku.ac.th; ³Email: fengsrcp@ku.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (CFP) ในหน่วยของ kg CO₂e เฉพาะกระบวนการทดสอบการติดตั้งประตู หน้าต่าง และผนังกระจก โดยกำหนดค่า Functional unit (FU) เท่ากับพื้นที่ 1 m² ของขนาดผลิตภัณฑ์ โดยค่า CFP ของกระบวนการทดสอบสามารถนำไปรวมเป็นส่วนหนึ่งของ CFP ของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นๆ ขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) และ ASTM International ที่เกี่ยวข้อง การคำนวณใช้ข้อมูลจากการวัดและบันทึกค่าระหว่างปีพ.ศ. 2563 ถึง 2567 ของแต่ละผลิตภัณฑ์และนำมาเฉลี่ย การทดสอบจัดทำ ณ ห้องทดสอบของศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่าง และระบบผนังกระจก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ผลิตภัณฑ์ที่นำมาคำนวณค่า CFP ประกอบด้วยหน้าต่างบานเดี่ยวขนาด 80 ซม. X 100 ซม. หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน) (เลื่อน) ขนาด 160 ซม. x 100 ซม. ประตูบานเดี่ยวขนาด 100 ซม. X 200 ซม. ประตูบานเลื่อนขนาด 200 ซม. X 200 ซม. และผนังกระจก ขนาด 400 ซม. x 500 ซม. ผลที่ได้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า CFP มากที่สุดคือ ปริมาณซิลิโคนที่ผู้ประกอบการนำมาใช้ติดตั้งผลิตภัณฑ์เองที่ผู้ทดสอบ โดยมีสัดส่วนในค่า CFP ต่อ FU มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะผนังกระจกที่มีค่าสัดส่วนดังกล่าวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า ค่า CFP ของการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ASTM เนื่องจากมีขั้นตอนการทดสอบและรายละเอียดการทดสอบในบางขั้นตอนของมาตรฐานมอก. ที่มากกว่า ASTM การปรับปรุงผู้ทดสอบในอนาคตให้เป็นชนิดลดปริมาณการใช้ซิลิโคนได้

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์ ประตู หน้าต่าง ผนังกระจก มอก.

Abstract

. This research was conducted to calculate the Carbon Footprint of the Product (CFP), measured in kg CO₂e, specifically focusing on the installation and testing processes for doors, windows, and glass curtain walls, with the Functional Unit (FU) defined as 1 m² of product area. This CFP data is intended to be incorporated into the overall life cycle assessment of the manufactured products. The testing procedures strictly followed the requirements of

relevant Thai Industrial Standards (TIS) and ASTM International standards, utilizing data recorded from 2020 to 2024, and then averaged for each product. The testing was performed at the Door, Window, and Curtain Wall System Testing Center at Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, on a range of products including single-leaf windows (80 cm × 100 cm), double-leaf (sliding) windows (160 cm × 100 cm), single-leaf doors (100 cm × 200 cm), sliding doors (200 cm × 200 cm), and a glass curtain wall (400 cm × 500 cm). The results revealed that the most significant contributor to the CFP is the amount of silicone sealant used by the operator for product installation on the test chamber, accounting for over 50 percent of the total CFP per FU across all products, and exceeding 90 percent for the glass curtain wall. Furthermore, the CFP for testing under TIS standards was found to be higher than under ASTM standards, attributed to the TIS requiring more detailed and numerous testing steps. The study concludes by recommending the future modification of the test chamber to a reduced-volume pressure chamber to substantially minimize the required silicone sealant volume.

Keyword: Carbon footprint, Door, Window, Curtain wall, TIS

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

กระจกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้กับงานเปลือกอาคารทั้งอาคารขนาดเล็กและขนาดใหญ่ นำมาใช้เป็นบานประตู หน้าต่าง หรือ เป็นผนังอาคารที่เรียกว่าผนังกระจก หรือ Curtain Wall กระจกทำให้อาคารแลดูสวยงามทันสมัยสามารถบ่งบอกประเภทการใช้งานของอาคารได้ แสดงธรรมชาติสามารถผ่านกระจกเข้ามาในอาคารทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับไฟแสงสว่าง และผู้อยู่ในอาคารสามารถมองเห็นทัศนียภาพภายนอกได้ กระจกที่นำมาใช้มีหลายประเภทขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น กระจกเทมเปอร์ซึ่งจัดเป็นกระจกนิรภัยชนิดหนึ่ง ตามนิยามของ มอก. 965-2560 [1] หรือกระจกฉนวนที่ใช้ลดอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนผ่านผนังอาคาร โดยมีนิยามและข้อกำหนดการผลิตเป็นไปตาม มอก. 1231-2560 [2] เป็นต้น ทั้งนี้การติดตั้งกระจกจำเป็นต้องมีส่วนประกอบอื่นด้วย เพื่อให้การใช้งานเป็นไปตามวัตถุประสงค์และมีความปลอดภัยต่อการใช้งานที่สำคัญคือ วงกบและกรอบบาน

วงกบมีหน้าที่หลักในการช่วยยึดบานประตู หน้าต่างกับผนัง รับน้ำหนักและแรงกระแทกจากการใช้งาน ทำให้การใช้งานเป็นไปได้ อย่างสมบูรณ์และแข็งแรง กรอบบานคือส่วนที่เป็นโครงยึดวัสดุกรอบบาน เช่น กระจก วัสดุที่นิยมใช้ทำวงกบและกรอบบาน คือ ไม้ พิวซี และอะลูมิเนียม ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีที่แตกต่างกัน ไม้เนื้อแข็งมีความทนทานและสวยงาม เหล็กทำให้มีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อการกระแทก พิวซีมีคุณสมบัติกันน้ำและความชื้นได้ดี อะลูมิเนียมมีความแข็งแรง ทนทาน ไม่หดตัว น้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย สามารถออกแบบให้มีความสวยงามได้หลายรูปแบบ [3] จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แต่ค่าการนำความร้อนของอะลูมิเนียมสูงกว่าไม้และพิวซี ทำให้มีผลต่อการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารได้ นอกจากนี้การพิจารณาถึงผลกระทบของการผลิตผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถูกกำหนดให้เป็นวาระสำคัญทั้งในระดับสากลและประเทศ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) มีสาเหตุสำคัญจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิผิวโลกสูงขึ้น (Global warming) พิธีสารเกียวโต (Kyoto protocol) กำหนดให้ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ 7 ชนิดคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) ไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF₆) และไนโตรเจนฟลูออไรด์ (NF₃) สำหรับประเทศไทยได้กำหนดนโยบายให้บรรลุการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ภายในปี 2065 [4] และกำหนดให้องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก.เป็นองค์กรที่พัฒนามาตรฐานและส่งเสริมการใช้คาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับองค์กรและผลิตภัณฑ์

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ (Carbon Footprint of a Product: CFP) เป็นผลรวมของการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกของระบบผลิตภัณฑ์โดยตลอดชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Cradle to grave) แสดงในหน่วยมวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO₂e) ต่อหน่วยหน้าที่การทำงาน (Functional Unit หรือ FU) [5] เฉพาะประเด็นด้านการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนเท่านั้น ซึ่งต่าง

จากการคำนวณผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) ที่พิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อมในประเด็นอื่น ๆ ด้วย เช่น ความหลากหลายทางชีวภาพ (Biodiversity) และการเกิดฝนกรด (Acidification) เป็นต้น ทั้งนี้ การคำนวณ CFP สามารถคำนวณเฉพาะบางส่วนของผลิตภัณฑ์ หรือ Partial CFP ก็ได้ มีการศึกษา CFP ของโครงการรอบหน้าต่างที่ทำการจากอะลูมิเนียม ไม้ และพีวีซี ชนิด Cradle to gate [6] โดยกำหนด FU เป็นพื้นที่ 1 m² ของขนาดผลิตภัณฑ์ ผลจากการคำนวณพบว่าค่า CFP เรียงจากมากไปหาน้อยคือ อะลูมิเนียม พีวีซี และ ไม้ โดยค่า CFP ของโครงการรอบอะลูมิเนียมและพีวีซีมีค่าสูงกว่าไม้อยู่ 4 และ 2 เท่าตามลำดับ อย่างไรก็ตามการคำนวณค่า CFP ของกระบวนการทดสอบประตู หน้าต่าง และผนังกระจก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของค่า CFP ของการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ยังไม่มีการศึกษา ณ ปัจจุบัน

การติดตั้งประตูและหน้าต่าง สำหรับงานอาคารโดยเฉพาะอาคารสูง ถูกกำหนดให้ต้องมีการทดสอบต่าง ๆ เช่น การรั่วซึมของน้ำ การรั่วของอากาศ การโก่งตัว (การต้านทานแรงลม) การรับแรงพิกัด เป็นต้น เพื่อให้มีความปลอดภัยและถูกต้องตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยขั้นตอนและวิธีการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานมอก. กล่าวคือ มอก. 744-2563 สำหรับหน้าต่างกรอบอะลูมิเนียม มอก. 829-2563 สำหรับประตูกรอบอะลูมิเนียม มอก. 1043-2564 สำหรับหน้าต่างพีวีซี มอก. 3332-2564 และ มอก. 3584-2566 สำหรับผนังกระจก [7,8,9,10,11] หรือ มาตรฐานASTM โดยผู้ประกอบการเป็นผู้เลือกมาตรฐานการทดสอบระหว่าง มอก. และ ASTM และกระบวนการทดสอบตามมาตรฐานดังกล่าวข้างต้นไม่ขึ้นกับชนิดของกรอบบานโดยรายละเอียดการทดสอบระบุอยู่ในมาตรฐานแล้ว ทั้งนี้ระหว่างกระบวนการทดสอบมีการใช้พลังงานหรือสารที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น การใช้น้ำในการทดสอบการรั่วซึม การใช้พลังงานไฟฟ้าในอุปกรณ์ทางกล กล่าวคือ บั๊ม เครื่องอัดอากาศ การใช้ซิลิโคนในการติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ เป็นต้น และ ณ ปัจจุบันยังไม่มี การคำนวณค่า CFP ของกระบวนการทดสอบดังกล่าว ทั้งนี้ผลการคำนวณที่ได้จะนำมาเป็นข้อมูลให้กับผู้ประกอบการนำไปรวมกับค่า CFP ของกระบวนการการผลิตให้เป็นค่า CFP รวมของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคำนวณ CFP ของกระบวนการทดสอบผลิตภัณฑ์ประตู หน้าต่าง และผนังกระจก เพื่อนำไปรวมกับค่า CFP ของกระบวนการผลิตให้เป็นค่า CFP รวมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ เป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการสำหรับการส่งออกในอนาคต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ข้อมูลการทดสอบเฉพาะผลิตภัณฑ์ประตู หน้าต่าง และผนังกระจก ที่ทำการทดสอบ ณ ห้องทดสอบของศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่าง และระบบผนังกระจก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งได้รับแต่งตั้งเป็นห้องทดสอบของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ.) เพื่อรองรับการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. โดยวิธีการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของมอก.และ ASTM ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ตามที่ระบุข้างต้น

2. กำหนดค่า FU เป็นพื้นที่ 1 m² ของผลิตภัณฑ์ประตู หน้าต่าง และผนังกระจก

3. ประยุกต์ใช้ค่า Emission Factor ที่กำหนดโดยองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (อบก.) ในการคำนวณ [12]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบประกอบด้วย ประตู หน้าต่าง และ ผนังกระจก โดยการทดสอบประตูและหน้าต่างใช้ตู้ทดสอบจำนวน 2 ตู้ กล่าวคือ TC1 ขนาด 2.5 x 4.0 x 1.0 เมตร และ TC2 ขนาด 3.0 x 4.0 x 1.0 เมตร สำหรับผนังกระจกใช้ตู้ทดสอบ TC3 ขนาด 5.0 x 6.0 x 1.5 เมตร ผู้ขอทดสอบจะต้องติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ตู้ทดสอบเอง เวลาโดยประมาณสำหรับการติดตั้งผลิตภัณฑ์ประตูและหน้าต่าง ใช้เวลาจำนวน 2 วัน ผนังกระจกจำนวน 15 วัน และเมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้น ผู้ขอทดสอบเป็นผู้ทำการรื้อถอนเองเช่นกัน โดยใช้เวลา 1 วันสำหรับการรื้อถอนผลิตภัณฑ์ประตูและหน้าต่าง จำนวน 5 วันสำหรับผนังกระจก เมื่อติดตั้งเสร็จแล้วมีกระบวนการทดสอบล่วงหน้า 1 วัน และทำการทดสอบจริง 1 วัน การทดสอบล่วงหน้าเฉพาะการรั่วของอากาศและน้ำเท่านั้น



(a) ตู้ TC1



(b) ตู้ TC2



(c) ผลิตภัณฑ์หน้าต่างที่ทำการติดตั้ง



(d) ผลิตภัณฑ์ประตูที่ทำการติดตั้ง

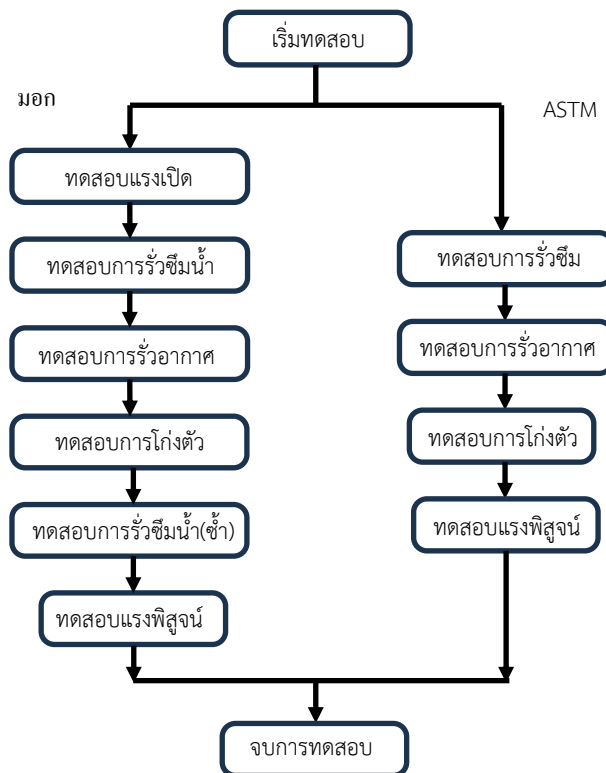


(e) ผลิตภัณฑ์กระจกที่ทำการติดตั้ง

รูปที่ 4 ตู้ทดสอบและผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้ง ณ ตู้ทดสอบ

ผังการทดสอบแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งผู้ทดสอบเป็นผู้กำหนดว่าจะทดสอบตามมาตรฐานมอก.หรือ ASTM หัวข้อการทดสอบมาตรฐาน และอุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้แสดงในตารางที่ 1 รายละเอียดการทดสอบแสดงอยู่ในมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ขนาดของชิ้นงานที่นำมาคำนวณค่า CFP เป็นต้น หน้าต่างบานเดี่ยวขนาด 80 ซม. X 100 ซม. หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน) ขนาด 160 ซม. X 100 ซม. ประตูบานเดี่ยวขนาด 100 ซม. X 200 ซม. ประตูบานเลื่อนขนาด 200 ซม. X 200 ซม. และผนังกระจก ขนาด 400 ซม. X 500 ซม. เนื่องจากเป็นขนาดมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไป สำหรับหัวข้อการทดสอบประกอบด้วย

1.การทดสอบแรงเปิด เป็นการทดสอบหาค่าแรงที่ใช้ในการเปิด โดยขนาดแรงต้องไม่เกินเกณฑ์ของแต่ละมาตรฐานกำหนด เครื่องมือที่ใช้ กระจกไฮดรอลิกขนาดเล็ก ใช้เวลาทดสอบประมาณ 10 นาที โดยการทดสอบแรงเปิดเฉพาะมาตรฐาน มอก.เท่านั้น



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการทดสอบประตู หน้าต่าง ผนังกระจก ตามมาตรฐานมอก.และ ASTM

2.การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ เป็นการทดสอบหาความสามารถป้องกันน้ำที่ความดันต่างๆ

2.1 มาตรฐาน ASTM ทดสอบที่ความดันระดับ 137 Pa ปริมาณน้ำ 3.4 ลิตร/นาที่/ตารางเมตร เป็นเวลา 15 นาที ใช้เวลารวม 20 นาที

2.2 มาตรฐาน มอก. ทดสอบ 5 ระดับความดัน 75, 120, 180, 240 และ 300 Pa ปริมาณน้ำ 3.5 ลิตร/นาที่/ตารางเมตร ระดับละ 5 นาที ใช้เวลารวม 40 นาที

3. การทดสอบการรั่วของอากาศ เป็นการทดสอบหาปริมาณการรั่วของอากาศจากผลิตภัณฑ์ ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐานต่างๆ

3.1 มาตรฐาน ASTM ทดสอบที่ความดันระดับ 75 Pa เฉพาะด้านบวก ใช้เวลารวม 10 นาที

3.2 มาตรฐาน มอก ทดสอบที่ความดัน 5 ระดับ 75, 120, 180, 240 และ 300 Pa โดยทดสอบด้านบวกและด้านลบ เวลารวม 30 นาที

4. การทดสอบการโก่งตัว/การต้านแรงลม เป็นการทดสอบหาการโก่งตัวของโครงสร้างผลิตภัณฑ์ ที่ความดันต่างๆ

4.1 มาตรฐาน ASTM ทดสอบที่ 4 ระดับความดัน 500, 1000, 1500, 2000 Pa ด้านบวกและด้านลบ ใช้เวลารวม 30 นาที

4.2 มาตรฐาน มอก ทดสอบที่ 5 ระดับความดัน 500, 800, 1200, 1600, 2000 Pa ด้านบวกและด้านลบ ใช้เวลารวม 30 นาที

5. การทดสอบแรงพิสูจน์ เป็นการทดสอบหาความทนทานของผลิตภัณฑ์ที่ความดันต่างๆ

5.1 มาตรฐาน ASTM ทดสอบที่ระดับความดัน 3000 Pa ด้านบวกและด้านลบ ใช้เวลารวม 10 นาที

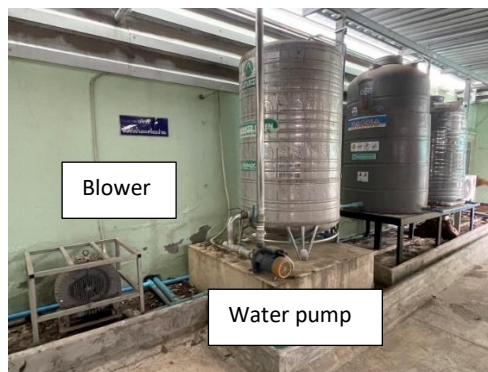
5.2 มาตรฐาน มอก ทดสอบที่ระดับความดัน 3000 Pa ด้านบวกและด้านลบ ใช้เวลารวม 10 นาที

อุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุปกรณ์หรือวัสดุที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนการทดสอบ

ลำดับ	ขั้นตอน	อุปกรณ์/วัสดุ				
		มอเตอร์ไฮดรอลิก	โบลเวอร์	ปั้มน้ำ	ไฟแสงสว่างในตู้ทดสอบ	วัสดุซีลซิลิโคน
1	ทดสอบแรงเปิดบาน	✓			✓	
2	ทดสอบการรั่วซึมน้ำ		✓	✓	✓	
3	ทดสอบการรั่วซึมอากาศ		✓		✓	
4	ทดสอบการโก่งตัว/การต้านแรงลม		✓		✓	
5	ทดสอบแรงพิสูจน์		✓		✓	
6	การติดตั้งผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบ					✓

หมายเหตุ มอเตอร์ไฮดรอลิกขนาด ¼ แรงม้า จำนวน 1 ตัว โบลเวอร์ขนาด 7.5 แรงม้า จำนวน 1 ตัว ปั้มน้ำขนาด 2 แรงม้า จำนวน 1 ตัว ไฟแสงสว่างตู้ TC1และ TC2 ขนาด 100 W จำนวน 2 ดวง ไฟแสงสว่าง ตู้TC3 ขนาด 500 W จำนวน 1 ดวง



รูปที่ 6 โบลเวอร์ ปั้มน้ำและถังน้ำที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ

สำหรับการใช้งานโบลเวอร์จะใช้อุปกรณ์ inverter ในการปรับกระแสทางเข้าเพื่อให้ได้ความดันตามที่ต้องการ ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการทดสอบผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทได้จากการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าในหน่วย kW-h ด้วยเครื่องมือวัดดังแสดงในรูปที่ 7 และนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละขนาดซึ่งเป็นข้อมูลที่รวบรวมและบันทึกไว้ทุกผลิตภัณฑ์ที่นำมาทดสอบระหว่างปีพ.ศ.2563 ถึง 2567 โดยมีจำนวนหน้าต่าง 75 ชั้น จำนวนประตู 30 ชั้น และจำนวนผนังกระจก 5 ชั้น สำหรับปริมาณซิลิโคนที่ใช้ติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ตู้ทดสอบได้จากการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้งานจริง



รูปที่ 7 การวัดและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด

การคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ GHG emission แสดงในสมการ (1) [13]

$$\text{GHG emissions} = \sum (\text{activity} \times \text{GHG emission factor}) \quad (1)$$

โดยสมการข้างต้นแสดงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยในหน่วยของมวลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg CO₂e) โดยเป็นผลคูณระหว่างกิจกรรมที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกและค่า emission factor ของกิจกรรมนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น การติดตั้งหน้าต่างบานเดี่ยวที่ตู้ทดสอบใช้ซิลิโคนเป็นสารยาแนวการติดตั้งจำนวน 0.960 kg โดยซิลิโคนมีค่า emission factor เท่ากับ 2.8640 ต่อ 1 kg ดังนั้น ค่า GHG emissions ของการติดตั้งซิลิโคนเท่ากับ 2.750 kg CO₂e และถ้านำค่าดังกล่าวมาหารด้วยพื้นที่ของหน้าต่างบานเดี่ยวขนาด 80 ซม. X 100 ซม.จะได้ค่า GHG emissions ต่อ FU เท่ากับ 3.438

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้การคำนวณ CFP เป็นการคำนวณเฉพาะการทดสอบการติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ให้ไปไปตามมาตรฐานซึ่งไม่รวมกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นชนิดของวัสดุโครงสร้างจึงไม่มีผลต่อการทดสอบและการคำนวณ ค่า CFP ของการติดตั้งผลิตภัณฑ์ด้วยซิลิโคนที่ตู้ทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) ของการใช้ซิลิโคนติดตั้งหน้าต่าง ประตู และผนังกระจก

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	ซิลิโคน		CFP (kg CO ₂ e)
		ปริมาณ (kg)	Emission factor (kg CO ₂ e/kg)	
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	0.960	2.8649	2.750
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	1.600	2.8649	4.584
3	ประตูบานเดี่ยว	2.560	2.8649	7.334
4	ประตูบานเลื่อน	3.200	2.8649	9.168
5	ผนังกระจก	16.000	2.8649	45.838

การทดสอบแรงเปิดบานเป็นข้อกำหนดเฉพาะมาตรฐานมอก.เท่านั้น โดยค่า emission factor เป็นของการใช้พลังงานไฟฟ้า ค่า CFP ของผลิตภัณฑ์ทุกประเภทมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) ของการทดสอบแรงเปิดบาน

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า		CFP (kg CO ₂ e)
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	
1	ทุกประเภท	3.108E-02	0.5986	1.861E-02

การทดสอบการรั่วซึม น้ำ ค่า emission factor ประกอบด้วยปริมาณการใช้น้ำและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งค่า CFP แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ โดยแยกเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM และ มอก.ทั้งนี้ปริมาณการใช้น้ำได้จากการคำนวณเนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ค่อนข้างน้อย โดยเป็นผลคูณระหว่างอัตราการไหลของปั๊มและเวลาที่ใช้

ตารางที่ 4.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การทดสอบการรั่วซึมน้ำเฉพาะการใช้น้ำ

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	น้ำ					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (m ³)	Emission factor (kg CO ₂ e/m ³)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (m ³)	Emission factor (kg CO ₂ e/m ³)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	1.813E-03	0.541	9.808E-04	1.867E-03	0.541	1.010E-03
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	3.627E-03	0.541	1.962E-03	3.733E-03	0.541	2.020E-03
3	ประตูบานเดี่ยว	4.533E-03	0.541	2.453E-03	9.333E-03	0.541	5.049E-03
4	ประตูบานเลื่อน	9.067E-03	0.541	4.905E-03	1.867E-02	0.541	1.010E-02
5	ผนังกระจก	4.533E-02	0.541	2.453E-02	9.333E-02	0.541	5.049E-02

ตารางที่ 4.2 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การทดสอบการรั่วซึมน้ำเฉพาะการใช้พลังงานไฟฟ้า

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	1.769	0.5986	1.059	2.287	0.5986	1.369
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	1.769	0.5986	1.059	2.287	0.5986	1.369
3	ประตูบานเดี่ยว	1.769	0.5986	1.059	3.281	0.5986	1.964
4	ประตูบานเลื่อน	1.769	0.5986	1.059	3.281	0.5986	1.964
5	ผนังกระจก	1.769	0.5986	1.059	3.281	0.5986	1.964

ค่า CFP ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทดสอบการรั่วซึมอากาศ การโค้งตัวและแรงพิสูจน์แสดงในตารางที่ 5,6 และ 7 ตามลำดับ
 ตารางที่ 5 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการทดสอบการรั่วของอากาศ

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	5.694E-03	0.5986	3.409E-03	9.944E-02	0.5986	5.952E-02
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	5.694E-03	0.5986	3.409E-03	9.944E-02	0.5986	5.952E-02
3	ประตูบานเดี่ยว	5.694E-03	0.5986	3.409E-03	9.944E-02	0.5986	5.952E-02
4	ประตูบานเลื่อน	5.694E-03	0.5986	3.409E-03	9.944E-02	0.5986	5.952E-02
5	ผนังกระจก	5.694E-03	0.5986	3.409E-03	9.944E-02	0.5986	5.952E-02

ตารางที่ 6 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการทดสอบการโก่งตัว/การต้านแรงลม

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	3.896E-02	0.5986	2.332E-02	2.419E-01	0.5986	1.448E-01
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	3.896E-02	0.5986	2.332E-02	2.419E-01	0.5986	1.448E-01
3	ประตูบานเดี่ยว	3.896E-02	0.5986	2.332E-02	2.419E-01	0.5986	1.448E-01
4	ประตูบานเลื่อน	3.896E-02	0.5986	2.332E-02	2.419E-01	0.5986	1.448E-01
5	ผนังกระจก	7.792E-02	0.5986	4.664E-02	2.419E-01	0.5986	1.448E-01

ตารางที่ 7 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การใช้พลังงานไฟฟ้าในขั้นตอนการทดสอบแรงพิกัด

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03
3	ประตูบานเดี่ยว	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03
4	ประตูบานเลื่อน	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03
5	ผนังกระจก	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03

การใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับไฟแสงสว่างแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งเป็นการคำนวณจากกำลังไฟฟ้าของหลอดไฟและเวลาใช้งาน พลังงานไฟฟ้าของการทดสอบประตูและหน้าต่างมีค่าเท่ากันเนื่องจากตู้ TC1 และ TC2 ใช้ขนาดหลอดไฟเท่ากัน แต่ผนังกระจกใช้กำลังหลอดไฟสูงกว่าและใช้เวลาติดตั้งและรื้อถอนนานกว่า

ตารางที่ 8 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) การใช้พลังงานไฟฟ้าจากไฟแสงสว่าง

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	พลังงานไฟฟ้า					
		ASTM			มอก.		
		ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)	ปริมาณ (kWh)	Emission factor (kg CO ₂ e/kWh)	CFP (kg CO ₂ e)
1	หน้าต่างและประตู ทุกประเภท	3.333E-02	0.5986	1.995E-02	6.333E-02	0.5986	3.791E-02
2	ผนังกระจก	1.425E-02	0.5986	8.530E-03	1.425E-02	0.5986	8.530E-03

ค่า CFP รวมของทุกระบวนการทดสอบของแต่ละผลิตภัณฑ์ คำนวณจากการรวม CFP ของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทในแต่ละมาตรฐานการทดสอบตั้งแต่ตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 8 แล้วหารด้วยค่า FU ซึ่งในที่นี้คือ พื้นที่ของผลิตภัณฑ์ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) ต่อ FU ของแต่ละผลิตภัณฑ์

ลำดับ	รายการ	พื้นที่ผลิตภัณฑ์ (m ²)	ผลรวมค่า CFP (kg CO ₂ e)		CFP ต่อหน่วย FU (kg CO ₂ e) / FU	
			ASTM	มอก	ASTM	มอก
1	หน้าต่างบานเดียว	0.8	3.866	4.390	4.832	5.487
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	1.6	5.700	6.224	3.563	3.890
3	ประตูบานเดียว	2	8.451	9.573	4.225	4.786
4	ประตูบานเลื่อน	4	10.287	11.411	2.572	2.853
5	ผนังกระจก	20	47.479	49.032	2.374	2.452

จากผลการคำนวณค่า CFP รวม ต่อ FU ของแต่ละผลิตภัณฑ์ในตารางที่ 9 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบค่า CFP ของผลิตภัณฑ์เดียวกัน ค่า CFP ของการทดสอบตามมาตรฐาน มอก.มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ASTM ทุกผลิตภัณฑ์เนื่องมาจากจำนวนขั้นตอนการทดสอบของสมอ.ที่มากกว่า ASTM กล่าวคือ มีการทดสอบแรงเปิดบานสำหรับมาตรฐาน มอก.ซึ่งไม่มีในมาตรฐาน ASTM นอกจากนี้ มาตรฐานมอก.ยังมีรายละเอียดการทดสอบที่มากกว่ามาตรฐาน ASTM เช่น การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ ซึ่งมาตรฐาน ASTM มีการทดสอบที่ความดันหนึ่งค่า แต่มาตรฐานมอก. มีการทดสอบที่ความดัน 5 ค่า เป็นต้น สำหรับค่า CFP ของการใช้พลังงานไฟฟ้าซึ่งในกรณีทั่วไปจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CFP ของผลิตภัณฑ์ แต่จากตารางที่ 5 ถึง 7 จะเห็นว่าค่า CFP ของพลังงานไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างน้อย (น้อยกว่า 1) เนื่องจากเวลาที่ใช้ทดสอบไม่มาก และการทดสอบในขั้นตอนในตารางที่ 5 ถึง 7 มีการใช้โบลเวอร์ประกอบการทดสอบซึ่งการทำงานของโบลเวอร์มีการใช้อินเวอร์เตอร์ในการปรับปริมาณกระแสให้สอดคล้องกับความดันแต่ละระดับในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 10 อัตราการใช้กระแสไฟฟ้าจึงสามารถลดลงได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่า CFP การใช้พลังงานไฟฟ้าของการทดสอบการรั่วซึมน้ำที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามีอัตราคงที่เท่ากับกำลังสูงสุดของปั้มน้ำ แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อค่า CFP ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด (มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์) พบว่าเป็นการใช้ซิลิโคนในการติดตั้งผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบดังแสดงสัดส่วนของ CFP ของซิลิโคนต่อค่า CFP รวม ของแต่ละผลิตภัณฑ์ในหน่วย kg CO₂e ดังแสดงในตารางที่ 11 โดยผลิตภัณฑ์ซิลิโคนมีส่วนในค่า CFP มากที่สุดเนื่องจากผนังกระจกมีขนาดใหญ่ทำให้ใช้ซิลิโคนปริมาณมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่น

ตารางที่ 10 อัตราการใช้กำลังของโบลเวอร์ที่การสร้างความดันต่าง ๆ

ความดัน (Pa)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลัง (kW)
75	5.4	2.05
120	4.3	1.63
160	3.8	1.44
240	3.5	1.33
300	3.5	1.33
500	3.5	1.33
800	3.6	1.37
1200	3.6	1.37
1600	3.8	1.44

2000	4.0	1.52
2400	4.2	1.60
3000	4.5	1.71

ตารางที่11 สัดส่วนค่า CFP ของซิลิโคนต่อค่า CFP รวมของผลิตภัณฑ์ในหน่วย kg CO₂e

ลำดับ	ผลิตภัณฑ์	สัดส่วนค่า CFP ของซิลิโคนต่อค่า CFP รวม	
		ASTM	มอก.
1	หน้าต่างบานเดี่ยว	0.711	0.626
2	หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)	0.804	0.737
3	ประตูบานเดี่ยว	0.868	0.766
4	ประตูบานเลื่อน	0.713	0.643
5	ผนังกระจก	0.965	0.935

4. สรุปผลการวิจัย

การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (CFP) ในหน่วย kg CO₂e เฉพาะกระบวนการทดสอบการติดตั้งประตู หน้าต่าง และผนังกระจกตามมาตรฐานการทดสอบของมอก.และ ASTM ได้ดำเนินการ ณ ห้องทดสอบของศูนย์ทดสอบประตู หน้าต่าง และระบบผนังกระจก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งได้รับแต่งตั้งเป็นห้องทดสอบของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ.) เพื่อรองรับการทดสอบผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. โดยผลการคำนวณที่ได้สามารถนำไปรวมกับค่า CFP ของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ที่ดำเนินการเองโดยผู้ประกอบการ ข้อมูลการทดสอบที่นำมาใช้คำนวณเป็นการทดสอบการติดตั้งผลิตภัณฑ์ขนาดดังนี้ หน้าต่างบานเดี่ยวขนาด 80 ซม. X 100 ซม. หน้าต่างบานคู่ (เลื่อน)(เลื่อน) ขนาด 160 ซม. X 100 ซม. ประตูบานเดี่ยวขนาด 100 ซม. X 200 ซม. ประตูบานเลื่อนขนาด 200 ซม. X 200 ซม. และผนังกระจก ขนาด 400 ซม. X 500 ซม. เนื่องจากเป็นขนาดมาตรฐานที่ใช้ทั่วไปในอาคาร กระบวนการทดสอบประกอบด้วย การทดสอบแรงเปิด การรั่วซึมของน้ำ การรั่วซึมอากาศ การโก่งตัว และแรงพิสูจน์ โดยขั้นตอนการทดสอบมาตรฐาน ASTM จะไม่มีขั้นตอนการทดสอบแรงเปิด และมีรายละเอียดการทดสอบในบางหัวข้อที่มีความแตกต่างกัน เช่น ความดันทดสอบในการทดสอบการรั่วซึมอากาศที่ตามมาตรฐานมอก. จะมีการกำหนดค่าความดันทดสอบที่มากกว่ามาตรฐาน ASTM เป็นต้น ข้อมูลที่นำมาคำนวณประกอบด้วยข้อมูลจากการวัดค่าพลังงาน และการคำนวณและนำมาเฉลี่ยสำหรับแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยเป็นข้อมูลการทดสอบระหว่างปีพ.ศ. 2563 ถึง พ.ศ. 2567 ผลจากการคำนวณพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า CFP มากที่สุดโดยมีสัดส่วนในค่า CFP มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ คือปริมาณซิลิโคนที่ใช้ติดตั้งผลิตภัณฑ์ ตัวทดสอบ โดยเฉพาะผนังกระจกที่มีค่าสัดส่วนดังกล่าวมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ของผนังกระจก ส่วนปัจจัยด้านพลังงานไฟฟ้ามีสัดส่วนที่น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากช่วงเวลาที่ทดสอบไม่มากนักทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยตามไปด้วย และค่า CFP ของการทดสอบตามมาตรฐานมอก.มีค่ามากกว่ามาตรฐาน ASTM เนื่องจากมีขั้นตอนการทดสอบและรายละเอียดการทดสอบที่มากกว่า

5. ข้อเสนอแนะ

1. การลดปริมาณการใช้ซิลิโคนในการติดตั้งผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยการปรับปรุงห้องทดสอบด้วยการลดปริมาตรของห้องสร้างความดัน

2.ภาครัฐดำเนินการมาตรการบังคับให้ผู้ประกอบการแสดงค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์เพื่อให้นโยบายการลดก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ของประเทศเกิดขึ้นได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระฉกเทมเปอร์ มอก. 965-2560, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2560.
- [2] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระฉกเทมฉนวน มอก. 1231-2560, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2561.
- [3] ดุษฎี อังคณาวิศิษฐ์, “ขนาดประตูลูมิเนียมกระฉกที่เหมาะสมที่สุดต่อการประหยัดวัสดุในการออกแบบอาคาร,” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2564.
- [4] สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.). (1 มกราคม 2565). การตั้งเป้าหมายของไทยเพื่อลดผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศตามแนวทางจากการประชุม COP 26. สืบค้นจาก <https://www.nxpo.or.th/th/9651/>.
- [5] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), ข้อกำหนดและแนวทางการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ พิมพ์ครั้งที่ 7, 2563.
- [6] A. Sinha and A. Kutnar, “Carbon Footprint versus Performance of Aluminum, Plastic, and Wood Window Frames from Cradle to Gate”, Vol. 2, pp. 542 - 553, 2012.
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วงกบและกรอบบานโลหะสำหรับประตูและหน้าต่าง: หน้าต่างอะลูมิเนียม มอก. 744-2563, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2563.
- [8] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วงกบและกรอบบานสำหรับประตูและหน้าต่าง: ประตูอะลูมิเนียม มอก. 829-2563, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2563.
- [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วงกบและกรอบบานพีวีซีสำหรับประตูและหน้าต่าง: หน้าต่าง มอก. 1043-2564, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564.
- [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม วงกบและกรอบบานพีวีซีสำหรับประตูและหน้าต่าง: ประตู มอก. 3332-2564, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564.
- [11] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ผนังกระฉก มอก. 3584-2566, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2566.
- [12] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), Emission Factor (CFP). สืบค้นจาก <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>
- [13] นกสร ศรีจันทร์, “การประเมินเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์และสมดุลคาร์บอนของเกษตรอินทรีย์และเกษตรใช้สารเคมี,” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2565.

ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

Educational Demonstration Kit of Four Wheel Steering System driven by Hydraulic System

จิรพงศ์ จีบกล้า¹ กษิติศ ดั่งบาง¹ ประดิษฐ์ ฉายแสง¹ และ จักรกฤษณ์ เคลือบวัง^{2*}

¹สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรม (วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

²หน่วยวิจัยพลังงานไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

¹Email: Jeeraphong@rmutl.ac.th; ¹Email: kasidit_do66@live.rmutl.ac.th; ¹Email: pradit_pr66@live.rmutl.ac.th;

²*Email: jukkrit_k@rmutl.ac.th, *Corresponding Author

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์ สำหรับใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในรายวิชาเครื่องกลและส่งกำลัง หลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างยนต์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ชุดสาธิตนี้พัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาความขาดแคลนสื่อการเรียนการสอนที่ทันสมัยและใช้งานได้จริง เนื่องจากสื่อการสอนมีเพียงระบบบังคับเลี้ยว 2 ล้อ ซึ่งไม่ครอบคลุมกับเทคโนโลยีระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ในปัจจุบัน การวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การประเมินคุณภาพชุดสาธิตโดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน และการหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาแบบเฉพาะเจาะจง 8 คน ด้วยการออกแบบการทดลองแบบวัดผลก่อนและหลังเรียน

ผลการประเมินคุณภาพชุดสาธิตโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าชุดสาธิตมีความเหมาะสมและคุณภาพโดยรวมอยู่ในระดับดี ถึง ดีมาก เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่าด้านโครงสร้างอยู่คุณภาพระดับ ดี ($\bar{X}$ = 4.20, S.D. = 0.70) ด้านการนำไปใช้ประโยชน์: คุณภาพระดับ ดีมาก ($\bar{X}$ = 4.57, S.D. = 0.63) ด้านเอกสารประกอบการสอน: คุณภาพระดับ ดี ($\bar{X}$ = 4.37, S.D. = 0.56) แบบประเมินนี้ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงตามเนื้อหา โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) อยู่ระหว่าง 0.80 ถึง 1.00

ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษา พบว่า คะแนนเฉลี่ยหลังการใช้ชุดสาธิตเท่ากับร้อยละ 85.83 ซึ่งสูงกว่าคะแนนเฉลี่ยก่อนเรียน ร้อยละ 15.42 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($t = 15.68$) โดยสรุปแล้ว ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์ มีประสิทธิภาพสูงในการเพิ่มผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนรู้ และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง

คำสำคัญ : ระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อ // ระบบไฮดรอลิกส์ // การหาผลสัมฤทธิ์ // ชุดการสอนเพื่อการศึกษา

Abstract

This research aims to develop and evaluate a 4-wheel hydraulic steering system demonstration kit as a technical practical kit in the chassis and power transmission course of the higher vocational certificate program in mechanical power technology at Rajamangala University of Technology Lanna, Tak. This technical practical kit was developed to address the shortage of modern and practical instructional materials, as current teaching materials only cover 2-wheel steering systems, which do not encompass current 4-wheel steering technology. The research methodology is divided into two parts: an evaluation of the technical practical kit quality conducted by five experts by 5 experts and determining the learning achievement of 8 students using a pre- and post-test experimental design.

The results of the expert evaluation showed that the overall appropriateness and quality of the technical practical kit were rated at a good to very good level. In detail, the structural aspect was rated as good quality ($\bar{x} = 4.20$, S.D. = 0.70), the practical application aspect was rated as very good quality ($\bar{x} = 4.57$, S.D. = 0.63), and the teaching materials aspect was rated as good quality ($\bar{x} = 4.37$, S.D. = 0.56). This evaluation form passed content validity testing, with an Index of Content Validity (IOC) between 0.80 and 1.00.

The analysis of student learning achievement showed that the average score after using the technical practical kit was 85.83%, which was significantly higher than the average score before using the kit by 15.42% at the 0.05 significance level ($t = 15.68$). In conclusion, the 4-wheel hydraulic steering system technical practical kit was highly effective in improving student learning achievement and was highly suitable for application as an instructional material at the Higher Vocational Certificate level.

Keyword: four-wheel steering system, hydraulic system, learning achievement, educational demonstration kit

1. บทนำ

รถยนต์ทำหน้าที่ขนย้ายคนและสิ่งของจากสถานที่หนึ่งไปยังอีกสถานที่หนึ่ง การเคลื่อนที่ดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยต้นกำลังและระบบบังคับเลี้ยว เทคโนโลยีการบังคับเลี้ยวจึงอยู่คู่กับเทคโนโลยียานยนต์มาอย่างยาวนาน [1] สำหรับนักศึกษาสาขาที่เกี่ยวข้องยานยนต์จึงจำเป็นต้องได้เรียนรู้เกี่ยวกับระบบบังคับเลี้ยวอยู่ด้วยเสมอ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อมีมาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 20 โดยเริ่มจากการทดลองใช้ในรถยนต์ขนาดใหญ่ และ ยานพาหนะทางทหาร เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมทิศทาง [2] ต่อมาในราว ค.ศ. 1980 ระบบนี้เริ่มถูกนำมาใช้งานทางอุตสาหกรรมยานยนต์โดยเฉพาะในรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ของบริษัทผู้ผลิตรถยนต์จากค่ายญี่ปุ่น เช่น ฮอนด้า นิสสัน และ มาสด้า สำหรับรถยนต์รุ่นแรกที่ถูกใช้ระบบ 4 ล้อ (four wheel steering) ได้แก่ ฮอนด้า รุ่นพรีลูด (honda prelude, 1987) [3] ซึ่งใช้ระบบบังคับเลี้ยวล้อหลังแบบกลไก ต่อมา นิสสัน รุ่นสกายไลน์ มิสซู รุ่น กาแลนซ์ และ มาสด้า รุ่น 626 ก็เริ่มใช้เทคโนโลยี 4 ล้อ เช่นกัน ต่อมาช่วงปี ค.ศ. 2000 ระบบ 4 ล้อ ได้รับการพัฒนาให้เป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เซ็นเซอร์และหน่วยควบคุมอัจฉริยะเพื่อปรับมุมล้อหลังให้เหมาะสมกับความเร็วและสถานการณ์ ทำให้ระบบมีความแม่นยำและตอบสนองได้ดีขึ้น รถยนต์หรู เช่น BMW series 7 และ Mercedes-Benz S-Class เริ่มนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ ปัจจุบัน ระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและใช้งานในรถยนต์สมรรถนะสูงและรถยนต์ไฟฟ้า เช่น Porche 911, Lamborghini Aventador, Ferrari SF90 Stradale และ Tesla Model S Plaid โดยมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มเสถียรภาพและความคล่องตัวในการขับขี่

แม้ว่าระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ จะถูกนำมาใช้ในรถยนต์สมรรถนะสูงและรถยนต์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในปัจจุบัน แต่สื่อการสอนในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก ยังขาดแคลนและปัจจุบันการเรียนการสอนเน้นไปที่ระบบบังคับเลี้ยวสองล้อแบบดั้งเดิม ทำให้การเรียนการสอนไม่ทันต่อเทคโนโลยีในยุคปัจจุบัน นักศึกษาจึงขาดโอกาสในการเรียนรู้และฝึกปฏิบัติกับระบบ 4 ล้อ ที่ใช้ระบบไฮดรอลิกส์เป็นกลไกสำคัญ โดยเฉพาะกลุ่มนักศึกษาที่จบระดับมัธยมศึกษา ม.6 ซึ่งขาดทักษะและความเข้าใจเชิงช่างเทคนิค

คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์ ขึ้นจากครุภัณฑ์หัวเก๋งยานยนต์ 2 หัว ประกอบดัดแปลงเป็นรถจริง เพื่อเป็นสื่อการสอนในรายวิชา งานเครื่องล่างและส่งกำลัง ชุดสาธิตนี้มีความโดดเด่นที่สามารถแสดงผลการทำงานของจริงของระบบไฮดรอลิกส์ที่ส่งผลต่อการบังคับเลี้ยวล้อหน้าหรือล้อหลังได้หลากหลายรูปแบบซึ่งแตกต่างจากสื่อการสอนจำลองหรือภาพนิ่งแบบเดิม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน
- 1.2.2 เพื่อประเมินหาคุณภาพของชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน
- 1.2.3 เพื่อหาผลสัมฤทธิ์ของชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เอกสารประกอบชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน ประกอบด้วย

- 1.3.1.1 ใบเนื้อหา
- 1.3.1.2 ใบแบบฝึกหัด ใบเฉลยแบบฝึกหัด
- 1.3.1.3 ใบแบบทดสอบ ใบเฉลยแบบทดสอบ
- 1.3.1.4 สื่อการสอน Power point

- 1.3.2 ชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอนประกอบด้วย

- 1.3.2.1 หัวรถถังครึ่งคัน ยี่ห้อโตโยต้า รุ่นโคโลน่า จำนวน 2 หัว
- 1.3.2.2 วาล์วไฮดรอลิกส์ ชนิด 4/3 ควบคุมด้วยไฟฟ้า จำนวน 1 ตัว
- 1.3.2.3 สายไฮดรอลิกส์และชุดข้อต่อขนาด 5 หุน จำนวน 1 ชุด
- 1.3.2.4 ชุดปั๊มไฮดรอลิกส์พวงมาลัยขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ จำนวน 1 ชุด
- 1.3.2.4 ชุดแร็กพวงมาลัยสำหรับมีระบบผ่อนแรงด้วยของเหลว จำนวน 2 ชุด

- 1.3.3 หาคุณภาพของชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอนโดยการประเมินจาก

ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ไม่ต่ำกว่า 5 ปี ด้านครุศาสตร์อุตสาหกรรมวิศวกรรมเครื่องกลและระบบไฮดรอลิกส์ 3 ท่าน และ

ผู้เชี่ยวชาญด้านการวัดผลและประเมินผลการเรียนรู้ 2 ท่าน ผ่านเกณฑ์การประเมินในระดับดี คะแนนไม่ต่ำกว่า 3.5

- 1.3.4 หาผลสัมฤทธิ์ของชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอนจากประชากรกลุ่ม

ตัวอย่างเชิงสำรวจกลุ่มนักร้องแบบเฉพาะเจาะจงนักศึกษาแผนกช่างยนต์ ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง ชั้นปีที่ 1 (ที่สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษา ชั้นปีที่ 6) ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก โดยมีผลสัมฤทธิ์ร้อยละ 85

1.4 ระยะเวลาดำเนินงาน วันที่ 17 พฤศจิกายน 2567 ถึง 10 มีนาคม 2568

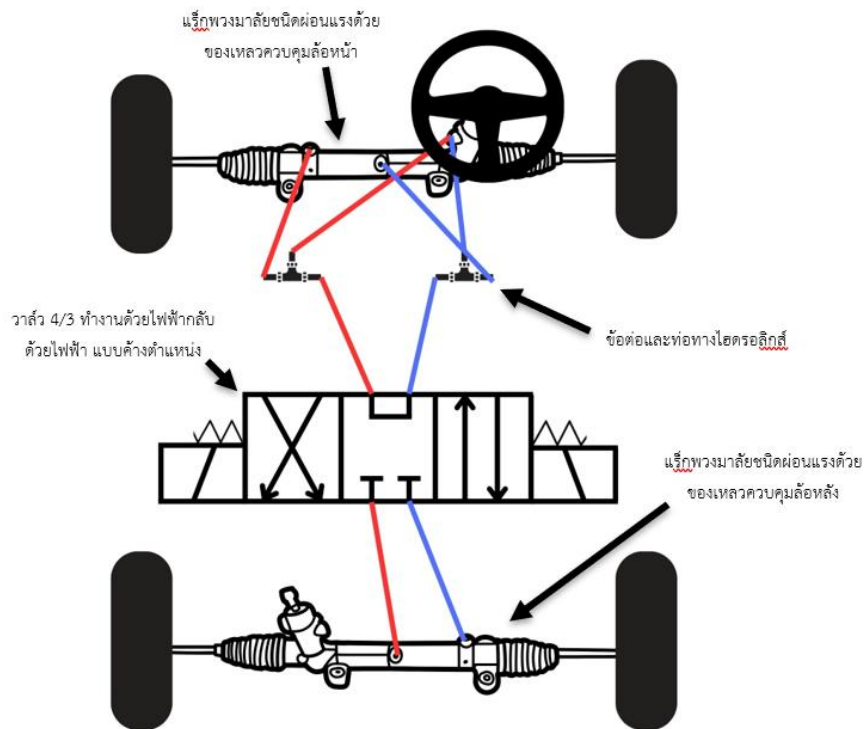
2. วิธีดำเนินการวิจัย

- 2.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์

- 2.2 ออกแบบชุดสาธิตระบบบังคับลิ้น 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์ รายละเอียดทางเทคนิคเพิ่มเติมชุดสาธิตนี้ใช้ชุดคันชัก

คันส่งจากรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2 ชุด ระบบไฮดรอลิกส์ประกอบด้วยปั๊มไฮดรอลิกส์แบบคงที่ (Fixed Displacement Pump) และ

วาล์วควบคุมทิศทางแบบ 4/3 โดยถูกออกแบบให้ทำงานที่แรงดันสูงสุด 50 bar (725 psi) และมีอัตราการไหลประมาณ 10 ลิตร/นาที เพื่อให้มั่นใจในความปลอดภัยขณะใช้งาน [8-9]



รูปที่ 1 วงจรไฮดรอลิกส์สำหรับชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ

ระบบไฮดรอลิกส์สำหรับระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย ชุดคันชักคันส่งจำนวน 2 ชุด และระบบไฮดรอลิกส์จำนวน 1 ระบบ รถยนต์ปกติจะติดตั้งชุดคันชักคันส่งอยู่บริเวณล้อคู่หน้า สำหรับงานวิจัยนี้จึงดัดแปลงรถ โดยใช้หัวเก๋ง จำนวน 2 ชุด ที่ประกอบด้วยชุดคันชักคันส่งติดตั้งอยู่แล้ว เก๋งละ 1 ชุด มาต่อท้ายติดกัน ได้เป็นต้นแบบรถที่มีชุดคันชักคันส่ง ทั้งชุดล้อหน้าและชุดล้อหลัง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์

2.3 สร้างชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์



(ก)



(ข)

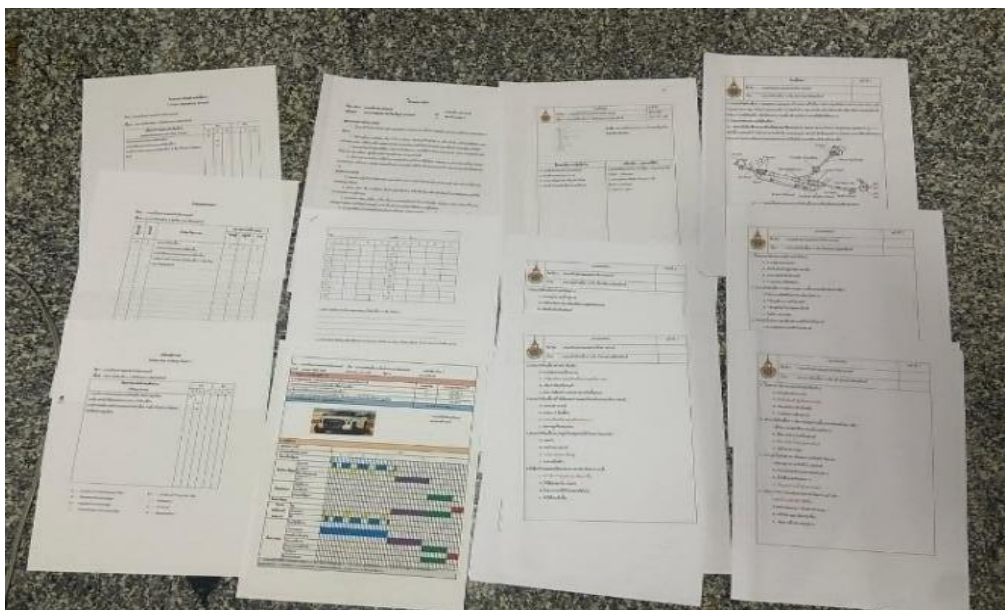
รูปที่ 3 การประกอบอุปกรณ์ (ก) ไฮดรอลิกส์ และ (ข) ระบบบังคับเลี้ยว
การติดตั้งระบบไฮดรอลิกส์และระบบบังคับเลี้ยวแสดงดังรูปที่ 3 (ก) และ รูปที่ 3 (ข) ตามลำดับ

2.4 การหาคุณภาพชุดสัทธิระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน การคัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ: ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ถูกคัดเลือกตามเกณฑ์คุณสมบัติ ได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านครุศาสตร์อุตสาหกรรมวิศวกรรมเครื่องกลและระบบไฮดรอลิกส์ 3 ท่าน และผู้เชี่ยวชาญด้านการวัดผลและประเมินผลการเรียนรู้ 2 ท่าน เครื่องมือวิจัย ใช้แบบประเมินคุณภาพชุดสัทธิ 3 ด้าน คือ ด้านโครงสร้าง ด้านการใช้งาน และด้านเอกสารประกอบการสอน ซึ่งเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ (Rating Scale) แบบประเมินนี้ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงตามเนื้อหา (Content Validity) โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) อยู่ระหว่าง 0.80 ถึง 1.00 [4-5]

The image shows five copies of the Content Validity Index (IOC) form, each with a table for rating 10 items on a scale of 1 to 5. The items are related to the quality of the learning material. The forms are signed by different experts, indicating their individual ratings and comments.

รูปที่ 4 แบบประเมินคุณภาพชุดสัทธิระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

2.5 หาคุณภาพเอกสารประกอบการสอนของชุดสัทธิระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน



รูปที่ 5 เอกสารประกอบการสอนของชุดสัทธิระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

2.6 หาผลสัมฤทธิ์ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์ กลุ่มตัวอย่างและแผนการทดลอง ใช้แบบเฉพาะเจาะจงนักศึกษาระดับ ปวส. สาขาวิชาช่างยนต์ ปี 1 จำนวน 8 คน ที่จบระดับมัธยมศึกษา ม.6 ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเชิงสำรวจกลุ่มนำร่อง) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของชุดสาธิต แผนการทดลองที่ใช้คือ การวัดผลก่อนและหลังการทดลองในกลุ่มเดียว เครื่องมือวัดผลสัมฤทธิ์ใช้แบบทดสอบชนิดปรนัย 4 ตัวเลือก จำนวน 30 ข้อ (รวมคะแนนเต็ม 60 คะแนน) แบบทดสอบนี้มีค่าความเชื่อมั่นของเครื่องมือที่ 0.85

วิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์โดยการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยก่อนเรียนและหลังเรียน และใช้ สถิติทดสอบ t-test สำหรับกลุ่มตัวอย่างที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าผลสัมฤทธิ์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [6-7]



รูปที่ 6 การทดสอบเพื่อหาผลสัมฤทธิ์ของชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การประเมินชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การหาคุณภาพชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์ และ การหาผลสัมฤทธิ์ของชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์

3.1 การหาคุณภาพชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์

ตาราง 3.1 ผลการหาคุณภาพชุดด้านโครงสร้างชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1.ความปลอดภัยของชิ้นงาน	4.00	0.71	ดี
2.การเลือกใช้วัสดุ อุปกรณ์ ในการสร้างชุดสาธิตได้อย่างเหมาะสม	4.00	0.71	ดี
3. ความเหมาะสมของการออกแบบชุดสาธิตโดยรวม	4.40	0.55	ดี
4. ความสะดวกในการบำรุงรักษา	4.40	0.89	ดี
ค่าเฉลี่ย	4.20	0.70	ดี

ตาราง 3.2 ผลการใช้งานชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. ความสะดวกในการใช้งานชุดสาธิต	4.60	0.55	ดีมาก
2. ประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานด้านการเรียนการสอน	4.40	0.55	ดี

3. ความเอื้ออำนวยต่อการเรียนการสอน	4.40	0.89	ดี
4. ชุดสาธิตสามารถนำไปใช้งานได้จริง	5.00	0.00	ดีมาก
5. ชุดสาธิตมีความปลอดภัยในการสาธิต	4.40	0.89	ดี
6. ชุดสาธิตสามารถแสดงการบังคับเลี้ยวได้หลายรูปแบบ	4.60	0.55	ดีมาก
ค่าเฉลี่ย	4.57	0.63	ดีมาก

ตาราง 3.3 ผลการหาคุณภาพของด้านเอกสารประกอบชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. ความเหมาะสมของใบเนื้อหา	4.20	0.45	ดี
2. ใบแบบทดสอบ	4.20	0.45	ดี
3. ความเหมาะสมของสื่อ power point	4.40	0.55	ดี
4. ใบแบบฝึกหัด	4.60	0.55	ดีมาก
5. ความถูกต้องของใบเฉลยแบบทดสอบ	4.40	0.55	ดี
6. ความถูกต้องของใบเฉลยแบบฝึกหัด	4.40	0.89	ดี
ค่าเฉลี่ย	4.37	0.56	ดี

3.2 การวิเคราะห์ผลสัมฤทธิ์ของชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

ตาราง 3.4 คะแนนของใบแบบฝึกหัดก่อนเรียนและหลังเรียนด้วยชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน

ลำดับนักศึกษา	ก่อนเรียน	หลังเรียน
	คะแนนเต็ม 60 คะแนน	คะแนนเต็ม 60 คะแนน
1	4	45
2	9	53
3	9	52
4	11	54
5	12	55
6	9	51
7	10	50
8	10	52
คะแนนรวม	74	412
ร้อยละ	15.42	85.83
ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$)	9.25	51.0

ตาราง 3.5 ผลการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

การทดสอบ	ค่า t	ค่า p	ระดับนัยสำคัญ
เปรียบเทียบ $\bar{X}$ ก่อน - หลังเรียน	15.68	< 0.001	มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $\alpha=0.05$

สรุปทางสถิติ : ผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังการใช้ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบไฮดรอลิกส์เพื่อการเรียนการสอน สูงกว่าก่อนการใช้ชุดสาธิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3.3 การอภิปรายผล

3.3.1 ด้านคุณภาพชุดสาธิต: ชุดสาธิตได้รับคะแนนประเมินคุณภาพโดยรวมในระดับดีถึงดีมาก ($\bar{X}=4.20 - 4.57$) โดยเฉพาะด้านการนำไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับระดับดีมาก ผลนี้สอดคล้องกับแนวคิดของ (ทศนา แคมมณี, 2550) ที่ระบุว่าสื่อการสอนที่เป็นรูปธรรม (Concrete) และสามารถใช้งานได้จริง จะช่วยส่งเสริมความเข้าใจของผู้เรียนได้ดีกว่าสื่อที่เป็นนามธรรม

3.3.2 ด้านผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน: ผลสัมฤทธิ์หลังเรียน (85.83%) สูงกว่าก่อนเรียน (15.42%) และผ่านเกณฑ์ที่กำหนด โดยผลการทดสอบ t - test ยืนยันว่าผลแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ การที่ผลสัมฤทธิ์สูงขึ้นอย่างชัดเจนนี้เกิดจากการที่ชุดสาธิตซึ่งเป็นรถยนต์ดัดแปลงของจริงทำให้นักศึกษาสามารถมองเห็นและทำความเข้าใจการทำงานของระบบไฮดรอลิกส์และส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ 4 ล้อ ได้อย่างเป็นรูปธรรม ซึ่งเป็นไปตามแนวทางการสอนแบบสาธิต (Demonstration Teaching) [6]

3.3.3 ข้อจำกัดของงานวิจัยข้อจำกัดหลักคือขนาดของกลุ่มตัวอย่างนักศึกษาที่มีจำนวนน้อย ($n=8$) เนื่องจาก เป็นนักศึกษา กลุ่มที่จบจากชั้นมัธยมศึกษา ม.6 มีจำนวน 8 คน จากนักศึกษาทั้งห้อง ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการสรุปผลสู่ประชากรทั้งหมด และชุดสาธิตยังเป็นต้นแบบที่ใช้ระบบไฮดรอลิกส์ควบคุมด้วยไฟฟ้าเท่านั้น ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงระบบ 4 ล้อ แบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าและทันสมัยกว่า

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 การหาคุณภาพชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์ จากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ได้ผลการประเมินด้านโครงสร้างของชุดสาธิต เป็นค่าเฉลี่ย ที่ 4.20 อยู่ในระดับดี และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.70 ด้านการใช้งานชุดสาธิต ค่าเฉลี่ย 4.57 อยู่ในระดับดีมาก และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.63 ด้านเอกสารประกอบชุดสาธิต ค่าเฉลี่ย 4.37 อยู่ในระดับดี และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.56

4.2 การหาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนด้วยชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์ จากนักศึกษา 8 คน พบว่าผลสัมฤทธิ์หลังการเรียนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ที่ร้อยละ 85 โดยผลสัมฤทธิ์ก่อนเรียนมีค่าเฉลี่ยที่ร้อยละ 15.42 ส่วนผลสัมฤทธิ์หลังเรียนให้ค่าเฉลี่ยร้อยละ 85.83 การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย t - test ยืนยันว่าผลสัมฤทธิ์หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($t=15.68, p<0.001$) ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานการทดลองที่ตั้งไว้

4.3 ข้อจำกัดที่พบในการวิจัยนอกจากข้อจำกัดด้านขนาดของกลุ่มตัวอย่างแล้ว ชุดสาธิตที่พัฒนาขึ้นนี้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้เชิงปฏิบัติ ระบบไฮดรอลิกส์เป็นการควบคุมด้วยไฟฟ้าเท่านั้น ทำให้ไม่ครอบคลุมเทคโนโลยี 4 ล้อ แบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ก้าวหน้ากว่า รวมถึงความจำเป็นในการพิจารณาต้นทุนและความยุ่งยากในการบำรุงรักษาในระยะยาว เนื่องจากเป็นยานยนต์ดัดแปลงของจริง

5. ข้อเสนอแนะ

ชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อด้วยระบบไฮดรอลิกส์ที่นำเสนอ เป็นต้นแบบยานยนต์ดัดแปลงของจริงที่พัฒนาขึ้น เพื่อเป็นสื่อการเรียนการสอนสำหรับนักศึกษา ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรมีการส่งเสริมให้มีการใช้งานสำหรับนักศึกษาให้หลากหลายกลุ่มและจำนวนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาต่อยอดดังนี้

5.1 ควรมีการวิจัยเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนระหว่างชุดสาธิตที่พัฒนาขึ้นนี้กับสื่อการสอนแบบเดิม (เช่น การบรรยายประกอบภาพนิ่ง) เพื่อยืนยันประสิทธิผลอย่างชัดเจน

5.2 ควรพัฒนาชุดสาธิตระบบบังคับเลี้ยว 4 ล้อ ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีในรถยนต์รุ่นใหม่

5.3 ควรมีการประเมินต้นทุนและความคุ้มค่าในการบำรุงรักษาชุดสาธิต เพื่อเป็นข้อมูลเชิงปฏิบัติสำหรับสถาบันการศึกษาอื่นที่จะนำไปใช้งานจริง

5.4 ควรมีการจัดทำคู่มือการใช้งานและการบำรุงรักษาชุดสาธิตอย่างละเอียด เพื่อให้มั่นใจว่าสื่อการสอนจะสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องและมีความปลอดภัยสูงสุด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ระบบบังคับเลี้ยว. (9 กันยายน 2568). สืบค้นจาก http://en.wikipedia.org/wiki/Power_steering.
- [2] ระบบบังคับเลี้ยวสี่ล้อ. (9 กันยายน 2568). สืบค้นจาก http://en.wikipedia.org/wiki/Four-Wheel_drive
- [3] ฮอนด้า 프리ลูด. (9 กันยายน 2568). สืบค้นจาก http://en.wikipedia.org/wiki/Honda_Prelude
- [4] อารมณ์ ใจเที่ยง (2550). นวัตกรรมการศึกษา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- [5] ชานูชัย ยมดิษฐ์ (2548). กระบวนการเรียนการสอนแนวใหม่. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [6] สิริวรรณ ศรีพหล และ พันธิพา อุทัยสุข (2540). การสอนแบบสาธิตและการเรียนรู้. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [7] ทิศนา แคมมณี (2550). ศิลปะการสอน. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] Daines, James R. (2012). Fluid Power: Hydraulics and Pneumatics. Cengage Learning.
- [9] ชัยพร สุขสว่าง (2560). ระบบไฮดรอลิกส์และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. สำนักพิมพ์ สสท.
- [10] Smith, J., & Jones, A. (2023). Development of an Educational Mechatronics-Based Kit for Automotive Steering Systems. Proceedings of the XX International Conference on Engineering Education .

การพัฒนาเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ Development of temperature-controlled meat mincer

ธีรพันธ์ สุดสถาน^{1*} อนุสรณ์ สิ้นสะอาด² นัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์³ และ อาศิรา สนธิธรรม⁴

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

*Email: Theeraphan1703@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ควบคุมอุณหภูมิ โดยขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วยการออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์และหาการหาประสิทธิภาพของเครื่อง จากการทดลองพบว่าการทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและระยะเวลาในการสับผสมเนื้อหมูตามน้ำหนักของเนื้อหมูบดหยาบที่ต่างกัน โดยผลการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง พบว่า อุณหภูมิความเย็นที่เหมาะสมคือ -3 ถึง -7 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักของเนื้อหมูบดหยาบ อีกทั้งเวลาและอุณหภูมิจะส่งผลต่อความละเอียดและการขึ้นฟูของเนื้อหมูบดละเอียด สรุปได้ว่า การออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ สามารถทำงานได้ดีแทนแรงงานคนในกระบวนการผลิตหมูอัดแท่ง สามารถเพิ่มกำลังการผลิตให้มีปริมาณวัตถุดิบเพียงพอต่อการผลิตหมูอัดแท่งสำหรับจัดจำหน่ายได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคได้

คำสำคัญ: เครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ความเย็น

Abstract

This research aimed to design and construct a temperature-controlled meat mincer to determine its efficiency. The research steps included designing and constructing the meat mincer and determining its efficiency. Experiments revealed that the temperature-controlled meat mincer was tested to determine the optimal temperature and duration for mincing pork based on different weights of coarsely ground pork. Four tests revealed that the optimal cooling temperature ranged from -3 to -7°C, with the time required depending on the weight of the coarsely ground pork. Furthermore, time and temperature influence the fineness and fluffiness of the finely ground pork. In conclusion, the design and construction of a temperature-controlled meat mincer effectively replaces manual labor in the pork bar production process and increases production capacity to ensure sufficient raw materials for the production of pork bars for distribution to meet consumer demand.

Keywords: Meat cutter-mixer Temperature control Coolness

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อาหารประเภทเนื้อสัตว์ เป็นอาหารที่จัดอยู่ในกลุ่มอาหารประเภทโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของการบำรุงร่างกายของมนุษย์ ที่ช่วยเสริมสร้างกล้ามเนื้อ บำรุงร่างกายให้แข็งแรง ซึ่งในปัจจุบันอาหารจากเนื้อสัตว์ประเภทเนื้อหมู ได้รับความนิยมมากขึ้นในกลุ่มผู้บริโภค เนื่องจากสามารถนำไปใช้ในการบริโภคได้อย่างหลากหลายเมนู อีกทั้งเนื้อหมุนอกจากจะอุดมไปด้วยโปรตีนแล้ว ยังมีสารอาหารอื่น ๆ ด้วย วิตามินบี 1 ที่มีส่วนช่วยลดอาการเหน็บชา วิตามินเอช่วยบำรุงสายตา ฟอสฟอรัส และ

ไนอาซีน หรือ วิตามินบี 3 ที่มีส่วนช่วยในการลดไขมัน ลดการอักเสบของผิวหนัง หรือแม้กระทั่งบำรุงสมอง และเนื่องจากในเนื้อหมูอุดมไปด้วยวิตามินบี จึงมีส่วนช่วยในการกระตุ้นกระบวนการเผาผลาญในร่างกาย และช่วยกำจัดความเหนื่อยล้าได้เป็นอย่างดี ธาตุเหล็ก มีส่วนช่วยในผลิตเลือด ลำเลียงออกซิเจน และสารอาหาร ไปเลี้ยงอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ป้องกันโรคโลหิตจาง [1] อาหารประเภทเนื้อหมูจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบริโภค เพราะประชากรส่วนใหญ่นิยมบริโภคเนื้อหมูมากกว่าเนื้อสัตว์ประเภทอื่นๆ อีกทั้งเนื้อหมูยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นอาหารประเภทอื่นๆ เพื่อเพิ่มความหลากหลายในด้านทางเลือกบริโภคอาหาร และด้านการถนอมอาหารอีกด้วย เช่น หมูแผ่นทูบ หมูบด หมูแดง ลูกชิ้นหมู หมูอัดแท่ง ฯลฯ เป็นต้น ซึ่งการแปรรูปอาหารจากเนื้อหมู จะช่วยเสริมสร้างรายได้จากการจัดจำหน่ายให้กับผู้ผลิต จากข้อมูลการสำรวจความต้องการใช้เครื่องมือประกอบอาหารเนื้อหมูแปรรูป ของสถานประกอบการผลิตภัณฑ์เนื้อหมูอัดแท่ง ตรา โกเนียร์ ตั้งอยู่เลขที่ 150 หมู่ที่ 1 ตำบลหนองกระโดน อำเภอเมืองฯ จังหวัดนครสวรรค์ โดยวิธีสำรวจด้วยการสัมภาษณ์กลุ่มผู้ผลิต และผู้ดูแลขั้นตอนการผลิตพบว่า ขั้นตอนและกระบวนการผลิตหมูอัดแท่งที่ใช้งานอยู่นั้น ทางผู้ผลิตใช้ระยะเวลาในการนวดผสมเนื้อหมูด้วยระยะเวลาที่นานจึงทำให้ผู้ผลิตเกิดความเหนื่อยล้า และทำให้ปริมาณการผลิตในแต่ละวัน ผลิตเนื้อหมูอัดแท่งได้จำนวนที่น้อย ซึ่งส่งผลถึงการจัดจำหน่ายไปยังผู้บริโภค

จากข้อมูลในข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ควบคุมอุณหภูมิ ที่สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนวนของใบพัดผสมอาหาร โดยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ ต่อแกนหมุนเข้ากับชุดหม้อสับผสมที่มีใบพัดสับติดตั้งอยู่ภายใน รวมถึงมีการควบคุมอุณหภูมิ ที่ช่วยลดขั้นตอนการสับผสมที่ต้องใช้น้ำแข็งในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มคุณภาพของเนื้อสัมผัส ดังนั้น เครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ จะช่วยให้ลดระยะเวลาในกระบวนการผลิต ทั้งด้านการนวด และการสับผสมเนื้อหมูสำหรับแปรรูปเป็นเนื้อหมูอัดแท่ง เครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ออกแบบให้มีใบมีดตัด และใบมีดสับผสมที่มีความแข็งแรง ทนทาน สามารถใช้งานได้ยาวนาน ทำจากสแตนเลสเกรดสำหรับอาหาร มีชุดใบมีดจำนวน 4 ใบ เพื่อให้ได้เนื้อหมูสับผสมที่มีขนาดเล็ก และมีความเหนียวเนียนละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน มีการรักษาคุณภาพเนื้อหมูบดละเอียดด้วยความเย็นตั้งแต่เริ่มกระบวนการสับ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ ทั้งในรูปแบบเนื้อหมูอัดแท่ง และเนื้อหมูบดแปรรูป ช่วยให้ผู้ผลิตสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตสินค้าได้มากขึ้น ตามความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภคอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของระบบทำความเย็น
2. เครื่องสับผสมเนื้อสัตว์และควบคุมอุณหภูมิที่ควบคุมอุณหภูมิได้
3. เวลาที่ใช้ในการสับผสม



รูปที่ 1 เนื้อหมูบดแปรรูปสำหรับแปรรูปเป็นหมูอัดแท่ง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

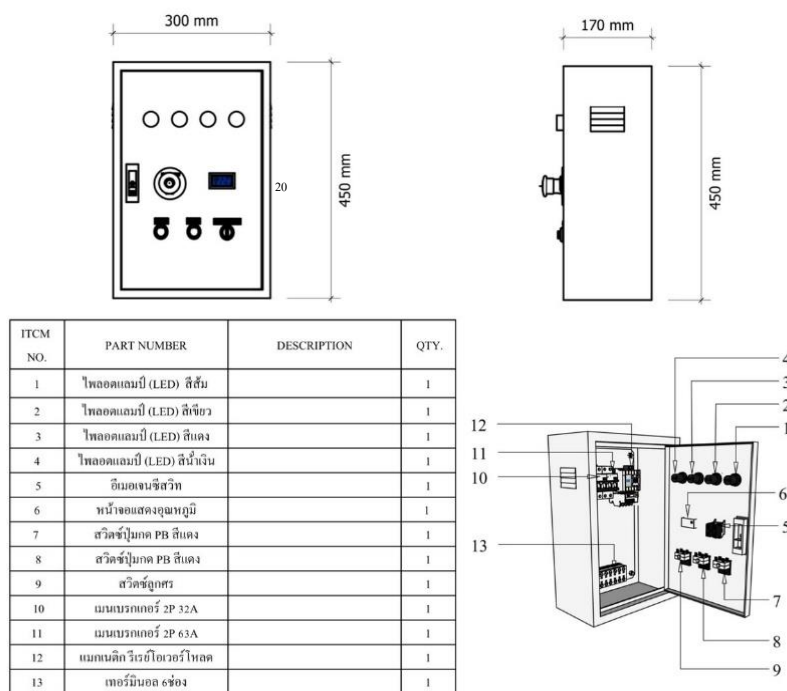
เครื่องสับผสมเป็นเครื่องจักรที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการแปรรูปเนื้อสัตว์ เนื่องจากเครื่องสับผสมมีหน้าที่ในการตัดหรือสับเนื้อสัตว์ให้มีความละเอียด อีกทั้งเป็นการทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ผสมเข้าด้วยกัน มีความเนียนละเอียด โดยชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของเครื่องส่วนใหญ่เป็นสแตนเลสที่มีความแข็งแรง ทนทาน ทำความสะอาดง่าย ไม่เป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรกต่างๆ เครื่องสับผสมสามารถใช้งานได้หลากหลายตั้งแต่ระดับใช้งานในร้านค้า ร้านอาหาร ซูเปอร์-มาร์เก็ต และโรงงานอุตสาหกรรม ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์แปรรูป คือการนำเนื้อที่มีคุณสมบัติเดิมของเนื้อสดมาแปรเปลี่ยน โดยใช้วิธีการเดียว หรือ หลายวิธีการ เช่น การหั่น การบด การสับละเอียด การเติมสาร เติมรส และการให้ความร้อน เป็นต้น [2]

การออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ มีวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

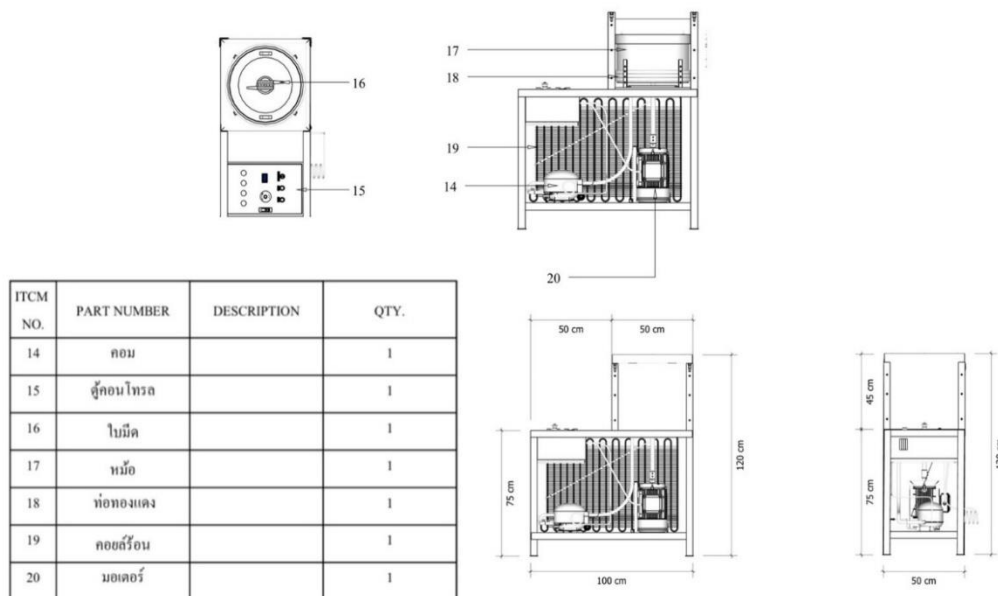
- 1.ออกแบบโครงสร้าง
- 2.ออกแบบระบบควบคุม

2.1 ออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ คณะผู้วิจัยได้กำหนดขนาดของเครื่องสับผสมไว้ที่ขนาดความกว้าง 100 เซนติเมตร × ความสูง 120 เซนติเมตร โดยแบ่งสัดส่วนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนควบคุมระบบ มีขนาดความกว้าง 100 เซนติเมตร × ความสูง 75 เซนติเมตร เพื่อติดตั้งระบบดีฟรอสต์คอนโทรลเลอร์ และชุดควบคุมระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับ และ 2) ส่วนสับผสม เป็นส่วนที่ติดตั้งใบพัดมีดสำหรับสับผสมเนื้อสัตว์ มีขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร × ความสูง 45 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 2 การออกแบบโครงสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ

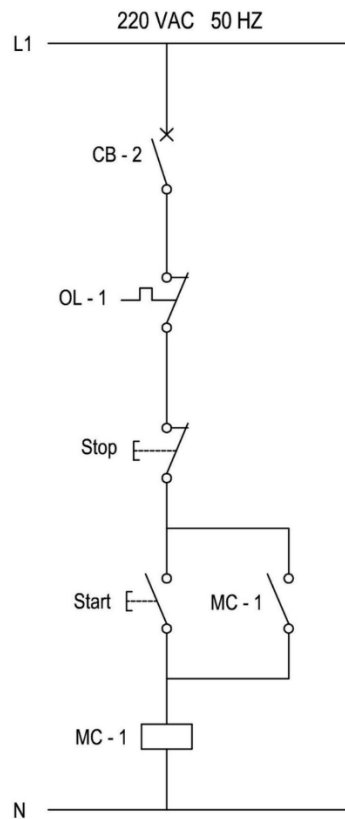


รูปที่ 3 การออกแบบโครงสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ

2.2 ออกแบบระบบควบคุม

ระบบควบคุมของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า ประกอบด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาด 15 แอมแปร์, แมคเนติกคอนแทคเตอร์ ขนาด 15 แอมแปร์, ชุดควบคุมระบบตีฟรอสต์คอนโทรลเลอร์แบบดิจิทัล, คอมเพรสเซอร์ ขนาด 220 โวลต์ และคอยล์ร้อน โดยกล่องควบคุมออกแบบให้มีหลอดไฟแสดงสถานะการทำงานของระบบ มีระบบป้องกันการการทำงานด้วยปุ่มกดหยุดฉุกเฉิน เพื่อป้องกันระบบต่างๆ ให้กับผู้ใช้งาน เมื่อนำอุปกรณ์ต่างๆ ที่ออกแบบไว้แล้วนำมาประกอบรวมกัน จึงได้ระบบควบคุมของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3

หลังจากออกแบบโครงสร้างและระบบควบคุม คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิเสร็จสิ้น และเตรียมนำไปทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมฯ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 วงจรคอนโทรลมอเตอร์



รูปที่ 5 ระบบควบคุมของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6 เครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การหาผลการวิจัยเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์และควบคุมด้วยอุณหภูมิ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในการทดลองใช้เนื้อหมูบดหยาบในการทดลองดังนี้

3.1 การทดลองค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยควบคุมระยะเวลา

การทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ โดยทดสอบจากเนื้อหมูบดหยาบจำนวน 5 กิโลกรัม และปรับค่าอุณหภูมิที่ชุดควบคุม และกำหนดเวลาที่ใช้ในการสับผสม ซึ่งผลที่ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การทดลองค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยควบคุมระยะเวลา

ครั้งที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
1	10	20 – 15
2	15	14 – 8
3	20	8 – 4
4	25	0 – (- 3)
5	30	(- 3) – (- 7)
ค่าเฉลี่ย	20	5.4

จากตารางที่ 1 เป็นการเริ่มการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง โดยเพิ่มเวลาในการสับผสมครั้งละ 5 นาที พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่เวลาโดยเฉลี่ย 20 นาที และอุณหภูมิที่ 5.4 องศาเซลเซียส

3.2 การทดลองที่น้ำหนักเนื้อสัตว์เท่ากันและอุณหภูมิต่างกัน

การทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ โดยทดสอบจากเนื้อหมูบดหยาบจำนวน 3, 7, 11 และ 15 กิโลกรัม ดังรูปที่ 4 และปรับค่าอุณหภูมิที่ชุดควบคุมที่อุณหภูมิ 7, 2 , -4 และ -7 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้ดังตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 5 โดยเนื้อหมูที่ผ่านการสับผสมด้วยเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การทดลองโดยใช้เนื้อหมูที่ 3 กิโลกรัม

ครั้งที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)
1	3	7	85
2	3	2	70
3	3	(- 4)	55
4	3	(- 7)	45
ค่าเฉลี่ย		0	64

ตารางที่ 3 การทดลองโดยใช้เนื้อหมูที่ 7 กิโลกรัม

ครั้งที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (วินาที)
1	7	7	95
2	7	2	80
3	7	(- 4)	65
4	7	(- 7)	55
ค่าเฉลี่ย		0	74

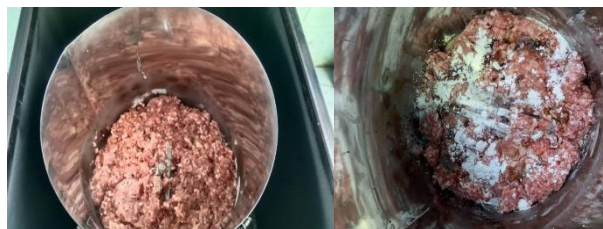
ตารางที่ 4 การทดลองโดยใช้เนื้อหมูที่ 11 กิโลกรัม

ครั้งที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อุณหภูมิ (° C)	เวลา (วินาที)
1	11	7	110
2	11	2	95
3	11	(- 4)	80
4	11	(- 7)	70
ค่าเฉลี่ย		0	89

ตารางที่ 5 การทดลองโดยใช้เนื้อหมูที่ 15 กิโลกรัม

ครั้งที่	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	อุณหภูมิ (° C)	เวลา (วินาที)
1	15	7	200
2	15	2	170
3	15	(- 4)	140
4	15	(- 7)	120
ค่าเฉลี่ย		0	157

จากตารางที่ 2 – 5 เป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและระยะเวลาในการสับผสมเนื้อหมูตามน้ำหนักของเนื้อหมูปดหยาบที่ต่างกัน โดยผลการทดสอบจำนวน 4 ครั้งพบว่า อุณหภูมิความเย็นที่เหมาะสมคือ - 3 ถึง - 7 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ใช้นั้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักของเนื้อหมูปดหยาบ อีกทั้งเวลาและอุณหภูมิจะส่งผลต่อความละเอียดและการขึ้นฟูของเนื้อหมูปดละเอียด ซึ่งสรุปได้ดังนี้ 1) ปริมาณเนื้อหมูที่ 3 กิโลกรัม ใช้เวลาในการสับผสมที่ 45 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด 2) ปริมาณเนื้อหมูที่ 7 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 55 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด 3) ปริมาณเนื้อหมูที่ 11 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 70 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด และ 4) ปริมาณเนื้อหมูที่ 15 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 120 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด



รูปที่ 7 เนื้อหมูปดหยาบที่ใช้ในการทดสอบเครื่องสับผสมฯ



รูปที่ 8 เนื้อหมูที่ผ่านการสับผสมด้วยเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ

4. สรุปผล

การออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบมีระบบตีฟรอสต์คอนโทรลเลอร์ กับการใช้แรงงานคนในกระบวนการผลิตหมูอัดแท่ง จากการสำรวจข้อมูลพบว่า ขั้นตอนและกระบวนการผลิตหมูอัดแท่งที่ใช้งานอยู่นั้น ทางผู้ผลิตใช้ระยะเวลาในการนวดผสมเนื้อหมูด้วยระยะเวลาที่นานจึงทำให้ผู้ผลิตเกิดความเหนื่อยล้า และทำให้ปริมาณการผลิตในแต่ละวัน ผลิตเนื้อหมูอัดแท่งได้จำนวนที่น้อย ซึ่งส่งผลถึงการจัดจำหน่ายไปยังผู้บริโภค

คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ควบคุมอุณหภูมิ ที่สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนวนของใบมีดผสมอาหาร โดยเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด แรงดันไฟฟ้า 230 โวลต์ ต่อแกนหมุนเข้ากับชุดหม้อสับผสมที่มีใบมีดติดตั้งอยู่ภายใน รวมถึงมีการควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบตีฟรอสต์คอนโทรลเลอร์ ที่ช่วยลดขั้นตอนการสับผสมที่ต้องใช้น้ำแข็งในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มคุณภาพของเนื้อสัมผัส โดยผลการทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์ควบคุมอุณหภูมิ พบว่า 1) การทดสอบเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง โดยเพิ่มเวลาในการสับผสมครั้งละ 5 นาที พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่เวลาโดยเฉลี่ย 20 นาที และอุณหภูมิที่ 5.4 องศาเซลเซียส และ 2) การทดสอบการทำงานของเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมและระยะเวลาในการสับผสมเนื้อหมูตามน้ำหนักของเนื้อหมอบดหยาบที่ต่างกัน โดยผลการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง พบว่า อุณหภูมิความเย็นที่เหมาะสมคือ - 3 ถึง - 7 องศาเซลเซียส ซึ่งเวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหนักรวมของเนื้อหมอบดหยาบ อีกทั้งเวลาและอุณหภูมิจะส่งผลต่อความละเอียดและการขึ้นฟูของเนื้อหมอบดละเอียด ซึ่งสรุปผลได้ดังนี้ 1) ปริมาณเนื้อหมูที่ 3 กิโลกรัม ใช้เวลาในการสับผสมที่ 45 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด 2) ปริมาณเนื้อหมูที่ 7 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 55 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด 3) ปริมาณเนื้อหมูที่ 11 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 70 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด และ 4) ปริมาณเนื้อหมูที่ 15 กิโลกรัม ใช้เวลาสับผสมที่ 120 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ดีที่สุด

สรุปได้ว่า การออกแบบและสร้างเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ สามารถทำงานได้ดีตามเป้าหมายที่คาดการณ์ไว้ แทนแรงงานคนในกระบวนการผลิตหมูอัดแท่ง สามารถเพิ่มกำลังการผลิตให้มีปริมาณวัตถุดิบเพียงพอต่อการผลิตหมูอัดแท่งสำหรับจัดจำหน่ายได้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคได้



รูปที่ 9 เนื้อหมูที่ผ่านการสับผสมด้วยเครื่องสับผสมเนื้อสัตว์แบบควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม

5. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะแบ่งออกได้ดังนี้

1. ควรมี Timer relay ในการควบคุมเวลา
2. ชิ้นส่วน และอุปกรณ์มีความซับซ้อน และมีน้ำหนักมากเกินไป ควรมีการถอดประกอบหม้อ ใบมีด ควรทำให้ง่ายขึ้น
3. ต้นทุนการก่อสร้างสูงเกินไป
4. กำลังมอเตอร์มากเกินไป
5. เวลาในการทำความเย็นที่ถึงจุดที่เหมาะสมสำหรับการสับผสมเนื้อสัตว์นานเกินไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงตามวัตถุประสงค์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านวิชาการและการดำเนินงานจากอาจารย์ณัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์ และอาจารย์อนุสรณ์ สีนสะอาด อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย รวมถึงได้ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทานและแก้ไขงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัย ขอขอบคุณผู้จัดทำโครงงานเครื่องสไลด์น้ำมันหมูฝอยกรอบ ที่ได้มอบหนังสือรูปเล่มให้การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานวิจัยเกี่ยวกับอาหารเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณคุณสุระศักดิ์ แสงสุทธิเศรษฐ์ เจ้าของร้านฮ็อตแอร์เซอร์วิส ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลด้านเครื่องทำความเย็น ขอขอบคุณกลุ่มรัฐวิสาหกิจชุมชนกลุ่มโกเนียร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ และขอขอบคุณบิดามารดา รวมถึงเพื่อนของผู้จัดทำที่ช่วยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและทุนงานวิจัยมาอย่างดียิ่งโดยตลอดจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดีดังตั้งใจ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Leukhampeng, P. Sanpoung and K. Somsai, "Application of D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation and Power Oscillation Damping," 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2021, pp. 810-815, doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454805.
- [2] P. Youplao, A. Takita, H. Nasbey, S. Mitatha and Y. Fujii, "An Optical Heterodyne Technique for Dynamic Eddy-Current Damping Force Evaluation," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-11, 2021, Art no. 6005011, doi: 10.1109/TIM.2021.3059112.

- [3] A. E. Arumona et al., "Microfluidic Flow Rate Sensor Using Electron Cloud Plasma Transport Within Silicon Microring Circuits," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 24, pp. 27268-27274, 15 Dec.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3124368.
- [4] จีระพงศ์ ศรีวิชัย. (2559). การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานความร้อนเชิงเหนี่ยวนำ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 26(3), 375–383.
- [5] นครินทร์ ศรีปัญญา และ เอกวิทย์ หายักวงษ์. (2561). การจำลองระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้อินเวอร์เตอร์แบบ 5 กิ่ง ขับปั๊มน้ำมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจำนวน 2 ตัว. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 (น. 327-330). สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน.

การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร จังหวัดน่าน

Reducing of Carbon Footprint through Solar Energy: A Case Study of Srisawatwittayakarn School

ปณณช ลักษณะ¹ และ ธนภณ อารังคุณานัน^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

^{2*}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹Email: Punyanuch@srisawat.ac.th; ^{2*}Email: Nathwut.kow@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ประเมินการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 350 กิโลวัตต์พีค (kWp) ณ โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร จังหวัดน่าน ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลการดำเนินงานตามสภาพจริงที่เก็บรวบรวมเป็นเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2568 ระบบสามารถผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 138,550 กิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh) ซึ่งครอบคลุมความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านประมาณร้อยละ 62.67 ในช่วงเวลาดังกล่าว สิ่งนี้นำไปสู่การประหยัดค่าไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 126,344.31 บาท โดยมีค่าเฉลี่ยการลดลงรายเดือนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10.73 เมื่อเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้ามาตรฐานจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.)

ประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาถูกประเมินตามมาตรฐาน IEC 61724 โดยคำนึงถึงพื้นที่รวมของแผง 1,276.8 ตารางเมตร (m²) และค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยรายวันที่เฉพาะเจาะจงตามภูมิภาค โดยค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยในการทำงานที่คำนวณได้อยู่ที่ร้อยละ 11.84 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ถือว่าเหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา (Solar Rooftop) ในสภาพอากาศท้องถิ่น

ในด้านของสิ่งแวดล้อม ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (Carbon footprint (CO₂eq)) ประมาณ 82,959.97 กิโลกรัม โดยค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกอ้างอิงจาก Thai National LCI Database เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq ต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมง ผลจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ไม่เพียงให้ประโยชน์ด้านค่าใช้จ่ายเท่านั้น แต่ยังมีความสำคัญในการสนับสนุนเป้าหมายความยั่งยืนของประเทศ ทั้งในด้านการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การเพิ่มสัดส่วนพลังงานสะอาด และการเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานของประเทศด้วยการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า สอดคล้องกับแผนพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 20 ปี ของประเทศไทย ที่ตั้งเป้าลดการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายลงร้อยละ 20 ภายในปี พ.ศ. 2573 อีกด้วย

โดยสรุปการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์จากติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน ถือเป็นรูปแบบตัวอย่างที่เป็นรูปธรรมในการส่งเสริมความพึ่งพาตนเองด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าและลดค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้ารวมถึงมีความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมทางอากาศภายในสถาบันการศึกษาของภาครัฐ

คำสำคัญ : คาร์บอนฟุตพริ้นท์, ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา, ประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา, ค่าไฟฟ้า

Abstract

This study evaluates the installation of a 350 kilowatt peak (kWp) rooftop solar photovoltaic system at Srisawattwittayakarn School in Nan Province, Thailand, using real operational data collected over a 6 month period from December 2024 to May 2025. The system produced a total of 138,550 kilowatt-hours (kWh) of electricity, covering approximately 62.67% of the school's electricity demand during this period. This resulted in an electricity cost saving of 126,344.31 THB, with an average monthly reduction of approximately 10.73% compared to the standard electricity rate from the Provincial Electricity Authority (PEA).

The rooftop solar system's performance was evaluated following the IEC 61724 standard, considering the total panel area of 1,276.8 square meters and the specific regional average daily solar radiation. The calculated average performance efficiency was 11.84%, which is considered appropriate for a rooftop solar power system in the local climate conditions.

From an environmental perspective, the rooftop solar system helped reduce carbon dioxide equivalent (CO₂ eq) emissions by approximately 82,959.97 kilograms, using a greenhouse gas emission coefficient based on the Thai National LCI Database of 0.5986 kgCO₂eq per kilowatt-hour. The results of this study highlight that solar energy not only provides cost benefits but also plays an essential role in supporting the country's sustainability goals, including reducing greenhouse gas emissions, increasing the share of clean energy, and enhancing the country's energy security through the efficient use of resources. This aligns with Thailand's 20 Year Energy Efficiency Development Plan, which aims to reduce final energy consumption by 20% by 2030.

In conclusion, the reduction of the carbon footprint through the use of solar energy from the rooftop solar installation at Srisawattwittayakarn School in Nan Province serves as a practical example of promoting energy self-sufficiency, reducing electricity costs, and demonstrating environmental responsibility within a public educational institution.

Keywords: Carbon footprint, solar rooftop, solar system performance, electricity costs.

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

จากสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยในปัจจุบันที่มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นทุกปี โดยจะเห็นได้ว่าการต้องการในการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นภาระหนักของรัฐบาลในการจัดหางบประมาณเพื่อจัดหาพลังงานให้มีใช้อย่างเพียงพอในทุกภาคส่วน รัฐบาลจึงได้วางนโยบายด้านพลังงานของประเทศ โดยกำหนดกลยุทธ์ด้านการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งมีมาตรการทั้งด้านบริหาร ด้านสังคม และด้านกฎหมาย เพื่อกำกับดูแล และส่งเสริมให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดให้กับภาครัฐและภาคเอกชน โดยเป้าหมายตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี ได้กำหนดให้ลดความเข้มข้นการใช้พลังงาน หรือ Energy Intensity (EI) ลง 25% ภายในปี 2573 เมื่อเทียบกับปี 2548 หรือเทียบเท่ากับการลดการใช้ พลังงานขั้นสุดท้ายลง 20% ในปี 2573 [1]

บริษัท สามารถคอมเทค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทสำหรับจัดหาและให้บริการพลังงานไฟฟ้าแก่เอกชนและหน่วยราชการ โดยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา บริษัท ฯ ได้ให้ความสำคัญในเรื่องของการส่งเสริมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ และลดการใช้พลังงานมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีทั้งการส่งเสริมและสนับสนุนจากนโยบายของรัฐและเอกชน ทั้งนี้ได้ให้บริการกับโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน ซึ่งเป็นโรงเรียนขนาดใหญ่ประจำจังหวัดน่าน ได้ทำสัญญาซื้อขายกระแสไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar rooftop) เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน และสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนอย่างเป็นรูปธรรม รวมถึงการลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ [2]

ผู้วิจัยจึงศึกษาค่าใช้จ่ายไฟฟ้าจากข้อมูลผลผลิตจริงของการใช้ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน ประสิทธิภาพระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ลดลง และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกระทบหลังการติดตั้ง เพื่อให้สอดคล้องกับนโยบายลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า และลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการ จังหวัดน่าน รวมถึงโรงเรียนในสังกัด สพฐ. สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการประกอบการตัดสินใจติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาค่าใช้จ่ายไฟฟ้าจากข้อมูลผลผลิตจริงของการใช้ระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการ จังหวัดน่าน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการนำระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์
- 1.2.4 เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการบริหารจัดการงบประมาณค่าใช้จ่ายของค่าไฟฟ้าในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ระยะเวลาในการรวบรวมข้อมูลผลผลิตจากการติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา กรกฎาคม 2567 - มิถุนายน 2568
- 1.3.2 ระยะเวลาบันทึกข้อมูลค่าใช้จ่ายไฟฟ้าผลผลิตจริง ธันวาคม 2567 - พฤษภาคม 2568
- 1.3.3 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
 - 1.3.3.1 ตัวแปรต้น
 1. ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้
 2. ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการ จังหวัดน่าน
 - 1.3.3.2 ตัวแปรตาม

1. ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ลดลง (Kg.CO₂eq)
2. ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่ลดลงหลังจากการติดตั้ง)

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจะช่วยลดค่าไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ พร้อมเป็นต้นแบบขยายผลไปยังสถาบันการศึกษาอื่น ๆ

1.5 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.5.1 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables)

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา(kWh)

ค่าไฟฟ้ารายเดือนของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน (บาท)

1.5.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

ระดับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (kgCO₂eq)

ประสิทธิภาพทางเศรษฐกิจ (การประหยัดต้นทุน, ผลตอบแทนเบื้องต้น)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตของวิจัยเรื่องการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์

2.2 ศึกษาข้อกำหนด MOU การติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคา ระหว่าง บริษัท สามารถคอมเทค จำกัด กับ โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ควบคุมอื่น ๆ และค่าใช้จ่าย

2.3 รวบรวมข้อมูลผลผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้หลังจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในสถานการณ์จริง ช่วงระยะเวลาเก็บข้อมูล 6 เดือน ระหว่างเดือน ธันวาคม 2567 ถึง พฤษภาคม 2568 จากข้อมูลในแอปพลิเคชัน Fusionsolar Monitoring

2.4 ศึกษาค่าใช้จ่ายค่าไฟฟ้าที่ลดลงหลังการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (unit) และค่าใช้จ่ายไฟฟ้า (บาท) จากใบเสร็จค่าไฟฟ้าจากบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด และใบเสร็จค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) บันทึกลงในตารางการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารายเดือนระหว่าง PEA และระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของบริษัทเอกชนที่ลงนามสัญญา

2.5 ศึกษาการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา โดยคำนวณว่าช่วยลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรได้เท่าใด จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$CFO = GHG \text{ emission} = \text{Activity Data} \times EF \quad (1)$$

โดยที่ CFO = คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (kgCO₂eq)

Activity data = ข้อมูลกิจกรรมที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

EF = ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก อ้างอิงจาก Thai National LCI Database

เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq ต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมง

2.6 ศึกษาผลผลิตจริงเทียบกับอัตราส่วนประสิทธิภาพระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ตามมาตรฐาน IEC 61724 ใช้สูตรในการคำนวณดังนี้ ประสิทธิภาพรวมของระบบ คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ต่อกำลังแสงอาทิตย์ตกกระทบบนแผงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{P_{\text{AC}}}{P_{\text{G}}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ η_{sys} คือ ประสิทธิภาพของระบบ (%)

P_{AC} คือ กำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากอินเวอร์เตอร์ (W)

G คือ ค่ารังสีอาทิตย์ตกกระทบ (W/m^2)

A คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม (m^2)

2.7 นำข้อมูลที่ได้จาก ข้อ 2.6 – 2.7 สร้างเป็นกราฟแสดงข้อมูลในแต่ละเดือน

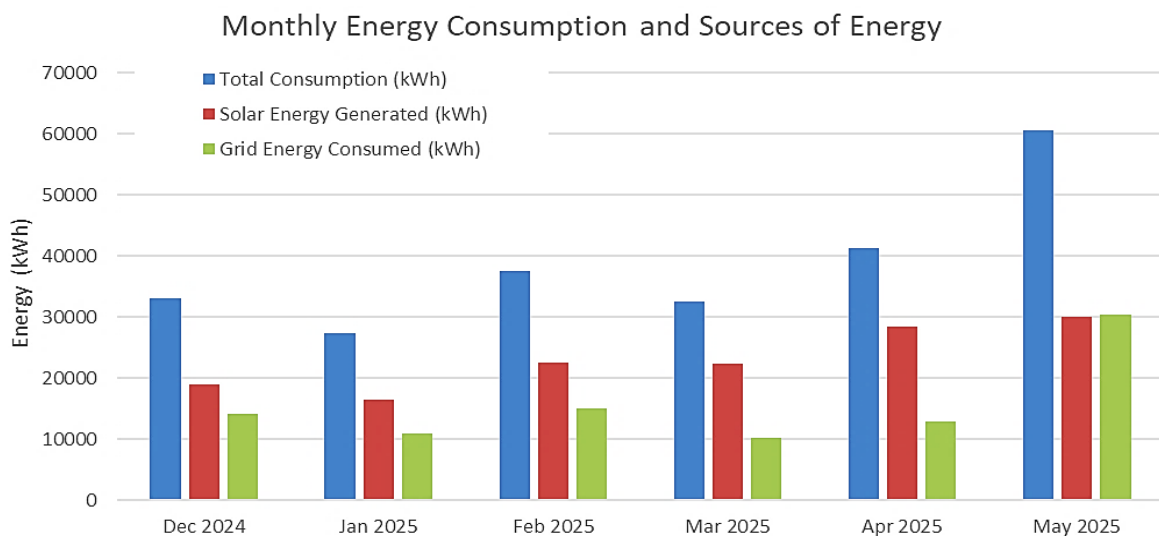
2.8 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการวิจัย

3.1.1 การประเมินค่าไฟฟ้าจากการผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จริง

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 350 กิโลวัตต์พีค (kWp) ณ โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน ในประเทศไทย สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในเวลาตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2568 รวมทั้งสิ้น 138,550 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งครอบคลุมการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน 62.67% ในช่วงเวลาการประเมิน ลดการพึ่งพาไฟฟ้าที่จัดหาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ลงอย่างมีนัยสำคัญ การลดการใช้ไฟฟ้าจากโครงข่ายนี้ช่วยให้ประหยัดค่าไฟฟ้ารวม 126,344.31 บาท ตลอดระยะเวลา 6 เดือน โดยมีค่าเฉลี่ยการประหยัดรายเดือนร้อยละ 10.73 ไฟฟ้าที่ได้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ซึ่งติดตั้งโดยบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด คิดราคาที่ 3.95 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ขณะที่ค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเรียกเก็บเฉลี่ยที่ 5.33 บาท ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) [2] การประหยัดนี้ช่วยสนับสนุนการวางแผนงบประมาณระยะยาว และสอดคล้องกับเป้าหมายของ แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปีของประเทศไทย [1] การใช้พลังงานรายเดือนและการกระจายแหล่งพลังงานแหล่งข้อมูลจากแอปพลิเคชัน Fusionsolar Monitoring ดังรูปที่ 1

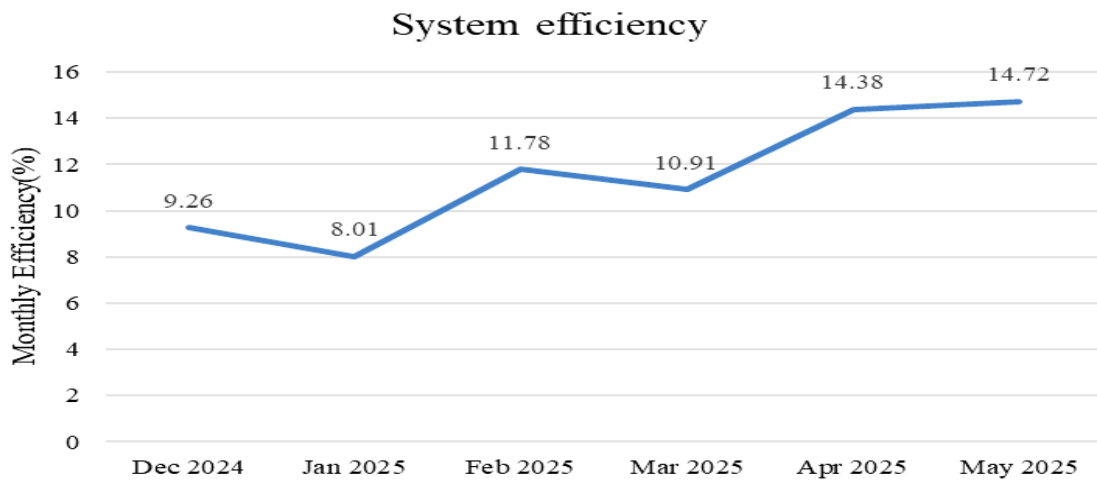


รูปที่ 1 กราฟแสดงผลของการใช้พลังงานรายเดือนและการกระจายแหล่งพลังงาน

3.1.2 การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

โดยใช้วิธีการตามมาตรฐาน IEC 61724 วิธีการประเมินประสิทธิภาพ และสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคานั้น จะต้องอ้างอิงตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission [3] เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของระบบได้ 11.84% โดยอ้างอิงจากค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยของจังหวัดน่าน ($5.162 \text{ kWh}/m^2/\text{day}$) และพื้นที่รวมของแผงโซลาร์เซลล์คือ $1,276.8 \text{ m}^2$ [4] โดยใช้การบันทึกข้อมูลที่ใช้จริงจากแอปพลิเคชัน Fusionsolar ซึ่งประสิทธิภาพนี้สอดคล้องกับค่าที่รายงานไว้ในงานวิจัยของ กฤษณชัย ยอดอรรถัย [5] ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการโครงอ้อมเหนือและอ้อมใต้ของดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลง

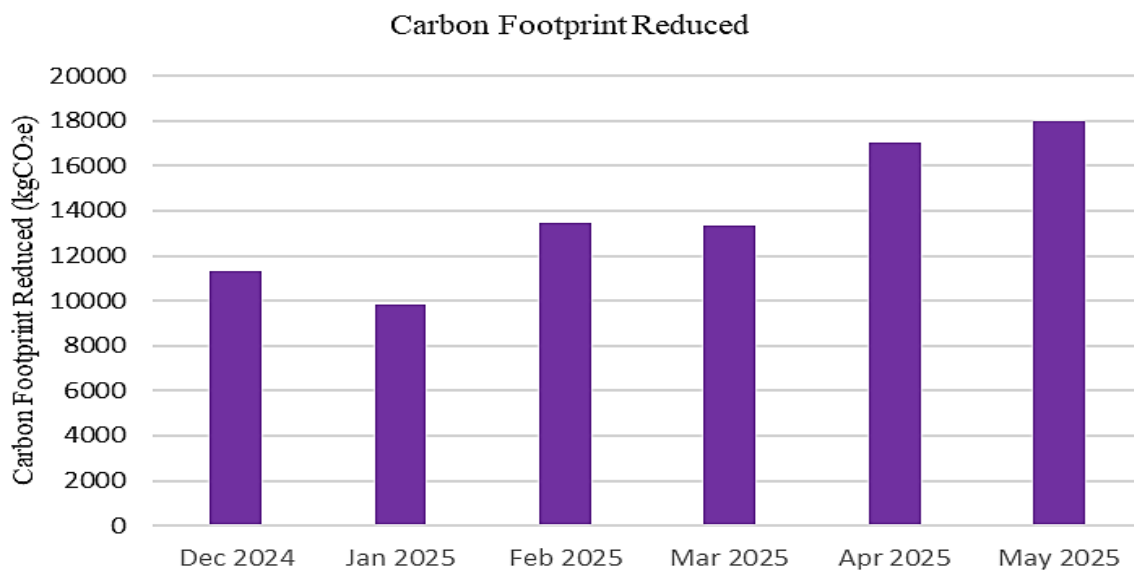
ตามฤดูกาลมีผลต่อกำลังผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา [6] กล่าวว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคายังไม่สามารถผลิตไฟฟ้าที่พร้อมจ่ายได้ตลอดเวลา เนื่องจากพลังงานที่ผลิตได้จะแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ ณ เวลานั้นจึงเหมาะเป็นระบบที่ใช้เสริมเพื่อช่วยประหยัดรายจ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แสดงผลของประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาดังกราฟรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟแสดงประสิทธิภาพของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา

3.1.3 การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint Reduction)

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้ 82,959.97 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kgCO₂eq) ตลอดระยะเวลา 6 เดือน มีค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก อ้างอิงจาก Thai National LCI Database เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq ต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมง ปัจจัยหลักสำคัญที่ส่งผลต่อศักยภาพในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ได้ดีที่สุด คือ การวางแผนอาคารและการหันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้และทิศตะวันตกเฉียงใต้เป็นทิศที่ดีที่สุด กำหนดมุมเอียงที่ 18 องศา [7] เพราะเป็นทิศที่ได้รับแสงอาทิตย์มากที่สุดตลอดทั้งวันในพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งอยู่ในซีกโลกเหนือแสงอาทิตย์จะมีมุมตกกระทบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อแผงหันหน้าลงทางทิศใต้ โดยระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ถูกวางบนอาคาร 4 และอาคารหอประชุม 84 ปี ในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน ตั้งอยู่ที่ 179 หมู่ที่ 5 ตำบลคูใต้ อำเภอมือง จังหวัดน่าน ละติจูด (Latitude): ประมาณ 18.7736 ลองจิจูด (Longitude): ประมาณ 100.7714 หันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้และทิศตะวันตกทำให้แผงสามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในการสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนในท้องถิ่น และยุทธศาสตร์การจัดการคาร์บอนระดับชาติ ดังกราฟรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงผลการกราฟแสดงการลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์

3.1.4 การประยุกต์ใช้จริงในการจัดการงบประมาณค่าไฟฟ้าของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านถือเป็นตัวอย่างจริงสำหรับองค์กรสาธารณะอื่น ๆ ที่ต้องการได้ทั้งประโยชน์ทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมจากการลงทุนในพลังงานสะอาด[7] โดยค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณคือ หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (unit) และค่าใช้จ่ายไฟฟ้า (บาท) จากใบเสร็จค่าไฟฟ้าจากบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด และใบเสร็จค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ซึ่งสะท้อนต้นทุนพลังงานและค่าใช้จ่ายไฟฟ้าที่แท้จริงของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน ภาพรวมของค่าใช้จ่ายในช่วงเดือน ธันวาคม 2567 – พฤษภาคม 2568 โรงเรียนมีค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารวมทั้งสองระบบ 1,051,139.84 บาท ค่าใช้จ่ายจาก PEA รวม 507,402.59 บาท ค่าใช้จ่ายจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา รวม 543,737.25 บาท ค่าใช้จ่ายรวมแต่ละเดือนอยู่ในช่วง ประมาณ 112,000 – 276,000 บาท เดือนที่มีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าสูงที่สุดคือ พฤษภาคม 2568 รวม 276,099.19 บาท เนื่องจากการใช้พลังงานสูงขึ้นตามสภาพอากาศที่ร้อนขึ้นและอยู่ในช่วงเปิดเทอม ถึงแม้ในช่วงเดือน มีนาคมและเมษายน 2568 นั้นจะร้อนแต่ก็อยู่ในช่วงปิดเทอมอัตราการใช้ไฟฟ้าลดลงค่าไฟฟ้าจึงลดลงตาม ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารายเดือนระหว่าง PEA และระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของบริษัทเอกชนที่ลงนามสัญญา

เดือน	การชำระเงิน PEA (บาท)	การชำระเงินระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของบริษัท ฯ (บาท)	การชำระเงินรวมรายเดือน (บาท)
ธ.ค. 2567	77,088.93	76,152.05	153,240.98
ม.ค. 2568	51,917.32	63,788.55	115,705.87
ก.พ. 2568	84,316.72	87,974.4	172,291.12
มี.ค. 2568	55,921.5	87,054.05	142,975.55
เม.ย. 2568	79,654.38	111,172.75	190,827.13
พ.ค. 2568	158,503.74	117,595.45	276,099.19
รวม	507,402.59	543,737.25	1,051,139.84

หมายเหตุ: ราคาทั้งหมดในตารางยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT) อัตรา VAT ปัจจุบันในประเทศไทยคือ 7% และถูกคิดเพิ่มเติมจากราคาพื้นฐานของไฟฟ้า

3.2. การอภิปรายผล

3.2.1 การประเมินค่าไฟฟ้า

ตลอดระยะเวลาเก็บข้อมูล 6 เดือนในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ถึง พฤษภาคม พ.ศ. 2568 โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านจ่ายค่าไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 1,051,139.84 บาท ซึ่งรวมค่าใช้จ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและจากบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด หากโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านต้องพึ่งพาไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวในช่วงเวลาเดียวกัน ค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 1,177,484.15 บาท คำนวณจากคิดราคาการใช้ไฟฟ้าต่อชั่วโมง (Unit) ที่เรียกเก็บเฉลี่ยที่ 5.33 บาท ต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (ยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม) ของค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคส่งผลให้เกิดการประหยัดรวม 126,344.31 บาท หรือคิดเป็นเฉลี่ยประมาณ 10.73% ต่อเดือน ตัวเลขเหล่านี้บ่งชี้ว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถช่วยโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านลดค่าไฟฟ้าได้จริง และยังสนับสนุนนโยบายการประหยัดพลังงานที่รัฐบาลส่งเสริม [1, 5-8]

ไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ซึ่งติดตั้งโดยบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด คิดราคาที่ 3.95 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ขณะที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) ถูกเรียกเก็บเฉลี่ยที่ 5.33 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง โดยอิงจากบิลค่าไฟฟ้าจริงในแต่ละเดือน ไม่ใช่อัตราคงที่ ทั้งนี้ราคาดังกล่าวยังไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT) การประหยัดที่พบจากงานวิจัยนี้จึงสนับสนุนการวางแผนงบประมาณระยะยาว และสอดคล้องกับเป้าหมายของแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปีของประเทศไทย [1]

3.2.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ (System Performance Efficiency)

ประสิทธิภาพของระบบถูกคำนวณโดยใช้วิธีการ IEC 61724 โดยมีพื้นที่รวมของแผงโซลาร์เซลล์ 1,276.8 ตารางเมตร และค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน 5.162 kWh/m² ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของระบบตลอด 6 เดือนอยู่ที่ประมาณ 11.84% จัดอยู่ในระดับปานกลาง เมื่อเทียบกับช่วงประสิทธิภาพทั่วไปของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่ติดตั้งแบบ Fixed tilt (ไม่ใช่ระบบติดตามทิศทาง) แต่ถือว่าเป็นระดับที่สอดคล้องกับค่าที่คาดการณ์ได้ตามลักษณะของการติดตั้งจริง ซึ่งมักได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิสูงบนหลังคา ความสกปรกของแผง เงาบังบางช่วงเวลา และข้อจำกัดด้านทิศทางการหันแผงตามโครงสร้างอาคารจึงสะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างเชื่อถือได้ในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล โดยไม่พบความผิดปกติที่บ่งชี้ถึงความเสี่ยงสภาพของแผงหรืออินเวอร์เตอร์ ซึ่งยืนยันถึงความคงตัวและความพร้อมใช้งานของระบบในระยะยาว [2-4]

3.2.3 การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint Reduction)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ประมาณ 82,959.97 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ตลอดระยะเวลา 6 เดือน ตัวเลขนี้ถูกคำนวณโดยใช้ค่า ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (EF) เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq ต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมงตามวิธีระบุไว้ในฐานข้อมูล LCI แห่งชาติของประเทศไทย ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงบทบาทของพลังงานสะอาดในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และช่วยให้ประเทศไทยบรรลุเป้าหมายด้านสภาพภูมิอากาศในภาพรวมด้วย [9, 10] เนื่องจากประเทศไทยได้ประกาศพันธสัญญาในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้กรอบความร่วมมือระหว่างประเทศ เช่น การมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050

3.2.4 ผลกระทบต่อการจัดการงบประมาณ (Budget Management Implications)

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ ไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่ายปัจจุบันด้านไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังสนับสนุนการวางแผนงบประมาณระยะยาวที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น สาเหตุสำคัญคือโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน ไม่ได้ต้องรับผิดชอบต้นทุนการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคารเอง แต่ได้รับการลงทุนและติดตั้งโดยบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด ภายใต้บันทึกความเข้าใจ (MOU) กับ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.) ตามข้อตกลง บริษัทได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power Purchase Agreement: PPA) กับโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน โดยกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าคงที่ที่ 3.95 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 15 ปี ในทางตรงกันข้ามหากไม่มีระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านจะต้องซื้อไฟฟ้าจาก PEA ที่มีอัตราเฉลี่ยประมาณ 5.33 บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง (ยังไม่รวม VAT) ด้วยความผันผวนของโครงสร้างค่าไฟฟ้าของ PEA อัตราคงที่ที่ระบุไว้ใน PPA จึงมอบความมั่นใจด้านต้นทุนและสร้างเสถียรภาพทางการเงินในระยะยาว [8, 11]

ผลการวิจัยเหล่านี้สอดคล้องกับเป้าหมายเชิงนโยบายระดับชาติที่มุ่งลดการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายลง 20% ภายในปี ค.ศ. 2030 ตามแผนพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 20 ปี [1] และยังแสดงให้เห็นว่าโครงการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านสามารถช่วยบรรเทาค่าไฟฟ้าที่สูงได้ ซึ่งสอดคล้องกับความพยายามด้านการอนุรักษ์พลังงานในระดับสถานศึกษา [8]

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยที่ดำเนินการที่โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร จังหวัดน่าน ได้ให้ข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ชัดเจนเกี่ยวกับประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในโรงเรียนของภาครัฐ โดยใช้ข้อมูลการดำเนินงานจริงที่เก็บรวบรวมเป็นเวลา 6 เดือน (ธันวาคม 2567 ถึง พฤษภาคม 2568) งานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นข้อดีทั้งในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์นั้น การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar Rooftop) ขนาด 350 kWp ส่งผลให้เกิดการประหยัดค่าไฟฟ้ารวม 126,344.31 บาท โดยมีค่าเฉลี่ยการลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารายเดือนอยู่ที่ 10.73% การประหยัดนี้เกิดจากราคาค่าไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (3.95 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามสัญญาซื้อขายไฟฟ้า หรือ PPA) ที่ต่ำกว่าราคาค่าไฟฟ้าจากโครงข่าย (5.33 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง) การประหยัดดังกล่าวช่วยให้โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่านสามารถบริหารงบประมาณระยะยาวได้ดียิ่งขึ้น และสอดคล้องกับเป้าหมายประสิทธิภาพพลังงานของประเทศไทยภายใต้แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี [1, 5-8]

ในด้านเทคนิคระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาแสดงให้เห็นถึงการทำงานที่มีเสถียรภาพภายใต้สภาพแวดล้อมจริง โดยมีค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการทำงาน 11.84% ซึ่งวัดโดยใช้มาตรฐาน IEC 61724 โดยอ้างอิงจากค่ารังสีอาทิตย์จริงและข้อมูลจำเพาะของแผงมีพื้นที่รวมของแผง 1,276.8 ตารางเมตร (m²) [3-4] แม้ว่าค่าประสิทธิภาพนี้อยู่ในระดับปานกลาง แต่ถือว่าอยู่ในช่วงที่คาดหวังได้สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา ที่ไม่ได้ติดตั้งระบบติดตามทิศทาง และยืนยันถึงความน่าเชื่อถือของระบบตลอดฤดูกาลที่แตกต่างกัน [5]

ในด้านสิ่งแวดล้อม ระบบ PV ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลงได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยในช่วงเวลาการศึกษา ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาสามารถหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 82,959.97 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งคำนวณโดยค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 0.5986 kgCO₂eq ต่อหนึ่งกิโลวัตต์ชั่วโมงตามที่ระบุไว้ในฐานข้อมูล LCI แห่งชาติของประเทศไทย [10] การลดลงนี้ช่วยสนับสนุนทั้งความพยายามของโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่านในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์และเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อมในภาพรวมของประเทศไทย ผลลัพธ์นี้ยังสอดคล้องกับเป้าหมายของประเทศไทยเพื่อความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และ ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี ค.ศ. 2065 ตามที่รัฐบาลไทยประกาศเป้าหมายและนโยบายไว้ [1]

นอกเหนือจากสมรรถนะของระบบ งานวิจัยนี้ยังเน้นถึงความสำคัญของรูปแบบทางการเงินที่มีโครงสร้างเหมาะสม โดยผ่านสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (PPA) โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่าน สามารถหลีกเลี่ยงต้นทุนการลงทุนเริ่มต้น และยังสามารถเข้าถึงพลังงานหมุนเวียนได้โดยไม่สร้างภาระทางการเงิน อัตราค่าไฟฟ้าคงที่ที่ 3.95 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง เป็นเวลา 15 ปี ทำให้ต้นทุนพลังงานสามารถคาดการณ์ได้ ซึ่งถือว่ามีความคุ้มค่าอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับราคาค่าไฟฟ้าจากโครงข่ายที่มีความผันผวน [8-10]

โดยสรุป กรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเป็นทางเลือกที่ใช้งานได้จริง มีความยั่งยืน และคุ้มค่าสำหรับโรงเรียนในภาครัฐ และยังเป็นตัวอย่างที่เป็นประโยชน์แก่สถาบันการศึกษาอื่น ๆ ภายใต้กระทรวงศึกษาธิการ แสดงให้เห็นว่าการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้เป็นทางเลือกทั้งคุ้มค่าในเชิงเศรษฐกิจและมีความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 การติดตามการดำเนินงานระยะยาว

ควรมีการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาตลอดทั้งปีภายใต้สภาพแวดล้อมจริง และเพื่อสนับสนุนกลยุทธ์การวางแผนงบประมาณในอนาคต

5.2 การประสานงานกับผู้ให้บริการ

แม้ว่าการบำรุงรักษาและการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์จะเป็นความรับผิดชอบของบริษัทผู้ให้บริการภายใต้สัญญาซื้อขายไฟฟ้า (PPA) แต่โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการจังหวัดน่านควรทบทวนประสิทธิภาพของการให้บริการเป็นระยะ ๆ และติดตามผลลัพธ์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาเพื่อให้มั่นใจว่าทำงานอย่างเหมาะสม ควรส่งเสริมการใช้เครื่องมือการตรวจสอบ เช่น Fusionsolar เพื่อสร้างความโปร่งใส

5.3 การขยายผลสู่สถาบันอื่น ๆ (Scalability for Other Institutions)

กระทรวงศึกษาธิการหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องอาจพิจารณานำรูปแบบนี้ไปประยุกต์ใช้ในโรงเรียนอื่น ๆ โดยให้ความสำคัญกับสถานที่ที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงและมีค่าไฟฟ้าสูง

5.4 การบูรณาการด้านการศึกษา (Educational Integration)

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาสามารถใช้เป็นเครื่องมือการเรียนการสอนที่เป็นรูปธรรม การติดตั้งจอแสดงผลสาธารณะเกี่ยวกับการผลิตพลังงานรายวัน หรือการจัดโครงการพลังงานที่นักเรียนมีส่วนร่วม สามารถช่วยสร้างความตระหนักรู้เกี่ยวกับพลังงานสะอาดในชุมชนโรงเรียนได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้บริหารและบุคลากรในโรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน ที่อนุญาตให้เข้าถึงบันทึกการใช้พลังงานและข้อมูลสมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาและขอขอบคุณบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด สำหรับการสนับสนุนทางเทคนิคและการให้เข้าถึงเอกสารการติดตั้ง ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ที่นำเสนอในการศึกษานี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน, แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี, ศูนย์ข้อมูลสาธารณะ, (25 พฤศจิกายน 2567), สืบค้นจาก <https://infocenter.oic.go.th/DATA0000>, 2025.
- [2] บริษัท สามารถคอมเทค จำกัด, รายงานการเสร็จสิ้นโครงการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาที่โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร, หนังสือสัญญาซื้อขายส่งมอบงาน, หน้า 71 – 136, 2023.
- [3] เอกพันธ์ ผัดศรี, “การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่งขนาด 300 kW”, การประชุมวิชาการครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา จังหวัดชลบุรี, หน้า 98, 2018.
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, สรุปการติดตามค่ารังสีอาทิตย์ในประเทศไทย, (25 พฤศจิกายน 2567), สืบค้นจาก <https://pei.dede.go.th/dataset/energy-situation/resource/1e03092b-9928-489e-a20c-5ca12ae1521b>
- [5] ฤกษ์ชัย ยอดอรรถ, “การศึกษาประสิทธิภาพระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบแนวตั้ง”, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2023.
- [6] เชนณัฐ พรหมมินทร์, “การประเมินทางเศรษฐศาสตร์และประสิทธิภาพหลังการติดตั้งระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนหลังคา : กรณีศึกษาห้างสรรพสินค้า”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 5 – 34, 2019.
- [7] พิสิฐพงศ์ ตันติมาสน์, “ศักยภาพในการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์: กรณีศึกษาโรงแรมขนาดเล็กในจังหวัดน่าน”, วารสาร AAD, เล่ม 36, ฉบับที่ 2, หน้า 108 – 123, ก.ค. – ธ.ค. 2023. ISSN 2673-0456.
- [8] โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคาร จังหวัดน่าน และบริษัท สามารถคอมเทค จำกัด, เอกสารขอบเขตโครงการ: การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา, หน้า 1 – 19, 2023.
- [9] สมบัติ นพจนสุภาพ, “ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดค่าไฟฟ้า สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี”, PULINET Journal, 2556
- [10] สุทธิพร ธเนศกุลวัฒนา, คู่มือการจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์, สถาบันพัฒนาเศรษฐกิจ พลังงาน และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, หน้า 6 – 15, 2015.
- [11] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.), แนวทางการทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าสำหรับพลังงานหมุนเวียนภายใต้โครงการ FIT, กรุงเทพฯ: กกพ., หน้า 1 – 25, 2020.

7. ภาคผนวก

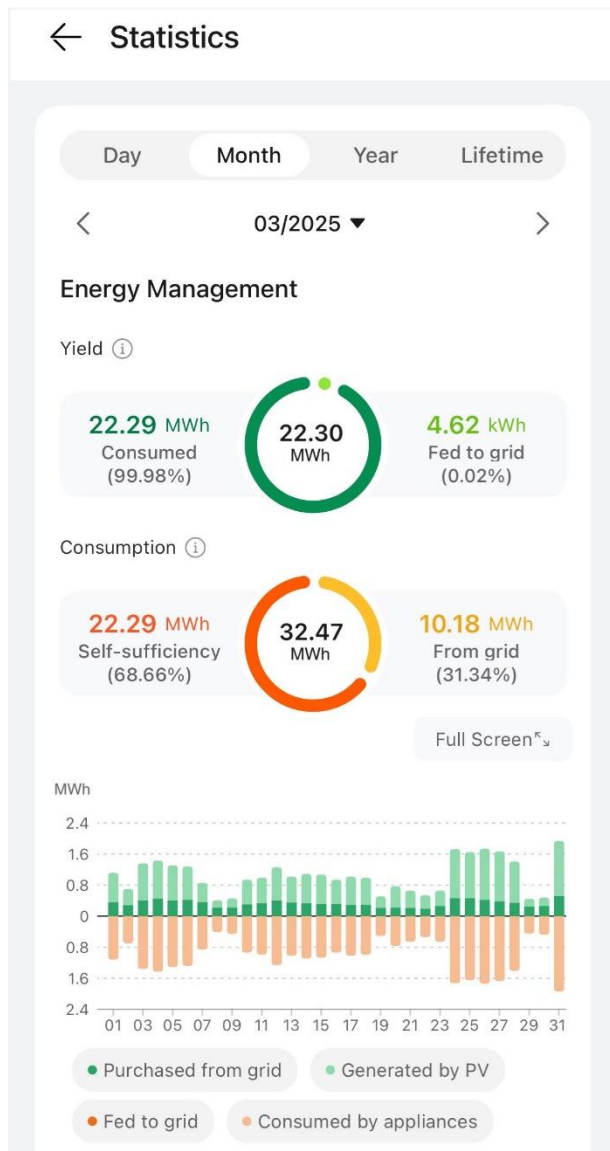
รูปที่ 4 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 200 กิโลวัตต์พีค (kWp)



รูปที่ 5 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาขนาด 150 กิโลวัตต์พีค (kWp)



รูปที่ 6 ตัวอย่างภาพบันทึกหน้าจอแอปพลิเคชัน FusionSolar Monitoring ผ่านสมาร์ตโฟนของ เดือน มีนาคม 2568



การพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ

Development of The Accessible Tourism Recommendation Platform

มณีนยา อุทรักษ์¹ สิริวิมล ลิตะเสน¹ แมรี่เกรซ เฮอแนนเดซ¹ เมทินี แสงแก้ว¹ครรชิต นุชเวช¹ และ สุธีรา พิงส์สวัสดิ์^{2*}¹สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ^{2*}สาขาวิชาวิทยาการคำนวณและเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ¹Email: maneeya2547@gmail.com; ^{2*}Email: aj-tarn@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแพลตฟอร์มสำหรับการแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ 2) เพื่อศึกษาผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ ทำให้ผู้พิการสามารถค้นหาข้อมูลสำหรับการท่องเที่ยวได้สะดวกมากยิ่งขึ้น แพลตฟอร์มพัฒนาด้วยเฟรมเวิร์ก Next.js ร่วมกับภาษา CSS, JavaScript และ MySQL ตามมาตรฐานการพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันภายใต้หลักการ Web Accessibility (WCAG 2.1) ผลการทดลอง พบว่าแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงและตรงตามความต้องการ จากการการประเมินความพึงพอใจจากผู้พิการ จำนวน 70 คน มีระดับความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ = 4.04) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.77) แพลตฟอร์มนี้ช่วยสร้างโอกาสที่เท่าเทียมให้ผู้พิการเข้าถึงการท่องเที่ยวได้โดยไม่มีข้อจำกัด ขจัดการเดินทางที่ยากลำบาก ส่งเสริมให้ผู้พิการรู้สึกมีส่วนร่วมได้รับความสุขจากการเดินทาง ซึ่งส่งผลเชิงบวกต่อสุขภาพจิตรวมถึงคุณภาพชีวิตโดยรวม

คำสำคัญ: ผู้พิการ การท่องเที่ยว เว็บไซต์ที่ทุกคนสามารถเข้าถึงได้ แพลตฟอร์ม

Abstract

The objectives of this research are to: 1) Develop a platform that recommends tourist destinations for people with disabilities, and 2) Study the results of evaluating the satisfaction of users. The platform is designed to enable people with disabilities to conveniently access travel-related information. It was developed using the Next.js framework along with CSS, JavaScript, and MySQL, following web application development standards based on the Web Accessibility Guidelines (WCAG 2.1). The experimental results indicate that the developed platform is functional and meets user requirements. Based on satisfaction evaluations from 70 users with disabilities, users are satisfied at a high level, with a mean score of 4.04 and a standard deviation of 0.77. The platform provides equal opportunities for people with disabilities to access tourism without barriers, reduces difficulties in traveling, and promotes engagement and enjoyment in travel activities. This, in turn, contributes positively to mental health and overall quality of life.

Keyword: Disabled people, Tourism, Web Accessibility, Platform

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การท่องเที่ยวมีผลดีต่อสุขภาพจิตอย่างมาก การเปลี่ยนบรรยากาศไปยังสถานที่ใหม่ ๆ หรือพักจากกิจวัตรประจำวันช่วยลดความเครียด เพิ่มพลังใจ และทำให้รู้สึกผ่อนคลายมากขึ้น อีกทั้งการได้สัมผัสธรรมชาติ พบปะผู้คนใหม่ ๆ ทำกิจกรรมที่ชื่นชอบยังช่วยเพิ่มความสุขและสร้างสมดุลทางอารมณ์ได้ด้วย [1] อย่างไรก็ตาม สำหรับผู้พิการการเดินทางมักเผชิญอุปสรรคที่ซับซ้อนกว่า จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจปัญหาเหล่านี้เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและบริการให้ตอบโต้หนึ่ง ในปัญหาหลักคือการเข้าถึงสถานที่ท่องเที่ยวที่ยังไม่เอื้ออำนวย เช่น ขาดทางลาดในพื้นที่สูงหรือตามสะพาน รวมถึงไม่มีห้องน้ำที่เหมาะสมสำหรับผู้พิการ สิ่งอำนวยความสะดวกที่ไม่เพียงพอทำให้ผู้พิการเดินทางได้ลำบาก ในบางครั้งอาจไม่สามารถท่องเที่ยวได้เลย ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ที่รองรับผู้พิการก็มักไม่เพียงพอหรือไม่ชัดเจน [2] เว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันท่องเที่ยวหลายแห่งขาดรายละเอียดเรื่องการเข้าถึงและสิ่งอำนวยความสะดวก ส่งผลให้ผู้พิการต้องค้นหาข้อมูลจากแหล่งอื่นที่อาจไม่ครบถ้วน ข้อมูลไม่เป็นปัจจุบัน ด้านบริการช่วยเหลือก็เป็นประเด็นสำคัญ สถานที่จำนวนมากไม่มีเจ้าหน้าที่ผ่านการฝึกอบรมเพื่อดูแลผู้พิการ [3] เช่น ช่วยเคลื่อนย้ายหรือสนับสนุนด้านการสื่อสาร อีกทั้งความไม่เข้าใจความต้องการเฉพาะของผู้พิการจากพนักงานบริการอาจทำให้ประสบการณ์ท่องเที่ยวสะดุด

นอกจากนี้ การเข้าถึงข้อมูลข่าวสารและบริการผ่านเว็บไซต์ถือเป็นสิทธิขั้นพื้นฐานในสังคมดิจิทัล ผู้พิการจำนวนมากยังเผชิญอุปสรรคในการใช้งานเว็บไซต์ที่ไม่ได้ออกแบบให้รองรับความต้องการเฉพาะเว็บไซต์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานการเข้าถึง (Web Accessibility) จึงเป็นประเด็นสำคัญทั้งในมุมสิทธิมนุษยชนและการออกแบบเพื่อสังคมที่เท่าเทียม (Inclusive Society) [4]

ด้วยแนวคิดและปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ โดยมุ่งเน้นการรวบรวมข้อมูลโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหาร และคาเฟ่ ที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสมสำหรับผู้พิการ ปัจจุบันเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันประเภทนี้ยังมีไม่มากนักในประเทศไทย ซึ่งถือเป็นความต้องการที่สำคัญของกลุ่มผู้พิการ เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มความสะดวกสบายและลดเวลาในการค้นหาสถานที่ท่องเที่ยวได้ การพัฒนาแพลตฟอร์มดังกล่าวจะช่วยลดข้อจำกัด เพิ่มความสะดวกและส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงสังคม (Inclusive Tourism) อีกทั้งยังสอดคล้องกับพระราชบัญญัติส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ พ.ศ. 2550 และมาตรฐานสากลด้าน Web Accessibility (WCAG 2.1) ของ W3C [5]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านกลุ่มเป้าหมาย

ประชากร คือ ผู้พิการที่อาศัยอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 70 คน

กลุ่มตัวอย่าง คือ ผู้พิการที่อาศัยอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำนวน 15 คน โดยใช้วิธีการเลือกแบบ

เจาะจง กลุ่มผู้พิการที่มีความสนใจและมีประสบการณ์ในการท่องเที่ยว

1.3.2 ขอบเขตด้านประเภทของสถานที่

โรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหารและคาเฟ่ที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ เช่น ทางลาด ลิฟต์ ห้องน้ำและที่จอดรถเฉพาะ เป็นต้น ในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพและเขตปริมณฑล จำนวนรวม 197 แห่ง

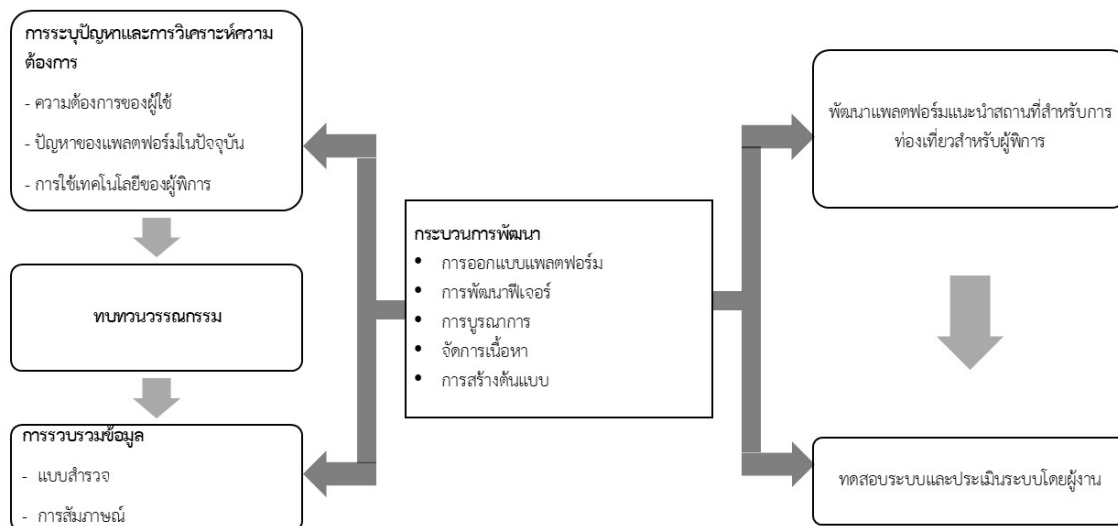
1.3.3 ขอบเขตด้านฟังก์ชันการทำงานของแพลตฟอร์ม

การพัฒนาแพลตฟอร์มกำหนดฟังก์ชันการทำงานหลัก ดังนี้

- ระบบแนะนำโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหารและคาเฟ่ตามประเภทที่ผู้ใช้สนใจ
- การแสดงรายละเอียดของสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการของแต่ละสถานที่อย่างชัดเจน
- ระบบค้นหาและกรองข้อมูลตามความต้องการเฉพาะ เช่น เลือกเฉพาะสถานที่ที่มีทางลาดหรือห้องน้ำผู้พิการ
- การนำเสนอข้อมูลในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐาน Web Accessibility (WCAG 2.1) ของ W3C เพื่อให้ผู้พิการสามารถใช้งานได้อย่างเท่าเทียม

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ โดยมีกรอบแนวคิดที่ประกอบด้วยปัจจัยสำคัญดังนี้



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ ผู้วิจัยอาศัยหลักวงจรชีวิตของการพัฒนาซอฟต์แวร์ หรือ SDLC (System Development Life Cycle) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ศึกษาปัญหาและความต้องการของระบบ

ปัญหาของงานวิจัยเรื่องการค้นหาโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหาร คาเฟ่ที่รองรับผู้พิการในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล คือการขาดข้อมูลที่เป็นระบบ ครอบคลุมเกี่ยวกับจำนวนและมาตรฐานของสถานที่ที่รองรับผู้พิการอย่างแท้จริง แม้ว่าบางแห่งจะระบุว่า มีสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ แต่ในทางปฏิบัติมักไม่สามารถใช้งานได้จริง เช่น ทางลาดไม่เหมาะสมหรือห้องน้ำไม่รองรับทุกประเภทของความพิการ อีกทั้งยังไม่มีมาตรฐานกลางในการประเมิน ความตระหนักของผู้ประกอบการยังมีจำกัด และการประชาสัมพันธ์ข้อมูลที่เข้าถึงได้สำหรับผู้พิการยังมีไม่เพียงพอ ทำให้เกิดอุปสรรคในการวางแผนเดินทางและส่งผลกระทบต่อพัฒนาการท่องเที่ยวอย่างเท่าเทียม จึงมีแนวคิดในการพัฒนาแพลตฟอร์มรวบรวมข้อมูลโรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหาร และคาเฟ่ที่รองรับ

ผู้พิการ เพื่อเป็นแหล่งข้อมูลกลางที่ถูกต้องเข้าถึงได้ง่าย โดยระบบดังกล่าวจะช่วยให้ผู้พิการสามารถค้นหาสถานที่ที่เหมาะสมกับความต้องการของตนเองได้สะดวกยิ่งขึ้น

2.2 วิเคราะห์ปัญหา และความต้องการของผู้ใช้งาน

สรุปประเด็นสำคัญจากข้อมูลที่เก็บมา เพื่อระบุปัญหา ความต้องการของผู้ใช้งาน และคุณสมบัติหลัก (Functional Requirements) ที่แพลตฟอร์มต้องมี

2.3 วิเคราะห์และออกแบบระบบโดยทำการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ

จากการวิเคราะห์ระบบงาน ทำให้สามารถระบุส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งผู้พัฒนาได้ทำการออกแบบระบบงานในส่วนต่าง ๆ รวมถึงแผนภาพการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ (System Architecture) ผังงาน (Flowchart) แผนภาพการทำงานของผู้ใช้ระบบ (Use Case Diagram) แผนภาพลำดับเหตุการณ์ (Sequence Diagram) แผนภาพกิจกรรม (Activity Diagram) แผนภาพจำลองเชิงคลาส (Class Diagram) รวมถึงพจนานุกรมข้อมูล (Data Dictionary) ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการพัฒนาระบบเชิงวัตถุ

2.4 พัฒนาระบบและทดสอบระบบ

แพลตฟอร์มพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยใช้เฟรมเวิร์ก Next.js ร่วมกับภาษา CSS, JavaScript โดยจัดการฐานข้อมูลด้วย MySQL

2.5 เก็บรวบรวมข้อมูล สรุป วิเคราะห์ และจัดทำคู่มือการใช้งานระบบ

นำระบบไปให้ผู้ใช้งานทดลองใช้ในสถานการณ์จริง เพื่อเก็บข้อมูลด้านประสิทธิภาพ ความพึงพอใจ และข้อเสนอแนะ

2.6 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

แบบประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานของผู้ใช้งาน เป็นการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ตามวิธีของไลเคิร์ต (Likert) ของ Faye Anderson (2020) [7] ที่ประกอบด้วยมาตราอันดับ 5 ระดับ

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 – 5.00 หมายความว่า ระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.51 – 4.50 หมายความว่า ระดับมาก

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 – 3.50 หมายความว่า ระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 – 2.50 หมายความว่า ระดับน้อย

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 – 1.50 หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

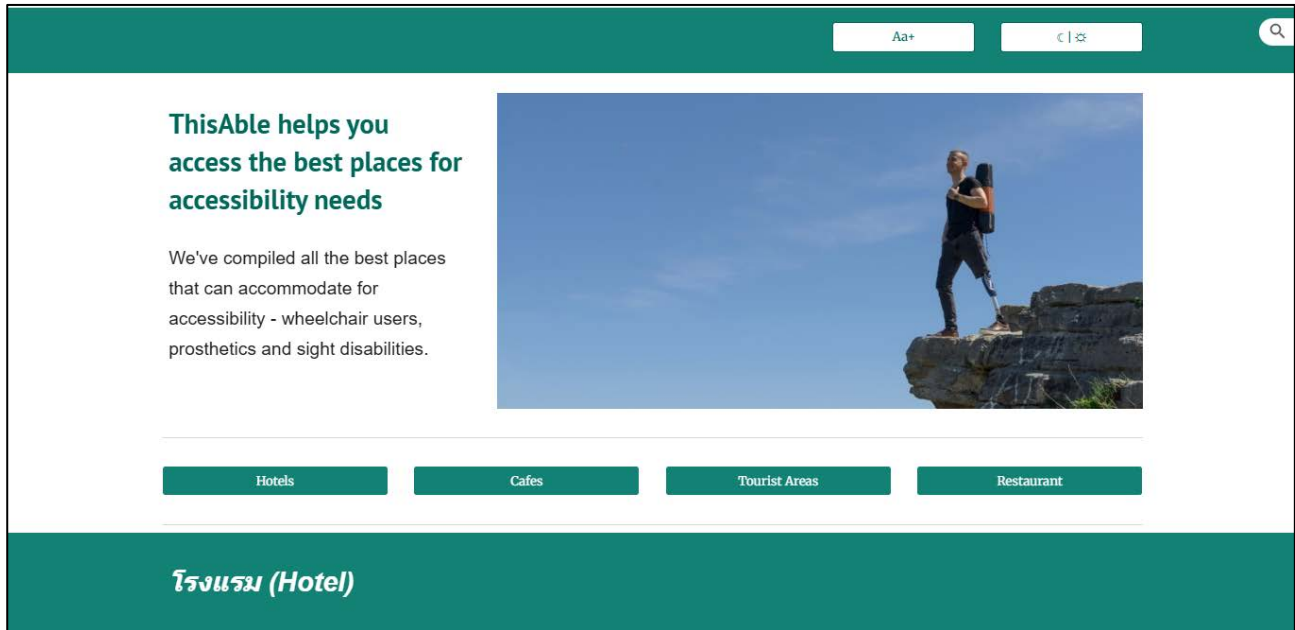
ผู้วิจัยได้นำแบบประเมินที่พัฒนาขึ้นเสนอให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านพิจารณาความเหมาะสมของเนื้อหาและตัวชี้วัดแต่ละข้อ ผลการประเมินถูกนำมาคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Congruency: IOC) พบว่าค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 0.50 จึงสรุปได้ว่าแบบประเมินมีความสอดคล้องและสามารถใช้งานได้เหมาะสม

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบประเมินด้วยค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.932 บ่งชี้ว่าแบบประเมินมีความเที่ยงอยู่ในระดับสูง

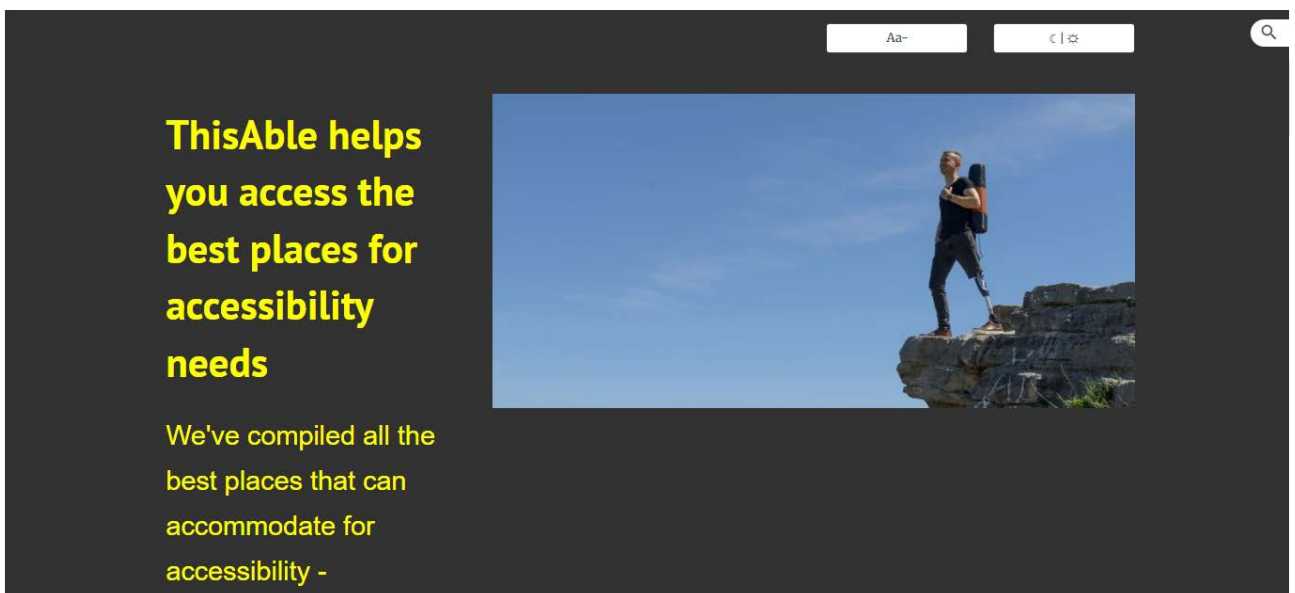
3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการศึกษาและการวิเคราะห์เชิงระบบ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน ทั้งนี้แพลตฟอร์มดังกล่าวได้รับการออกแบบให้รองรับการแสดงผล 4 รูปแบบ ได้แก่ (1) ขนาดฟอนต์ปกติ (2) ขนาดฟอนต์ใหญ่ และ (3) พื้นหลังสีดำขนาดฟอนต์ปกติ (4) พื้นหลังสีดำขนาดฟอนต์ใหญ่ ดังแสดงตัวอย่างบางรูปแบบในภาพที่ 2 และ 3



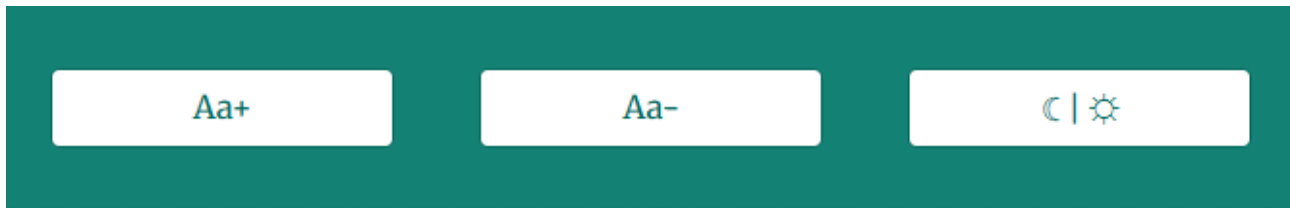
ภาพที่ 2 หน้าจอหลัก (ขนาดฟอนต์ปกติ)



ภาพที่ 3 หน้าจอหลัก (พื้นสีดำขนาดฟอนต์ใหญ่)

จากภาพที่ 2 และ 3 ผู้ใช้งานสามารถปรับการมองเห็นได้ตามความต้องการของตนเอง โดยระบบที่ออกแบบนี้รองรับผู้พิการที่มองเห็นเลือนราง (Low Vision) โดยคำนึงถึงการเข้าถึง (Accessibility) การใช้งานที่ง่าย ชัดเจน และสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความต้องการ โดยใช้สีที่ตัดกันชัดเจนระหว่างพื้นหลังและตัวอักษร อีกทั้งยังรองรับการขยายข้อความ (Zoom) ได้โดยไม่ทำให้

โครงสร้างเพื่อน ทั้งนี้ยังเป็นไปตามมาตรฐาน WCAG (Web Content Accessibility Guidelines) และมี Accessibility Toolbar สำหรับปรับขนาดตัวอักษรและโหมดสี [8] ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 หน้าจอส่วนของ Accessibility Toolbar

เมื่อผู้ใช้งานเลือกปรับมุมมองตามความต้องการแล้ว สามารถค้นหาสถานที่ท่องเที่ยวได้จากการเลือกสิ่งอำนวยความสะดวก ซึ่งประกอบไปด้วย ที่จอดรถสำหรับผู้พิการ รถเข็น ไม้เท้า ทางลาด ที่จับเสริมในห้องน้ำ และห้องน้ำผู้พิการ เป็นต้น ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 หน้าจอสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ

หากผู้พิการทำการเลือกสิ่งอำนวยความสะดวกที่ต้องการ ระบบจะประมวลผลและแสดงข้อมูลของสถานที่ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าว โดยนำเสนอรายละเอียดที่ชัดเจน ครอบคลุมข้อมูลที่จำเป็นต่อการตัดสินใจ รวมถึงสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานของสถานที่ท่องเที่ยว ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 6 หน้าจอแสดงข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวที่ตรงตามเงื่อนไข



ภาพที่ 7 หน้าจอแสดงข้อมูลสิ่งอำนวยความสะดวกพื้นฐานของสถานที่ท่องเที่ยว

3.2 ผลศึกษาผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ

ผู้วิจัยดำเนินการทดลองใช้แพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 15 คน โดยมีการทดลองใช้ระบบพร้อมทั้งสอบถามความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบ จากนั้นนำผลการเรียนรู้มาวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติพื้นฐานเทียบกับเกณฑ์และสรุปผลแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลความพึงพอใจการใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ จากกลุ่มตัวอย่าง

รายการ	$\bar{x}$	S.D.	ระดับความคิดเห็น
1. ความง่ายในการเข้าใช้งานแพลตฟอร์ม	4.40	0.49	มาก
2. ความสะดวกในการค้นหาสถานที่ท่องเที่ยว	4.73	0.59	มากที่สุด
3. ความชัดเจนของข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ	4.52	0.60	มากที่สุด
4. ความเร็วในการโหลดหน้าเว็บและการแสดงผล	4.11	0.49	มาก
5. การออกแบบและการจัดวางข้อมูลบนแพลตฟอร์ม (User Interface)	4.24	0.59	มาก
6. การตอบสนองและความง่ายในการใช้งานฟังก์ชันค้นหา/กรอง	4.42	0.60	มาก
7. ความพึงพอใจโดยรวมต่อแพลตฟอร์ม	4.37	0.56	มาก
โดยรวม	4.40	0.56	มาก

จากตารางที่ 1 ผลการทดลองใช้แพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ จากกลุ่มตัวอย่าง พบว่า มีระดับความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$ = 4.40) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.56) รายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ความสะดวกในการค้นหาสถานที่ท่องเที่ยว รองลงมาคือ ความชัดเจนของข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ การตอบสนองและความง่ายในการใช้งานฟังก์ชันค้นหา/กรอง ความง่ายในการเข้าใช้งานแพลตฟอร์ม การออกแบบและการจัดวางข้อมูลบนแพลตฟอร์ม (User Interface) ความเร็วในการโหลดหน้าเว็บและการแสดงผล ตามลำดับ

ผู้วิจัยดำเนินการสอบถามกลุ่มผู้พิการ จำนวน 70 คน ที่มีต่อผลการประเมินความพึงพอใจ จากนั้นนำผลการเรียนรู้มาวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติพื้นฐานเทียบกับเกณฑ์และสรุปผล แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลความพึงพอใจการใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ จากกลุ่มประชากร

รายการ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความคิดเห็น
1. ความง่ายในการใช้งานแพลตฟอร์ม	3.78	0.76	มาก
2. ความสะดวกในการค้นหาสถานที่ท่องเที่ยว	4.03	0.81	มาก
3. ความชัดเจนของข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ	3.99	0.85	มาก
4. ความเร็วในการโหลดหน้าเว็บและการแสดงผล	4.03	0.81	มาก
5. การออกแบบและการจัดวางข้อมูลบนแพลตฟอร์ม (User Interface)	4.28	0.66	มาก
6. การตอบสนองและความง่ายในการใช้งานฟังก์ชันค้นหา/กรอง	4.09	0.78	มาก
7. ความพึงพอใจโดยรวมต่อแพลตฟอร์ม	4.08	0.75	มาก
โดยรวม	4.04	0.77	มาก

จากตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้พิการต่อการใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ พบว่า มีระดับความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ = 4.04) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.77) รายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ การออกแบบและการจัดวางข้อมูลบนแพลตฟอร์ม (User Interface) สะท้อนว่าการออกแบบมีความเหมาะสม ชัดเจน และใช้งานง่าย รองลงมาคือ การตอบสนองและความง่ายในการใช้งานฟังก์ชันค้นหา/กรอง ความสะดวกในการค้นหาสถานที่ท่องเที่ยว ความเร็วในการโหลดหน้าเว็บและการแสดงผล ความชัดเจนของข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ และความง่ายในการใช้งานแพลตฟอร์ม แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้ส่วนใหญ่ยังสามารถใช้งานได้ดี แม้มีบางส่วนที่อาจพบความยุ่งยากบ้างในขั้นตอนแรก

การพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ 1) การแสดงข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ 2) การค้นหาและกรองข้อมูลตามความต้องการเฉพาะ และ 3) การแสดงรายละเอียดของสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับผู้พิการ จากความคิดเห็นของผู้ใช้งาน พบว่าระบบมีความเหมาะสมในภาพรวมอยู่ในระดับมาก

สรุปผลการประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ พบว่าโดยภาพรวมอยู่ในระดับมาก มีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ = 4.04) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.77) แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบได้จริง อีกทั้งมีความรู้ความเข้าใจในการใช้งานระบบอย่างเหมาะสม ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ กัลยา สว่างคง สถาวร เลิศสุวรรณกุล และปวินท์ สว่างอารมย์ [9] ที่ได้ศึกษาการพัฒนาแอปพลิเคชันด้านการท่องเที่ยวสำหรับผู้สูงอายุและคนพิการ โดยมีแนวทางการพัฒนาแอปพลิเคชัน Smart DASTA ระยะที่สอง ซึ่งเน้นหลักการออกแบบที่เป็นมิตรกับผู้ใช้ (User-friendly Design) การจัดระดับการเข้าถึงของสถานที่ผ่านระบบที่เข้าใจง่าย การให้บริการข้อมูลแบบทันทีผ่านระบบแชทออนไลน์ การสร้างระบบอาสาสมัครเพื่อช่วยเหลือผู้ใช้งาน และการเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานมีส่วนร่วมในการอัปเดตข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยว

ผลจากการดำเนินการวิจัยและการทดลองใช้งานระบบ พบว่าระบบสามารถใช้งานได้ตามขอบเขต กล่าวคือ ระบบสามารถแสดงข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการ การค้นหาและกรองข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวตามความต้องการเฉพาะ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อจำกัดของระบบคือ ข้อมูลบนแพลตฟอร์มได้มาจากแหล่งข้อมูลสาธารณะ การสำรวจภาคสนาม และการตรวจสอบเบื้องต้นเพียงในพื้นที่จังหวัดกรุงเทพและเขตปริมณฑลเท่านั้น โดยการพัฒนาครั้งนี้อยู่ในรูปแบบต้นแบบ (Prototype) เพื่อการทดลองใช้งาน และยังไม่ครอบคลุมการให้บริการเชิงพาณิชย์อย่างเต็มรูปแบบ

4. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแพลตฟอร์มแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวสำหรับผู้พิการสามารถช่วยแก้ไขปัญหาการเข้าถึงข้อมูลด้านการท่องเที่ยวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการรวบรวมและแสดงข้อมูล โรงแรม สถานที่ท่องเที่ยว ร้านอาหาร และคาเฟ่ที่รองรับผู้พิการ พร้อมฟังก์ชันค้นหา กรองข้อมูล และแผนที่นำทางที่ใช้งานง่าย ผลการประเมินจากผู้ทดสอบพบว่าระบบมีความถูกต้องในการแสดงข้อมูลและใช้งานได้สะดวก ช่วยให้ผู้พิการสามารถวางแผนการเดินทางได้ด้วยตนเองอย่างมั่นใจมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการส่งเสริมการท่องเที่ยวเพื่อทุกคน สร้างความตระหนักให้ผู้ประกอบการเห็นถึงความสำคัญของการจัดสิ่งอำนวยความสะดวกที่เท่าเทียมและยั่งยืนในภาคการท่องเที่ยว

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะการนำผลวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. ข้อมูลและฟังก์ชันที่พัฒนาในแพลตฟอร์มสามารถนำไปช่วยผู้พิการในการวางแผนเดินทางได้อย่างสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น เช่น การเลือกสถานที่ที่มีทางลาด ห้องน้ำผู้พิการ พื้นที่จอดรถ หรือเส้นทางที่เข้าถึงได้จริง
2. แพลตฟอร์มช่วยผลักดันแนวคิดการท่องเที่ยวที่รองรับคนทุกกลุ่ม โดยเฉพาะผู้พิการ ซึ่งสามารถต่อยอดเป็นแคมเปญท่องเที่ยว หรือโครงการความร่วมมือระหว่างภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย เพื่อสร้างสังคมที่เท่าเทียมและเป็นมิตรต่อผู้พิการ

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. เพิ่มความสามารถในการรองรับผู้พิการประเภทอื่น ๆ เช่น ผู้พิการทางการได้ยินหรือผู้พิการทางการมองเห็น ซึ่งยังไม่ได้ถูกพิจารณาเป็นกลุ่มหลักในการวิจัยครั้งนี้
2. ข้อมูลที่ได้จากผู้ใช้และผลการวิจัยสามารถนำไปต่อยอดด้วย Machine Learning เพื่อสร้างระบบแนะนำสถานที่ที่เหมาะสมกับความต้องการเฉพาะของผู้พิการแต่ละประเภท เช่น ผู้พิการทางการเคลื่อนไหว ผู้พิการทางสายตา หรือผู้พิการทางการได้ยิน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การท่องเที่ยวเพื่อคนทั้งมวล (Tourism for All), การท่องเที่ยวแห่งประเทศไทย, 2563.
- [2] Baird, A., and Huber, S, “Hands-on learning: The significance of hardware assembly in IT education,” Journal of Computing and Information Technology, Vol. 28, No.2, pp. 105–116, 2020.
- [3] Ivana Harari, Sergio Luján-Mora and Javier Díaz, “Web accessibility evaluation from the perception of people with disabilities: case of Argentina,” Universal Access in the Information Society, Vol. 24, No.3, pp. 2687–2793, Oct. 2025.
- [4] Henry, S. L., Abou-Zahra, S., and Brewer, J, “The Role of Accessibility in a Universal Web,” Communications of the ACM, Vol. 57, No. 7, pp. 36–43, Apr. 2014.
- [5] World Wide Web Consortium (W3C). (5 June 2018). Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1. Retrieved from <https://www.w3.org/TR/WCAG21>.
- [6] พระราชบัญญัติส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ พ.ศ. 2550, ราชกิจจานุเบกษา, 2550.
- [7] Faye Anderson, Likert Scale Data Linear Modeling, Independently Published, 2020.

- [8] Caldwell, B., Cooper, M., Reid, L. G., and Vanderheiden, G. (11 December 2008). Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.0. W3C Recommendation. Retrieved from <https://www.w3.org/TR/WCAG20>.
- [9] กัลยา สว่างคง สถาวร เลิศสุวรรณกุล และปวินท์ สว่างอารมย์, “การพัฒนาแอปพลิเคชันด้านการท่องเที่ยวสำหรับกลุ่มผู้สูงอายุและคนพิการ,” วารสารการบริหารและสังคมศาสตร์ปริทรรศน์, ปีที่ 8, ฉบับที่ 3, หน้า 75-88, 2568.

การพัฒนาแชทบอทต้นแบบเพื่อแนะนำการบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษีดัตตัน

Development of a Prototype Chatbot for Thai Traditional Exercise (Rue-Si Datton)

ศรัณยู ทาคายามะ¹ พิมพ์ลภัส ดาวหาร¹ ญัณฐณิชา สิริสุนทร¹ วรณัฐ มีภูมิรัฐ^{2*} เปรมรัตน์ พูลสวัสดิ์²ยุวธิดา ชิวปรีชา² และสุธีรา พึงสวัสดิ์²¹สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ²สาขาวิชาวิทยาการคำนวณและเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ¹Email: 650579@hcu.ac.th ²*Email: pleeworanuch@gmail.com

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแชทบอทต้นแบบสำหรับแนะนำการบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษีดัตตัน 15 ท่า ครอบคลุมการบริหารกล้ามเนื้อส่วน ศีรษะและใบหน้า แขนขาส่วนบน (แขน ข้อศอก ข้อมือ และนิ้วมือ) ลำตัว (หลัง เอว และสะโพก) แขนขาส่วนล่าง (ขา เข่า ข้อเท้า และนิ้วเท้า) และบริเวณคอ บ่า และไหล่ ระบบต้นแบบนี้พัฒนาโดยใช้ Dialogflow ร่วมกับ LINE API ระบบถูกออกแบบให้ใช้งานง่ายผ่านเมนูเพื่อลดการพิมพ์ เหมาะสมทั้งกับผู้เข้ารับบริการของสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาวและประชาชนทั่วไปที่สนใจ หลังการพัฒนาได้มีการทดสอบการใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญ 15 คน และผู้เข้ารับบริการ 15 คน จากสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว ผลการประเมินพบว่าผู้ที่มีความพึงพอใจโดยรวมในระดับมากที่สุด มีคะแนนค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.83 มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.46 สรุปได้ว่า แชทบอทแนะนำการบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษีดัตตันเป็นต้นแบบระบบดิจิทัลที่มีประสิทธิภาพในการเผยแพร่ภูมิปัญญาการแพทย์แผนไทย และเป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการระหว่างภูมิปัญญาดั้งเดิมกับเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อส่งเสริมสุขภาพอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : การแพทย์แผนไทย การบริหารกายแบบไทย ฤๅษีดัตตัน แชทบอท การส่งเสริมสุขภาพ

Abstract

This research aimed to develop a prototype chatbot for recommending physical exercises based on 15 Rue-Si Datton postures, covering the muscles of the head and face, upper limbs (arms, elbows, wrists, and fingers), trunk (back, waist, and hips), lower limbs (legs, knees, ankles, and toes), and the neck and shoulder areas. The prototype system was developed using Dialogflow in conjunction with the LINE API. A menu-based interaction design was implemented to minimize typing and enhance usability, especially for clients of the Neddado Institute of Thai Traditional Medicine and the public. After development, the system was evaluated with 30 participants, consisting of 15 experts from the Institute and 15 service users. The results showed that overall user satisfaction

was at the highest level, with a mean score of 4.83 and a standard deviation of 0.46. In conclusion, the chatbot for recommending Rue-Si Datton postures serves as an effective digital prototype for supporting Thai traditional health practices. The system demonstrates the potential of integrating traditional medical knowledge with modern digital technology to promote sustainable health.

Keywords: Thai traditional medicine, Thai traditional exercise, Rue-Si Datton, Chatbot, Health promotion

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การแพทย์แผนไทยจัดเป็นองค์ความรู้ที่มีคุณค่าและได้รับการยอมรับในฐานะการแพทย์ทางเลือกที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพ ป้องกันโรค และบำบัดอาการเบื้องต้น หนึ่งในวิธีการที่โดดเด่นคือ การบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษีดัดตน (Rue-Si Datton) ซึ่งเป็นศาสตร์การออกกำลังกายเชิงบำบัดที่มีมาแต่โบราณ โดยมีการบันทึกไว้ในศิลาจารึกวัดพระเชตุพนวิมลมังคลารามราชวรมหาวิหาร (วัดโพธิ์) ตั้งอยู่ที่ถนนสนามไชย แขวงพระบรมมหาราชวัง เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร และได้รับการยกย่องจากองค์การศึกษาศาสตร์และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (UNESCO) ให้เป็นมรดกความทรงจำแห่งโลก (Memory of the World) เมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 ต่อมากรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก โดยสถาบันการแพทย์แผนไทยและคณะผู้เชี่ยวชาญจากสหวิชาชีพที่เกี่ยวข้องด้านสุขภาพ ร่วมกันคัดเลือกท่าฤๅษีดัดตนดั้งเดิมของวัดโพธิ์ทั้ง 80 ท่า ดัดแปลงประยุกต์ใช้เพื่อดูแลสุขภาพและปรับสมดุลโครงสร้างร่างกาย เป็นท่าหลักพื้นฐาน 15 ท่า [1]

การปฏิบัติท่าฤๅษีดัดตน 15 ท่าอย่างต่อเนื่องมีประโยชน์ในการเสริมสร้างความยืดหยุ่นของกล้ามเนื้อ ลดอาการปวดเมื่อย และช่วยฟื้นฟูสมรรถภาพทางกาย งานวิจัยพบว่า การออกกำลังกายด้วยท่าฤๅษีดัดตนสามารถลดอาการปวดกล้ามเนื้อคอ และไหล่ได้เทียบเท่ากับการออกกำลังกายแบบโยคะ และการยืดเหยียดกล้ามเนื้อ [2] รวมถึงเพิ่มความยืดหยุ่นของกระดูกสันหลังส่วนล่างในนักศึกษาหญิง [3] นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยอีกหลายเรื่องที่สนับสนุนประโยชน์ของท่าฤๅษีดัดตน เช่น ผลของการบริหารร่างกายแบบฤๅษีดัดตนต่อการลดอาการปวดเข่าในผู้สูงอายุ ตำบลหมื่น อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี โดยพบว่าภายหลังจากการรักษาอาการปวดเข่าด้วยการบริหารร่างกายแบบฤๅษีดัดตน กลุ่มตัวอย่างทุกรายมีอาการปวดลดลง [4] และงานวิจัยผลของโปรแกรมฤๅษีดัดตน ในผู้ป่วยกล้ามเนื้อหลังตึงเขตรับผิดชอบโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์ สามารถสรุปผลได้ว่าโปรแกรมฤๅษีดัดตน 5 ท่า (ท่าแก้ลมเอว ท่าแก้ลมสันหลังและเข่า ท่าแก้ลมปัสสาวะในเอว ท่าแก้กร่อน และท่าแก้ไหล่สะโพกขัด) สามารถเพิ่มความยืดหยุ่นกล้ามเนื้อหลังได้ และควรมีการส่งเสริมในเรื่องของการยืดกล้ามเนื้อก่อนการทำงาน ในกลุ่มอาชีพที่ต้องยกของหนัก ทำงานในอิริยาบถเดิมเป็นเวลานาน กลุ่มวัยทำงาน และผู้สูงอายุ [5]

อย่างไรก็ตาม ยังมีประชาชนจำนวนหนึ่งขาดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับข้อมูลท่าฤๅษีดัดตนและประโยชน์ที่ได้รับ ด้วยมีการเผยแพร่ข้อมูลที่หลากหลายขึ้นกับแหล่งและความเชื่อของแต่ละสถาบัน ทำให้ข้อมูลบางส่วนขัดแย้งกัน แต่สำหรับสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว เขตบางนา กรุงเทพมหานคร เปิดให้บริการตรวจรักษาทางแพทย์แผนไทย โดยไม่คิดค่าใช้จ่าย ได้มีนำท่าฤๅษีดัดตนมาใช้ในการรักษาเป็นเวลายาวนาน แต่ข้อมูลส่วนใหญ่จัดบันทึกในรูปแบบกระดาษ ส่งผลให้การเข้าถึง การวิเคราะห์ และใช้ประโยชน์จากข้อมูลไม่เต็มประสิทธิภาพ นอกจากนี้บุคลากรทางการแพทย์มีจำนวนจำกัด การสอนท่าฤๅษีดัดตนรายบุคคลใช้เวลานาน จึงไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้เข้ารับบริการได้เต็มที่

สำหรับประเทศไทยการใช้งานอินเทอร์เน็ตและเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มีแนวโน้มสูงขึ้น ระบบแชทบอท (Chatbot) เป็นเครื่องมือหนึ่งที่สามารถสื่อสารกับผู้ใช้งานได้แบบโต้ตอบธรรมชาติ ปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านสุขภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การดูแลช่องปากผู้สูงอายุ ลดความเครียด รวมถึงสุขภาพด้านอื่น ๆ ซึ่งทำให้การให้บริการข้อมูลสุขภาพ มีความสะดวกรวดเร็ว ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ในยุคดิจิทัล ผู้ใช้งานส่วนใหญ่มีความพึงพอใจ ด้วยแชทบอทมีจุดเด่นในแง่ของการมีปฏิสัมพันธ์ทางอารมณ์ที่ดี สร้างความน่าสนใจด้วยมีสื่อแนะนำเสนอข้อมูลที่หลากหลาย เช่น อินโฟกราฟิกส์ วิดีทัศน์ ทำให้เข้าใจง่าย และประหยัดค่าใช้จ่าย จึงช่วยส่งเสริมการดูแลสุขภาพของประชาชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6-8] และจากประสบการณ์ในช่วงสถานการณ์ COVID-19 พบว่ามีการนำแชทบอทมาใช้เป็นเครื่องมือให้ความรู้และสื่อสารด้านสุขภาพ เช่น การสร้างความมั่นใจและเพิ่มการยอมรับวัคซีนในกลุ่มผู้ปกครองเด็กและผู้สูงอายุ โดยระบบสามารถให้ข้อมูลและคำแนะนำด้านสุขภาพแก่ผู้ใช้งานได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังช่วยลดภาระของบุคลากรทางการแพทย์และสนับสนุนให้ผู้รับบริการดูแลสุขภาพตนเองได้ดีขึ้น [9] ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์สุขภาพดิจิทัลกระทรวงสาธารณสุข (2564 – 2568) ที่ต้องการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้ในการบริหารสุขภาพไทย เพื่อยกระดับการบริการให้มีประสิทธิภาพ รวดเร็ว และครอบคลุมมากขึ้น โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มการเข้าถึงการรักษา ลดความเหลื่อมล้ำ และส่งเสริมสุขภาพของประชาชนอย่างยั่งยืน [10]

แม้ว่าจะมีงานวิจัยและการใช้งานแชทบอทด้านสุขภาพ แต่ยังไม่มีการพัฒนาระบบแชทบอทสำหรับทำฤๅษีคัดตน 15 ท่า เพื่อเผยแพร่ความรู้และแนะนำการปฏิบัติอย่างเป็นระบบ การสอนแบบรายบุคคลหรือผ่านเอกสารหรือวิดีโอทัศน์ยังไม่สามารถเข้าถึงผู้ใช้ได้เต็มที่ และข้อมูลยังไม่เป็นมาตรฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแชทบอทแนะนำการบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษีคัดตน 15 ท่า (ต่อไปจะเรียกว่า แชทบอทต้นแบบ HealthMe) ครอบคลุมการบริหารกล้ามเนื้อส่วน ศีรษะและใบหน้า แขนขาส่วนบน (แขน ข้อศอก ข้อมือ และนิ้วมือ) ลำตัว (หลัง เอว และสะโพก) แขนขาส่วนล่าง (ขา เข่า ข้อเท้า และนิ้วเท้า) และบริเวณคอ บ่า และไหล่ ในรูปแบบเมนู (Menu-based Chatbot) เพื่อให้ผู้ใช้งานเลือกโดยการพิมพ์ข้อความน้อยที่สุด ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เข้าถึงแหล่งข้อมูลได้ง่ายขึ้น เพิ่มความสะดวกและเหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ผู้เข้ารับบริการจากสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว และประชาชนทั่วไปที่สนใจ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe แบบเมนูที่ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลท่าฤๅษีคัดตน 15 ท่า ได้อย่างสะดวก

1.2.2 เพื่อประเมินความพึงพอใจในการใช้งานแชทบอทต้นแบบ HealthMe จากผู้เชี่ยวชาญ และผู้เข้ารับบริการของสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตเนื้อหา (Content Scope)

- การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe เพื่อเผยแพร่ข้อมูลการปฏิบัติท่าฤๅษีคัดตน 15 ท่า
- ข้อมูลท่าฤๅษีคัดตนประกอบด้วยรายละเอียด ได้แก่ วิถีทัศน์วิธีบริหารร่างกาย และข้อควรระวังในการบริหารร่างกาย
- ระบบแชทบอทเป็นแบบเมนู (Menu-based Chatbot) ที่ผู้ใช้งานเลือกโดยการพิมพ์ข้อความน้อยที่สุด

1.3.2 ขอบเขตกลุ่มเป้าหมาย (Target Users)

- ผู้เข้ารับบริการจากสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว
- ประชาชนทั่วไปที่สนใจเรียนรู้และปฏิบัติท่าฤๅษีคัดตน

1.3.3 ขอบเขตด้านเทคโนโลยี (Technical Scope)

- ระบบพัฒนาด้วยเทคโนโลยีที่รองรับการใช้งานบนอุปกรณ์สมาร์ทโฟนและคอมพิวเตอร์
- ระบบสามารถให้ข้อมูลและคำแนะนำเกี่ยวกับทำฤๅษีตัดตนได้ต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง

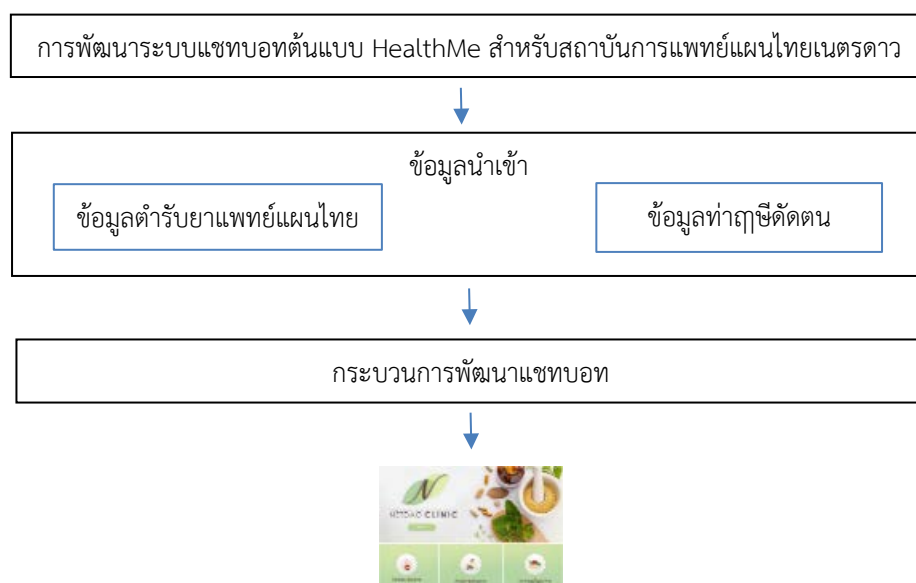
1.3.4 ขอบเขตด้านการประเมินผล (Evaluation Scope)

- ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในการเข้าถึงข้อมูลผ่านแชทบอทต้นแบบ HealthMe

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การพัฒนาแชทบอทแบบเมนู (Menu-based Chatbot) จะช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าถึงข้อมูลทำฤๅษีตัดตน 15 ท่าได้สะดวกและเข้าใจง่าย

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย



2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา (R&D) โดยมีกระบวนการดำเนินการดังนี้

2.1 ศึกษาข้อมูล

บทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทำฤๅษีตัดตน 15 ท่า (ภาพที่ 1 และตารางที่ 1) โดยงานวิจัยนี้อ้างอิงจากหนังสือชื่อ “ฤๅษีตัดตน ขยับกาย สบายชีวี ด้วยกายบริหารแบบไทย ฤๅษีตัดตนพื้นฐาน ๑๕ ท่า” [1] ร่วมกับการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญของสถาบันแพทย์แผนไทยเนตรดาว และศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้แชทบอทด้านสุขภาพ



ภาพที่ 1 ท่าฤๅษีคดต้น 15 ท่า [1]

ตารางที่ 1 ประโยชน์ของท่าฤๅษีคดต้น 15 ท่า

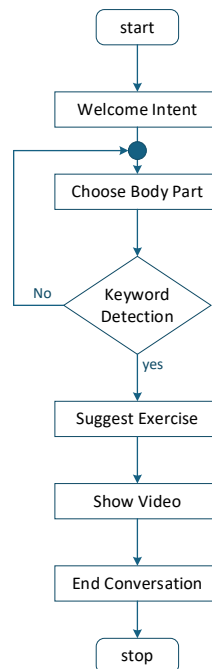
ท่าที่	ชื่อท่าฤๅษีคดต้น	ประโยชน์
1	นวครุฑบริเวณก้นและหน้าขา	ส่งผลดีไปเลี้ยงที่บริเวณหน้าขา รวมทั้งช่วยบำรุงสายตา
2	แก้ลมข้อมือ และแก้ลมในลำไส้	บริหารข้อมือ ส่งผลดีและลมไปตามแขน เพื่อแก้โรคลมในข้อแขน และบริหารบริเวณฝ่าเท้า
3	แก้ปวดท้องและข้อเท้า และแก้ลมปวดศีรษะ	ช่วยการเคลื่อนไหวของข้อเท้า เป็นการบริหารไหล่ คอ ออก ท้อง และกระตุ้นการไหลเวียนของโลหิตที่ศีรษะและแขน
4	แก้ลมเจ็บศีรษะและตามัว และแก้เกียจ	ช่วยให้เลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย และช่วยแก้การปวดศีรษะได้
5	แก้แขนขัด และแก้ข้อขัด	บริหารบริเวณหัวไหล่ ช่วยลดอาการแขนขัด
6	แก้กร่อน และแก้ข้อขัด	บริหารบริเวณเข่า หลัง เอว ช่วยลดอาการเสื่อมของอวัยวะที่เรื้อรัง
7	แก้กล้ามเนื้อตึง และแก้เส้นประสาทระงับ	บริหารส่วนอก และขา ช่วยรักษาอาการขัดเจ็บของกล้ามเนื้อบริเวณต่าง ๆ อันเนื่องมาจากความเสื่อมจากการใช้งานผิดปกติ ของกล้ามเนื้อและเส้นเลือดภายใน
8	แก้ลมในแขน	บริหารส่วนแขน ข้อมือ และนิ้วมือ
9	ดำรงกายอายุยืน	บริหารส่วนขา มีการยืดร่างกายตามแนวดิ่ง
10	แก้ไหล่ ขา และแก้เข่า	บริหารส่วนเอว ออก ขา (เป็นการบริหารแบบเกลียวบิด)
11	แก้โรคในอก	เป็นการขยายปอด บริหารส่วน อก ไหล่
12	แก้ตะคริวมือ ตะคริวเท้า	เป็นการทดสอบการทรงตัว บริหารส่วนขา
13	แก้ตะโพกสลับเพชร และแก้ไหล่ตะโพกขัด	บริหารไหล่ สะโพกและหลัง
14	แก้ลมเลือดนัยน์ตามัว และแก้ลมอันรัดทั้งตัว	บริหารส่วนคอ ขา และหน้าอก
15	แก้เมื่อยปลายมือปลายเท้า	บริหารส่วน เอว เข่า และคอ

2.2 ออกแบบและพัฒนาระบบ

2.2.1 ออกแบบโครงสร้างการสนทนาและฐานความรู้เกี่ยวกับท่าฤๅษีคดต้น แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) การออกแบบโครงสร้างการสนทนา (Conversation Flow Design) โดยเป็นเส้นทางการสนทนายระหว่างผู้ใช้งานกับระบบแชทบอท ประกอบด้วย ข้อความทักทาย (Welcome Intent) เลือกส่วนของร่างกาย (Choose Body Part) แนะนำท่า

ถึษีัดัดตนที่เหมะสม (Suggest Exercise) แสดงวิดีโอ (Show Video) และจบการสนทนา (End Conversation) โดยมีโครงสร้างดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างการสนทนา

2) การออกแบบฐานข้อความ (Message Template) คือ ข้อความที่แชทบอทตอบในแต่ละส่วนตามที่แยกไว้ในโครงสร้างการสนทนา และส่วนการแนะนำท่าถึษีัดัดตนที่เหมะสม ทางทีมผู้เชียวชาญของสถาบันการแพทยแผนไทยเนตรดาวระดมสมองกำหนดแยกหมวดหมู่การบริหารร่างกายออกเป็น 5 หมวด ดังรายละเอียดในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ฐานข้อความ

Intent Name	Description	User Input	Chatbot Response
Welcome Intent	ทักทายและเริ่มต้นการสนทนา	“สวัสดี”, “เริ่มใช้งาน”, “อยากออกกำลังกาย”	“สวัสดีครับ ยินดีต้อนรับสู่ HealthMe แชทบอทแนะนำท่าถึษีัดัดตน” “เลือกเมนูที่คุณต้องการได้เลยครับ”
Choose Body Part	ผู้ใช้เลือกส่วนของร่างกาย แบ่งออกเป็น 5 หมวด	ทำบริหารร่างกายส่วนต่าง ๆ	ศีรษะ ใบหน้า แขน ศอก ข้อมือ ข้อมือ กล้ามเนื้อหลัง เอว สะโพก ขา ข้อเท้า ข้อเท้า ปลายเท้า คอ บ่า ไหล่
Suggest Exercise	แนะนำท่าถึษีัดัดตน หมวดที่ 1	“ศีรษะ” “ใบหน้า”	“ขอแนะนำท่าที่เหมะสมครับ”, “ท่าที่ 2 :: แก้มข้อมือ และแก้มในลำสังค์”, “ท่าที่ 8 :: แก้มในแขน”, “ท่าที่ 12 :: แก้มครีมือ ตะครีเท้า”
	แนะนำท่าถึษีัดัดตน หมวดที่ 2	“แขน”, “ศอก”, “ข้อมือ”, “ข้อมือ”, “นิ้ว”, “มือ”	“ขอแนะนำท่าที่เหมะสมครับ”, “ท่าที่ 1 :: นวดบริเวณกล้ามเนื้อบริเวณใบหน้า”, “ท่าที่ 3 :: แก้มปวดท้องและข้อเท้า และแก้มปวดศีรษะ”, “ท่าที่ 4 :: แก้มเจ็บศีรษะและตามัว และแก้มเกียจ ”

	แนะนำท่าฤๅษีตัดตน หมวดที่ 3	“กลั่มเนื้อหลัง”, “เอว”, “สะโพก”	“ขอแนะนำท่าที่เหมาะสมครับ”, “ท่าที่ 13 :: แก้กตะโพกสลักเพชร และแก้ไหล่ตะโพกขัด”
	แนะนำท่าฤๅษีตัดตน หมวดที่ 4	“ขา”, “ข้อเข่า”, “ข้อ เท้า”, “ปลายเท้า”	“ขอแนะนำท่าที่เหมาะสมครับ”, “ท่าที่ 6 :: แก้กרון และแก้เข่าขัด”, “ท่าที่ 7 :: แก้กเลื่อนบิดคาง และแก้เส้นมหาสมุทรกระจับ”, “ท่าที่ 9 :: ดำรงกายอายุยืน”, “ท่าที่ 10 :: แก้ไหล่ ขา และแก้เข่า”, “ท่าที่ 12 :: แก้กตะคริวมือ ตะคริวเท้า”, “ท่าที่ 14 :: แก้กเลือดนัยน์ตามัว และแก้ลมอันรัดทั้งตัว”, “ท่าที่ 15 :: แก้เมื่อยปลายมือปลายเท้า”
	แนะนำท่าฤๅษีตัดตน หมวดที่ 5	“คอ”, “บ่า”, “ไหล่”,	“ขอแนะนำท่าที่เหมาะสมครับ”, “ท่าที่ 2 :: แก้กลมข้อมือ และแก้ลมในลำไส้”, “ท่าที่ 5 :: แก้กแขนขัด และแก้ขัดแขน”, “ท่าที่ 10 :: แก้ไหล่ ขา และแก้เข่า”, “ท่าที่ 11 :: แก้กโรคในอก”, “ท่าที่ 14 :: แก้กเลือดนัยน์ตามัว และแก้ลมอันรัดทั้งตัว”
Show Video	แสดงวิดีโอทัศน์หรือ ภาพประกอบ	-	[ลิงก์ YouTube]
End Conversation	ปิดการสนทนา	“ขอบคุณ”, “พอแล้ว”, “ไป ก่อน”	“ยินดีมากครับ หากต้องการเริ่มใหม่ เลือกเมนูอีกครั้ง”

2.2.2 พัฒนาระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe ด้วยโปรแกรม Dialogflow ร่วมกับ LINE Official Account (LINE OA)

ระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe ทำงานบนแพลตฟอร์ม Dialogflow ร่วมกับ LINE OA โดยใช้รูปแบบการตอบกลับแบบ Rule-based Chatbot ซึ่งอาศัยการตรวจจับคำสำคัญ (Keyword Detection) เพื่อเลือกข้อความตอบกลับที่ผู้วิจัยเตรียมไว้ในระบบ LINE OA เมื่อผู้ใช้พิมพ์ข้อความ ระบบจะตรวจสอบว่ามีคำที่ตรงกับหมวดอาการ เช่น “แขน” “หลัง” “ศีรษะ” “คอ” หรือไม่ หากพบระบบจะดึงข้อมูลจากฐานข้อความ (Message Template) ซึ่งประกอบด้วยคำอธิบายท่าฤๅษีตัดตน และลิงก์วิดีโอทัศน์สาธิตที่จัดเก็บบนระบบ YouTube จากนั้นส่งกลับไปยังผู้ใช้ หากไม่พบคำที่ตรงกัน ระบบจะแสดงคำแนะนำให้เลือกจากเมนูหรือพิมพ์คำใหม่ การทำงานดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลการบริหารร่างกายได้อย่างสะดวกรวดเร็ว แม้ระบบจะไม่มีกระบวนการประมวลผลภาษาขั้นสูง แต่มีความเรียบง่าย เหมาะสมกับการใช้ในบริบทของการสาธิตต้นแบบสำหรับผู้สูงอายุและผู้ใช้ทั่วไป ภาพที่ 3-7 แสดงตัวอย่างหน้าจอระบบ



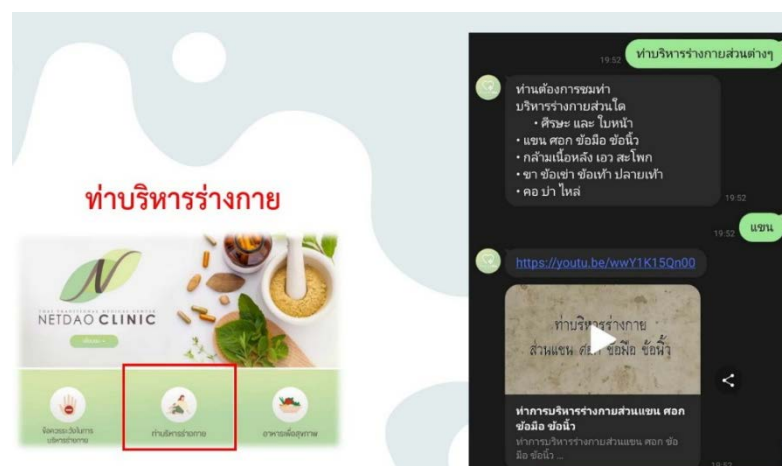
ภาพที่ 3 หน้าเมนูหลักของแชทบอทต้นแบบ HealthMe



ภาพที่ 4 หน้าจอหลักแสดงรายละเอียดสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว



ภาพที่ 5 หน้าจอแสดงข้อมูลข้อความระหว่างการบริหารร่างกาย



ภาพที่ 6 หน้าจอแสดงวิธีทำบริหารร่างกายส่วนแขน ศอก ข้อมือ นิ้วมือ



ภาพที่ 7 หน้าจอแสดงวิดีโอทำบริหารร่างกายส่วนศีรษะ และใบหน้า

2.3 ตรวจสอบคุณภาพเนื้อหา

การประเมินความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) ดำเนินการเพื่อรับรองว่าเนื้อหาเกี่ยวกับท่าฤๅษีติดตั้นทั้ง 15 ท่า รวมทั้งสื่อวิดีโอประกอบและข้อมูลรายละเอียดที่ใช้ในการแนะนำท่าบริหาร มีความถูกต้องตามหลักวิชาการและเหมาะสมสำหรับการเผยแพร่ผ่านระบบแชทบอท โดยเนื้อหาดังกล่าวได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วน และความเหมาะสมจากผู้เชี่ยวชาญของสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว ซึ่งผู้เชี่ยวชาญได้ให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง และผู้วิจัยได้นำไปแก้ไขก่อนนำไปใช้ในการพัฒนาระบบจริง

2.4 ทดลองใช้กับกลุ่มเป้าหมาย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้คือ แบบสอบถาม โดยประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคล ได้แก่ สังกัดผู้ตอบแบบสอบถาม เพศ และช่วงอายุ ส่วนที่ 2 ความพึงพอใจและการใช้ประโยชน์ระบบ โดยมีคำถาม 5 ข้อ ได้แก่ แชทบอท HealthMe สามารถช่วยให้ผู้รับบริการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยงานได้สะดวกมากขึ้น แชทบอท HealthMe ใช้งานง่าย แชทบอท HealthMe สามารถให้บริการข้อมูลได้อย่างถูกต้อง แชทบอท HealthMe สามารถนำไปใช้ต่อยอดกับบริการของหน่วยงานด้านอื่น ๆ ได้ และความพึงพอใจในภาพรวมต่อแชทบอท HealthMe

ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ทดลองใช้งานระบบ และตอบแบบสอบถามความพึงพอใจและการใช้งาน ประกอบด้วยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญทางสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาวจำนวน 15 คน และผู้เข้ารับบริการ/ผู้สนใจทั่วไปจำนวน 15 คน

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความคิดเห็น แบบประเมินความพึงพอใจของระบบได้กำหนดเกณฑ์ตามวิธีของลิเคิร์ต (Likert's Scale) ของ Faye Anderson (2020) โดยให้คะแนนแต่ละหัวข้อตามความเหมาะสมซึ่งมีลำดับตามความหมายของคะแนน เกณฑ์ประกอบด้วยมาตราส่วนประเมินค่าเชิงคุณภาพ 5 ระดับ (Rating Scale) ดังนี้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 – 5.00 หมายความว่า ระดับมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.51 – 4.50 หมายความว่า ระดับมาก

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 – 3.50 หมายความว่า ระดับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 – 2.50 หมายความว่า ระดับน้อย

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 – 1.50 หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe พัฒนาเป็นไปตามขอบเขตของการวิจัยที่กำหนดไว้อย่างครบถ้วน โดยนำระบบไปทดสอบการใช้งานจริงกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน โดยประกอบด้วย กลุ่มบุคลากรทางสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาวจำนวน 15 คน และกลุ่มผู้เข้ารับบริการ/บุคคลทั่วไปจำนวน 15 คน จำแนกตามเพศ แบ่งเป็นเพศชาย 9 คน (ร้อยละ 30) และเพศหญิง 21 คน (ร้อยละ 70) หากจำแนกตามช่วงอายุ มีรายละเอียดดังนี้

อายุ 20-30 ปี	จำนวน 1 คน	คิดเป็นร้อยละ 3.3
อายุ 31-40 ปี	จำนวน 4 คน	คิดเป็นร้อยละ 13.3
อายุ 41-50 ปี	จำนวน 11 คน	คิดเป็นร้อยละ 36.7
อายุ 51-60 ปี	จำนวน 11 คน	คิดเป็นร้อยละ 36.7
อายุ 60 ปี ขึ้นไป	จำนวน 3 คน	คิดเป็นร้อยละ 10.0

โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยได้ดังนี้ตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลประเมินความพึงพอใจและการใช้ประโยชน์ของระบบ

รายการ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความคิดเห็น
1. แชทบอท HealthMe สามารถช่วยให้ผู้รับบริการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยงานได้สะดวกมากขึ้น	4.63	0.56	มากที่สุด
2. แชทบอท HealthMe ใช้งานง่าย	4.73	0.52	มากที่สุด
3. แชทบอท HealthMe สามารถให้บริการข้อมูลได้อย่างถูกต้อง	4.73	0.52	มากที่สุด
4. แชทบอท HealthMe สามารถนำไปใช้ต่อยอดกับบริการของหน่วยงานด้านอื่น ๆ ได้	4.83	0.46	มากที่สุด
5. ความพึงพอใจในภาพรวมต่อแชทบอท HealthMe	4.83	0.46	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่าผลประเมินความพึงพอใจและการใช้ระบบแชทบอท HealthMe มีระดับความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ = 4.83) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D. = 0.46) รายการที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ แชทบอท HealthMe สามารถนำไปใช้ต่อยอดกับบริการของหน่วยงานด้านอื่น ๆ สะท้อนถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการพัฒนาบริการสุขภาพอัจฉริยะ (Smart Health Services) ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของกระทรวงสาธารณสุขไทยด้าน Digital Health Transformation ที่มุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีเพื่อลดช่องว่างการเข้าถึงบริการสุขภาพในกลุ่มผู้สูงอายุและผู้ที่อยู่ห่างไกล [10] รองลงมาคือ การใช้งานง่าย และสามารถให้บริการข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าระบบมีการออกแบบให้สอดคล้องกับหลักการของ Human-Computer Interaction ที่เน้นความเป็นมิตรต่อผู้ใช้ (User-Friendly) ผ่านอินเทอร์เฟซที่เข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน และมีการใช้ข้อความสั้น กระชับ เหมาะสำหรับผู้สูงอายุหรือผู้ที่ไม่ถนัดด้านเทคโนโลยีซึ่งเป็นกลุ่มผู้ประเมินส่วนใหญ่ ทำให้ผู้ใช้รู้สึกว่าสามารถเข้าถึงข้อมูลสุขภาพได้ด้วยตนเองโดยไม่รู้สึกลำบาก รวมถึงการแนะนำท่าฤๅษีติดต้นที่ช่วยลดอาการปวดเมื่อยได้จริง ส่วนรายการคะแนนต่ำสุดในระดับมากที่สุดคือ แชทบอท HealthMe สามารถช่วยให้ผู้รับบริการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยงานได้สะดวกมากขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

ระบบแชทบอทต้นแบบ HealthMe นำเสนอข้อควรระวังในการบริหารร่างกาย พร้อมทั้งสาธิตการบริหารร่างกายด้วยท่าฤๅษี คัดตบ 15 ท่า ครอบคลุมการบริหารกล้ามเนื้อส่วน ศีรษะและใบหน้า แขนขาส่วนบน (แขน ข้อศอก ข้อมือ และนิ้วมือ) ลำตัว (หลัง เอว และสะโพก) แขนขาส่วนล่าง (ขา เข่า ข้อเท้า และนิ้วเท้า) และบริเวณคอ บ่า และไหล่ จากการทดสอบพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลที่แนะนำมีความถูกต้องและเพียงพอให้ผู้ใช้งานปฏิบัติตามท่าต่าง ๆ ได้ สามารถช่วยลดอาการปวดเมื่อยและฟื้นฟูสมรรถภาพร่างกายเบื้องต้น นอกจากนี้ ระบบพัฒนาขึ้นในรูปแบบของแชทบอทที่เข้าถึงข้อมูลโดยพิมพ์ข้อความน้อยที่สุด จึงเหมาะสำหรับผู้สูงอายุหรือผู้ที่ไม่ถนัดใช้เทคโนโลยี อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการเดินทางมาพบแพทย์ ผลการประเมินสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่อง Developing an Innovative Health Information Service System ซึ่งชี้ว่า การพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยี แชทบอทสามารถสร้างระบบบริการข้อมูลสุขภาพที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ โดยเน้นให้ประชาชนเข้าถึงข้อมูลสุขภาพได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ [7] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเรื่อง Effectiveness of chatbots on COVID vaccine confidence and acceptance in Thailand, Hong Kong, and Singapore พบว่า สำหรับประเทศไทย แชทบอทเป็นเครื่องมือที่ช่วยสื่อสารข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้กลุ่มตัวอย่างมีความเข้าใจและมั่นใจในประสิทธิภาพของวัคซีนมากกว่าผู้ที่ไม่ได้รับข้อมูลเพิ่มเติม อีกทั้งสามารถตอบข้อสงสัยเกี่ยวกับวัคซีนป้องกัน COVID-19 ได้ทันที [9]

สุดท้ายกลุ่มตัวอย่างยังแสดงความคิดเห็นว่า ระบบแชทบอท HealthMe เพิ่มคุณค่าใหม่โดยการผสมภูมิปัญญาไทยเข้ากับเทคโนโลยีดิจิทัล ส่งผลให้เกิดระบบส่งเสริมสุขภาพที่เหมาะสมกับผู้ใช้งานยุคปัจจุบัน และสามารถต่อยอดไปใช้กับบริการของหน่วยงานด้านอื่น ๆ ได้

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะจากผู้ใช้งานจริง

จากผลการทดสอบระบบ พบว่าผู้ที่มีข้อเสนอแนะให้เพิ่มเติมคำแนะนำและข้อควรระวังประกอบการปฏิบัติการบริหารทั้งในหน้าหลักและสื่อวีดิทัศน์ โดยเฉพาะการระบุด้านหรือข้อควรหลีกเลี่ยงสำหรับกลุ่มผู้ใช้ที่มีข้อจำกัดด้านสุขภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอให้พัฒนาระบบรองรับผู้ใช้ที่ไม่สะดวกในการพิมพ์ข้อความ เพื่อเพิ่มความครอบคลุมและการเข้าถึงระบบได้อย่างเท่าเทียม

5.2 ข้อเสนอแนะจากผู้วิจัย

ผู้วิจัยเห็นสมควรให้มีการดำเนินการวิจัยในอนาคตที่ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างที่มีความหลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะกลุ่มผู้สูงอายุและผู้ป่วยโรคเรื้อรัง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนความต้องการใช้งานอย่างรอบด้าน ทั้งนี้ควรพัฒนาฐานความรู้ที่มีความทันสมัยและอ้างอิงจากข้อมูลวิชาการด้านสุขภาพที่เชื่อถือได้อย่างต่อเนื่อง รวมถึงการปรับปรุงส่วนติดต่อผู้ใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะของผู้ใช้แต่ละกลุ่ม เช่น การเพิ่มระบบเสียง (Voice Interaction) เพื่ออำนวยความสะดวกกับกลุ่มผู้สูงอายุหรือผู้ที่มีความบกพร่องทางการมองเห็น ส่วนการพัฒนาระบบต่อยอด สามารถพัฒนาเป็นลักษณะของโปรแกรมประยุกต์บนอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile Application) มีฟังก์ชันการติดตามผลสุขภาพ โดยเชื่อมต่อเข้ากับฐานข้อมูลสุขภาพส่วนบุคคลแบบอัตโนมัติ

6. กิตติกรรมประกาศ

ทีมผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานปลัดกระทรวงอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่กรุณาให้ทุนครั้งนี้ อาจารย์เนตรดาว ยวงศรี ผู้อำนวยการสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว บุคลากรของสถาบันการแพทย์แผนไทยเนตรดาว รวมถึง

ผู้เข้ารับบริการทุกท่านที่ให้การสนับสนุน และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่ให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในการดำเนินงานครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข, ฤชิตัดตน ขยับกาย สบายชีวี ด้วยกายบริหารแบบไทย ฤชิตัดตนพื้นฐาน ๑๕ ท่า, พิมพ์ครั้งที่ 1 บริษัท โพสต์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2556.
- [2] B. Thanasilungkoon, S. Niempoog, K. Sriyakul, P. Tungsukruthai, C. Kamalashiran, and S. Kietinun, “The efficacy of Rue-Si Datton and yoga on reducing neck and shoulder pain in office workers,” *Int J Exerc Sci*, vol. 16, no. 7, pp. 1113–1130, 2023.
- [3] อธิพงศ์ พิมพ์ดี, ชนกานต์ ศรีสุขบรวง, ณัฐธิกา ยุทธาวรรกุล และปริญญ์ โพธิ์ชัย. “ผลของการออกกำลังกายฤชิตัดตนต่อความยืดหยุ่นของหลังส่วนล่างในนักศึกษาหญิงระดับมหาวิทยาลัย.” *วารสารวิทยาศาสตร์สุขภาพแห่งประเทศไทย*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 1, มกราคม–มีนาคม, หน้า 50–56, 2565.
- [4] อธิรุช กอโพธิ์ศรี และ ยงยุทธ วัชรกุลย์. “ผลของการบริหารกายแบบฤชิตัดตนต่อการลดอาการปวดเข้าในผู้สูงอายุ ตำบลหมู่น อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี.” *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยการจัดการและเทคโนโลยีอีสเทิร์น*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม–ธันวาคม, หน้า 299–308, 2562.
- [5] พงษ์พิพัฒน์ จงเพ็งกลาง, สันติสิทธิ์ เขียวเงิน และ ผดุงศิษฐ์ ชำนาญบริรักษ์, “ผลของโปรแกรมฤชิตัดตน ในผู้ป่วยกล้ามเนื้อหลังตึง เขตรับผิดชอบโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์,” *วารสารการพยาบาล การสาธารณสุข และการศึกษา*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มกราคม–เมษายน, หน้า 100–113, 2562.
- [6] สุภัค วงษ์วรสันต์, จริญญา หุ่นศรีสกุล, อัจฉรา วัฒนาภา และเดชา วรณพาล, “ผลของโปรแกรมแชทบอทสร้างเสริมสุขภาพช่องปากต่อความรู้ในการดูแลสุขภาพช่องปากของผู้สูงอายุ,” *วิทยาสารทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, มกราคม–เมษายน, หน้า 33–43, 2566.
- [7] A. Kunlerd, “Developing an innovative health information service system: The potential of chatbot technology,” *Science, Social Sciences and Technology Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 61–69, 2024.
- [8] ชนัญญา สร้อยทอง, นิสรา คำมณี และภัทรา ลออรรถพงษ์, “การพัฒนาแชทบอทช่วยลดความเครียด ในนิสิตนักศึกษาสาขาวิชามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์,” *วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา*, ปีที่ 33 ฉบับที่ 2, พฤษภาคม–สิงหาคม, หน้า 28–40, 2565.
- [9] K. Y. Lee, S. V. Dabak, V. H. Kong, M. Park, S. L. L. Kwok, M. Silzle, C. Rachatan, A. Cook, A. Passanante, E. Pertwee, Z. Wu, J. A. Elkin, H. J. Larson, E. H. Y. Lau, K. Leung, J. T. Wu, and L. Lin, “Effectiveness of chatbots on COVID vaccine confidence and acceptance in Thailand, Hong Kong, and Singapore,” *npj Digital Medicine*, vol. 6, no. 1, pp. 1–12, 2023.
- [10] ยุทธศาสตร์สุขภาพดิจิทัลกระทรวงสาธารณสุข (2564-2568), กระทรวงสาธารณสุข, 2564.

การเปรียบเทียบโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่รถยนต์ ด้วยมีเดียไปป์เฟรมเวิร์ก

Comparative Analysis of Machine Learning Models for Driver Drowsiness Detection Using the MediaPipe Framework

ภัทรภรณ์ ไชยยาว¹ พรรณเพ็ญ ถาวรประสิทธิ์¹ มุhamัด เต๊ะยอ² และชลธิศา รัตนชู^{3*}

¹สาขาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

²สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

³สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

¹Email: pattraporn.c@pnu.ac.th; ¹Email: phanpen.p@pnu.ac.th; ²Email: muhamad.t@pnu.ac.th; ³Email: chonthisa.w@pnu.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่รถยนต์ด้วยการประมวลผลภาพ และอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง โดยใช้ข้อมูลที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจากวิดีโอความละเอียด 1280×720 พิกเซล บันทึกที่ 30 เฟรมต่อวินาที ความยาว 4.55 นาที รวมทั้งสิ้นประมาณ 8,190 เฟรม ซึ่งผ่านการประมวลผลด้วยมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) เพื่อสกัดคุณลักษณะสำคัญของใบหน้า ได้แก่ ค่าอัตราส่วนการเปิดตาและตาปริบ (Eye Aspect Ratio: EAR) ค่าอัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) และการหมุนของศีรษะ (Head Aspect Rotation: HAR) โดยใช้มุมออยเลอร์ (Euler angles) ที่ได้จากกระบวนการประมาณท่าศีรษะ (Head Pose Estimation) สำหรับจำแนกพฤติกรรมหลับตา ตาปริบ การทวน และศีรษะตก จากนั้นนำคุณลักษณะเข้าสู่ขั้นตอนการจำแนกด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees ผลการทดลองพบว่า ตัวชี้วัดทั้งสามสามารถตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Decision Tree ให้ความแม่นยำ 89.32% Random Forest 91.28% และ Gradient Boosted Trees สูงสุดที่ 92.96% แสดงให้เห็นว่า Gradient Boosted Trees เหมาะสมที่สุดสำหรับงานจำแนกพฤติกรรมผู้ขับขี่ ข้อค้นพบนี้สะท้อนศักยภาพของระบบในการพัฒนาเป็นต้นแบบระบบเตือนง่วงนอนของผู้ขับขี่ในอนาคต

คำสำคัญ : มีเดียไปป์ เฟซเมช, การตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่, การเรียนรู้ของเครื่อง

Abstract

This study seeks to develop a driver drowsiness detection system using image processing and machine learning algorithms. A self-constructed dataset was collected from a 1280×720-pixel video recorded at 30 frames per second with a duration of approximately 4.55 minutes, resulting in about 8,190 frames. These frames were processed using MediaPipe Face Mesh to extract key facial features, including the Eye Aspect Ratio (EAR) for detecting eye closure and drowsiness, the Mouth Aspect Ratio (MAR) for identifying yawning, and the Head Aspect Rotation (HAR) based on Euler angles derived from Head Pose Estimation (HPE) for detecting head-nodding behavior. The extracted features were classified using Decision Tree, Random Forest, and Gradient Boosted Trees models. Experimental results show that all indicators effectively detected drowsy behaviors. The Decision Tree achieved an accuracy of 89.32%, Random Forest 91.28%, and Gradient Boosted Trees the highest at 92.96%, confirming that Gradient Boosted Trees is the most suitable model for classifying driver behaviors. These findings highlight the potential of the proposed system to be further developed into a prototype driver drowsiness warning system.

Keyword: MediaPipe Face Mesh, Driver Drowsiness Detection, Machine Learning

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อุบัติเหตุทางถนนในประเทศไทยยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชน โดยรายงานอุบัติเหตุจราจรบนทางหลวงแผ่นดินปี 2566 ระบุว่ามียุติเหตุเกิดขึ้นกว่า 80,000 ครั้ง ส่งผลให้มีผู้เสียชีวิตกว่า 5,600 คน และบาดเจ็บกว่า 40,000 คน ทั้งนี้ สาเหตุของอุบัติเหตุร้อยละ 92 มาจากพฤติกรรมของผู้ขับขี่ โดยเฉพาะการขับรถในลักษณะเสี่ยง เช่น การตัดหน้าระยะกระชั้นชิด และการหลับใน ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การสูญเสียในแต่ละปี [1] ปัญหาการหลับใน จึงนับเป็นภัยเงียบที่แม้จะไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน แต่กลับเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงบ่อยครั้งในประเทศไทย

ที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับภาวะง่วงนอนของผู้ขับขี่รถยนต์ โดยส่วนใหญ่เน้นการใช้ลักษณะทางสายตา หรือการอำปากเป็นตัวชี้วัดหลัก เช่น ค่าอัตราส่วนการเปิดตาสำหรับการตรวจจับการหลับตาหรือตาปรือ [2, 4] ค่าอัตราส่วนการอำปาก สำหรับการตรวจจับการหาว [5] แม้ว่าวิธีเหล่านี้สามารถตรวจจับพฤติกรรมบางลักษณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ก็ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากยังไม่ครอบคลุมสัญญาณง่วงทั้งหมด โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงท่าทางของศีรษะ ซึ่งถือเป็นอีกหนึ่งตัวบ่งชี้สำคัญของพฤติกรรมง่วงนอน [3] นอกจากนี้ แม้งานวิจัยบางส่วนจะประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) หรือการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เพื่อสร้างระบบตรวจจับอาการง่วงแบบเรียลไทม์ แต่หลายงานมักพึ่งพาการวิเคราะห์ลักษณะเดียว เช่น EAR หรือ MAR เพียงพฤติกรรมเดียว ทำให้ไม่ครอบคลุมสัญญาณที่เกิดขึ้นร่วมกันหลายลักษณะในสถานการณ์จริง [5-7]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่ โดยประยุกต์ใช้มีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) เพื่อสกัดคุณลักษณะสำคัญของใบหน้า ได้แก่ ค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมการหลับตา และตาปรือ ค่าอัตราส่วนการอำปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) สำหรับตรวจจับการหาว และการหมุนของศีรษะ (Head Aspect Rotation: HAR) โดยใช้มุมออยเลอร์ (Euler angles) ก้มและเงย (Pitch), หัน (Yaw), เอียง (Roll) ที่ได้จากการประมาณท่าศีรษะ (Head Pose Estimation) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมศีรษะตก ซึ่งการเลือกใช้มีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) แทนวิธีดั้งเดิม เช่น dlib หรือ OpenCV เกิดจากเหตุผลด้านประสิทธิภาพ และความละเอียดของจุดใบหน้า โดยมีมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) สามารถตรวจจับจุดใบหน้าได้ละเอียดถึง 468 แลนมาร์ก ในขณะที่ dlib ตรวจจับได้เพียง 68 แลนมาร์ก ส่งผลให้มีมีเดียไปป์ (MediaPipe) ให้ข้อมูลเชิงโครงสร้างใบหน้าที่ละเอียดกว่า และมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ตำแหน่งดวงตา ปาก และทิศทางศีรษะมากกว่า [11, 12] นอกจากนี้มีมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) ใช้โมเดลประมวลผลที่มีความเบา (lightweight) ทำงานได้แบบเรียลไทม์บนหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) โดยไม่ต้องพึ่งพาหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ซึ่งเหมาะกับการประยุกต์บนบอร์ดประมวลผลหรือระบบฝังตัวภายในรถยนต์ ในขณะที่อัลกอริทึมของ OpenCV Haar Cascade หรือโมเดลประมวลผลเชิงลึก OpenCV-DNN (Deep Neural Network) แม้จะทำงานได้รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดด้านความแม่นยำ ก่อนนำข้อมูลที่สกัดได้เข้าสู่กระบวนการจำแนกด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees พร้อมประเมินผลด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน เช่น Accuracy, Precision, Recall และ F1-score เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาเป็นระบบต้นแบบสำหรับการเตือนพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่รถยนต์ในขนาดคอมพิวเตอร์ประมวลผลที่ติดตั้งในรถยนต์ได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาระบบตรวจจับภาวะง่วงนอนของผู้ขับขี่ โดยประยุกต์ใช้มีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) เพื่อคำนวณตัวชี้วัดเชิงภาพ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมหลับตา และตาปรือ ค่าอัตราส่วนการอำปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) สำหรับตรวจจับการหาว และมุมออยเลอร์ของท่าศีรษะ ก้ม และเงย (Pitch) หัน (Yaw) เอียง (Roll) ที่ได้จากการประมาณท่าศีรษะ (Head Pose Estimation: HPE) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมศีรษะตก (Head Droop)

1.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ได้แก่ Decision Tree (DT), Random Forest (RF) และ Gradient Boosted Trees (GBT) โดยประเมินด้วย Accuracy, Precision, Recall, F1-score และ Confusion Matrix ภายใต้การตรวจสอบไขว้แบบ k-fold cross-validation เพื่อคัดเลือกโมเดลที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 มุ่งเน้นพฤติกรรม 4 พฤติกรรมที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการง่วง ได้แก่ หลับตา (Sleeping), ตาปรือ (Drowsy), การหา (Yawning) และศีรษะตก (Head Nodding)

1.3.2 ดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่มีแสงเพียงพอ ใบหน้าไม่ถูกบดบังรุนแรง เช่น ไม่มีแว่นกันแดด หรือหน้ากาก

1.3.3 เปรียบเทียบ Decision Tree Model, Random Forest Model, Gradient Boosted Trees Model ภายใต้การเตรียมข้อมูลเดียวกัน

1.4 สมมติฐานการวิจัย

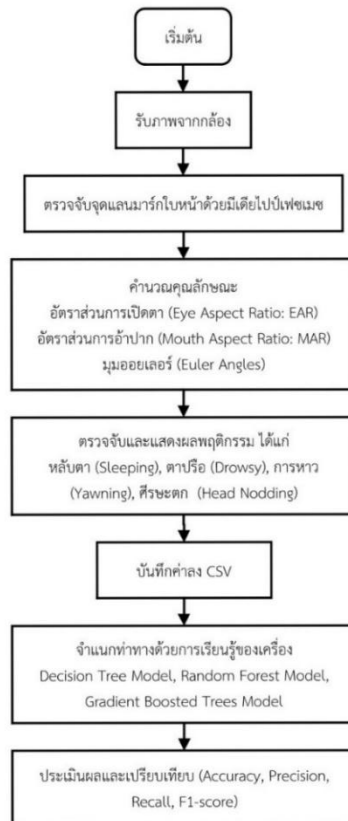
1.4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วย Confusion Matrix และ k-fold cross validation จะสามารถบ่งชี้ได้ว่าโมเดลใดมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่ในสภาวะแวดล้อมที่มีข้อจำกัด เช่น แสงเพียงพอ และใบหน้าที่ไม่ถูกบดบัง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ออกแบบกระบวนการทำงานของระบบเพื่อตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่ โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานตั้งแต่การรับภาพจากกล้อง HP True Vision 720p HD camera ขนาด 1280x720 ประมวลผลด้วยตัวประมวลผล AMD Ryzen 5 3550H with Radeon Vega Mobile Gfx 2.10 GHz RAM 24.0 GB ความเร็ว 2667 MHz ประเภทของระบบระบบปฏิบัติการแบบ 64 บิต สถานที่ทำการทดสอบ ณ ห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยการตรวจจับจุดแลนมาร์กบนใบหน้าที่มีเดียไปป์ เฟซเมช และการคำนวณคุณลักษณะสำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) และมุมออยเลอร์ (Euler Angles) ในการตรวจจับและแสดงผลพฤติกรรม ตลอดจนการบันทึกข้อมูลลง CSV และการจำแนกทำทางด้วยโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง ดังภาพที่ 1

จากกระบวนการดังกล่าว สามารถสรุปขั้นตอนการทำงานของระบบได้เป็น 6 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. การรับภาพจากกล้อง โดยใช้กล้อง HP True Vision 720p HD ความละเอียด 1280x720 เพื่อให้ได้ภาพใบหน้าที่ชัดเจนและเหมาะสมต่อการตรวจจับจุดสำคัญบนใบหน้า
2. การตรวจจับจุดแลนมาร์กด้วยมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) ซึ่งสามารถระบุจุดบนใบหน้าได้จำนวน 468 แลนมาร์ก เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ตำแหน่งดวงตา ปาก และทิศทางการศีรษะ
3. การคำนวณคุณลักษณะ EAR, MAR และ Euler Angles ตามสมการ (1)–(4) เพื่อระบุลักษณะหลับตา ตาปรือ การหา และศีรษะตก
4. การตัดสินใจพฤติกรรมตามเกณฑ์ Threshold ได้แก่ ปกติ (Normal), หลับตา (Sleeping), ตาปรือ (Drowsy), การหา (Yawning) และศีรษะตก (Head Nodding) โดยระบบจะพิจารณาจากค่าที่คำนวณได้ในแต่ละเฟรม
5. การบันทึกข้อมูลลงไฟล์ CSV ซึ่งประกอบด้วยค่า EAR, MAR, Pitch, Yaw, Roll เวลาที่บันทึก และป้ายกำกับ (label) ของพฤติกรรม
6. การจำแนกพฤติกรรมด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) โดยใช้โมเดล Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวจำแนก



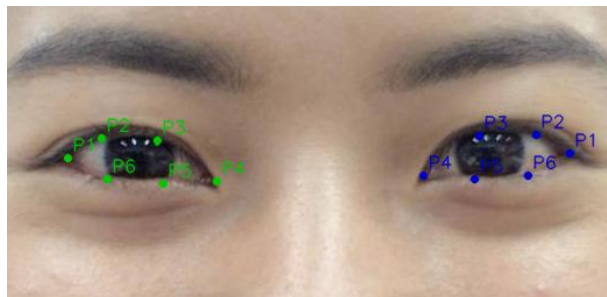
ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานของระบบ

2.1 การคำนวณคุณลักษณะสำคัญบนใบหน้า

ในการคำนวณคุณลักษณะ (Feature Extraction) ได้เลือกใช้ตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่ ได้แก่ อัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมการหลับตา หรือตาปรือ ดังสมการที่ (1) อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมการหาว ดังสมการที่ (2) และมุมออยเลอร์ (Euler Angles) ซึ่งได้จากกระบวนการ Head Pose Estimation เพื่อสำหรับตรวจจับพฤติกรรมการก้ม เงย หรือเอียงศีรษะ ดังสมการที่ (3-4)

1. อัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR)

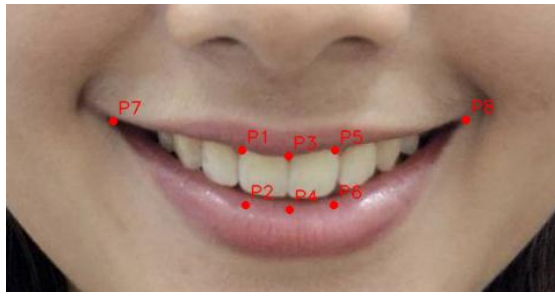
$$EAR = \frac{\|P_2 - P_6\| + \|P_3 - P_5\|}{2\|P_1 - P_4\|} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 อัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR)

2. อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR)

$$MAR = \frac{\|P_2 - P_8\| + \|P_3 - P_7\| + \|P_4 - P_6\|}{2\|P_1 - P_5\|} \quad (2)$$



ภาพที่ 3 อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR)

3. มุมออยเลอร์ (Euler Angles)

ใช้วิธีการแก้สมการ Perspective-n-Point (PnP) โดยเริ่มจากการแมปพิกัด 3D ของจุดโมเดลใบหน้าเข้ากับจุด Landmark 2D ดังสมการที่ 3

$$S \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อได้เมทริกซ์การหมุน R แล้ว ทำการถอดมุมออยเลอร์ ดังสมการที่ 4

$$\text{Pitch} = \arctan \left(-\frac{R_{31}}{\sqrt{R_{11}^2 - R_{21}^2}} \right) \quad (4)$$

2.3 เกณฑ์การตรวจจับพฤติกรรมการง่วง

ในการตรวจจับพฤติกรรมง่วงของผู้ขับขี่ งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์ (threshold) และจำนวนเฟรมขั้นต่ำที่ต้องเกิดขึ้นต่อเนื่องของแต่ละคุณลักษณะสำคัญบนใบหน้า ได้แก่ อัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมการหลับตา และตาปรือ อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) สำหรับตรวจจับพฤติกรรมการหาว และมุมออยเลอร์ (Euler Angles) ซึ่งได้จากการกระบวนการ Head Pose Estimation เพื่อสำหรับตรวจจับพฤติกรรมการก้ม เงย หรือเอียงศีรษะ โดยเกณฑ์เหล่านี้ได้มาจากการอ้างอิงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องร่วมกับการปรับค่าทดลองเบื้องต้น เพื่อช่วยลดความผิดพลาดจากการกระปรี้บตาตามธรรมชาติ หรือการเคลื่อนไหวศีรษะทั่วไป ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตรวจจับพฤติกรรมการง่วง

พฤติกรรม	เกณฑ์ (Threshold)	เงื่อนไขเฟรมขั้นต่ำ
หลับตา (Sleeping)	EAR < 0.10	≥ 60 เฟรม ประมาณ 2.0 วินาที 30fps
ตาปรือ (Drowsy)	0.10 ≤ EAR ≤ 0.23 และ MAR < 0.60	≥ 45 เฟรม ประมาณ 1.5 วินาที
การหาว (Yawning)	MAR ≥ 0.60	≥ 30 เฟรม ประมาณ 1.0 วินาที
ศีรษะตก (Head Nodding)	ΔPitch ≥ 12°	≥ 45 เฟรม ประมาณ 1.5 วินาที

หมายเหตุ: เกณฑ์ Threshold ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานด้านการตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอน โดยค่า EAR สำหรับพฤติกรรมหลับตาอ้างอิงจาก Albadawi et al. (2023) ซึ่งรายงานค่า EAR ประมาณ ≤ 0.20 สามารถแยกภาวะตาปิด และตาเปิดได้อย่าง

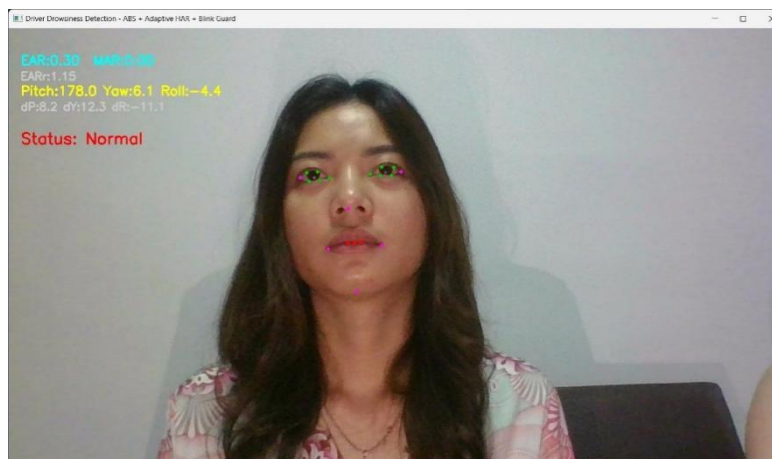
มีประสิทธิภาพ [6] ในงานนี้ผู้วิจัยจึงกำหนดเกณฑ์พฤติกรรมหลับตา (Sleeping) ที่ $EAR < 0.10$ ซึ่งเป็นค่า Threshold ที่เข้มงวดกว่า เพื่อรองรับความไวของระบบมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh) ส่วนช่วง EAR ระหว่าง 0.10–0.23 กำหนดให้เป็นพฤติกรรมตาปรือ (Drowsy) เพื่อเพิ่มความละเอียดในการจำแนกระดับความง่วงตามแนวโน้มค่า EAR ต่ำในงานก่อนหน้า และผลจากการทดลองเบื้องต้น (pilot study)

สำหรับพฤติกรรมการหาว (Yawning) ใช้เกณฑ์ $MAR \geq 0.60$ โดยอ้างอิงแนวคิดจาก Wei, Chi, และ Chen (2023) ซึ่งกำหนดค่า $MAR = 0.60$ เป็นขอบเขตของการอ้าปากหรือการหาวในสภาวะเหนื่อยล้า [14] ทั้งนี้ ค่า MAR ดังกล่าวได้รับการปรับเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับข้อมูล Landmark ที่ได้จากมีเดียไปป์ เฟซเมช (MediaPipe Face Mesh)

ในส่วนของการตรวจจับศีรษะตก (Head Nodding) งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่ามุม Pitch ประมาณ $\pm 20^\circ$ เป็นขอบเขตที่ศีรษะเบี่ยงเบนจากท่าปกติอย่างมีนัยสำคัญ [14] ดังนั้นในงานนี้ผู้วิจัยจึงกำหนดเกณฑ์ $\Delta Pitch \geq 12^\circ$ จากผลการทดลองเบื้องต้น (pilot study) เพื่อให้สามารถตรวจจับอาการศีรษะตกในระยะเริ่มต้นได้ก่อนที่มุม Pitch จะเพิ่มขึ้นถึงระดับ 20° ตามที่ปรากฏในวรรณกรรม ทั้งนี้ ค่าทุกส่วนได้รับการปรับแต่งร่วมกับผลการทดลองเบื้องต้นกับผู้ทดลอง 1 คน รวมจำนวน 8,190 เฟรม เพื่อให้สอดคล้องกับสรีรศาสตร์ของผู้ทดลอง และสภาพแสงจริงในห้องทดลอง

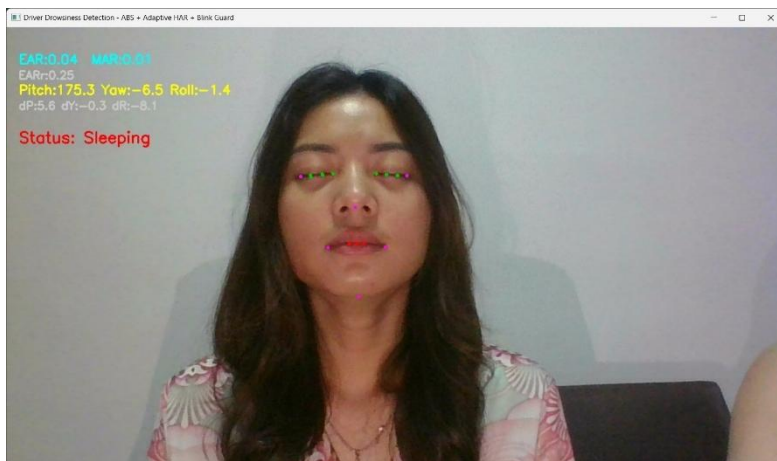
2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ได้ทำการประเมินระบบตรวจจับพฤติกรรมของผู้เข้าร่วมการทดลองเพียงคนเดียว เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อม และปัจจัยรบกวนให้น้อยที่สุด โดยการทดลองจัดขึ้นในห้องที่มีแสงสว่างคงที่ อุณหภูมิ และเสียงรบกวนถูกควบคุมให้เหมาะสม โดยกล้องถูกติดตั้งในตำแหน่งด้านหน้าของผู้ทดลองเพื่อจับภาพใบหน้าโดยตรง และโปรแกรมได้ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยซอฟต์แวร์ในการตรวจจับการปิดตา และตาปรือ (Eye Aspect Ratio: EAR) การหาว (Mouth Aspect Ratio: MAR) และการเคลื่อนไหวของศีรษะ (Pitch, Yaw, Roll) ผลลัพธ์จะแสดงผ่านหน้าจอพร้อมสถานะที่ระบบวิเคราะห์ได้ เช่น พฤติกรรมปกติ (Normal) ดังภาพที่ (4), หลับตา (Sleeping) ดังภาพที่ (5), ตาปรือ (Drowsy) ดังภาพที่ (6), การหาว (Yawning) ดังภาพที่ (7) ศีรษะตก (Head Nodding) ดังภาพที่ (8), และ Smile Guard ดังภาพที่ (9)



ภาพที่ 4 ผลการตรวจจับเมื่อผู้ทดสอบลืมตา และปิดปากในระดับปกติ (Normal)

จากภาพที่ 4 แสดงถึงค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) ของผู้ทดสอบ ซึ่งอยู่สูงกว่า 0.23 และค่าอัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์หาว 0.60 ระบบตรวจจับพฤติกรรมได้ว่าเป็นสถานะปกติ (Normal)



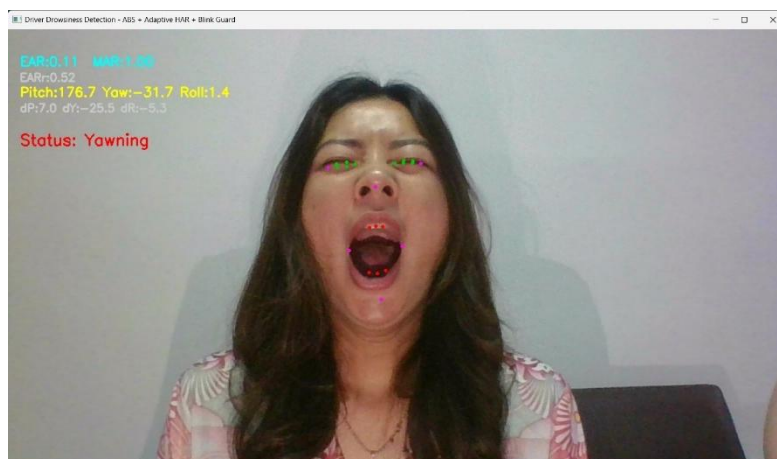
ภาพที่ 5 ผลการตรวจจับเมื่อผู้ทดสอบปิดตาติดต่อกัน หรือเรียกว่าการหลับตา

จากภาพที่ 5 แสดงถึงค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) ลดต่ำกว่า 0.10 และคงอยู่ต่อเนื่องมากกว่า 60 เฟรม ประมาณ 2 วินาที ระบบตรวจจับได้ว่าเป็นพฤติกรรมหลับตา (Sleeping) ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของผู้ทดสอบที่หลับตาเป็นเวลานาน



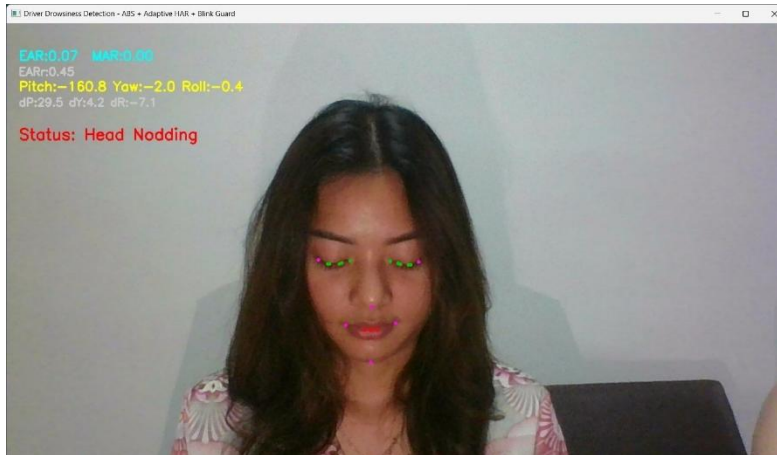
ภาพที่ 6 ผลการตรวจจับเมื่อผู้ทดสอบลืมตาเพียงครั้งหนึ่ง หรือเรียกว่าตาปรือ

จากภาพที่ 6 แสดงถึงค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) อยู่ในช่วง 0.10–0.23 ติดต่อกันเกิน 45 เฟรม ประมาณ 1.5 วินาที ระบบตรวจจับพฤติกรรมได้ว่าเป็นสถานะ Drowsy ซึ่งแสดงถึงความสามารถของอัลกอริทึมในการแยกแยะระดับความง่วงได้



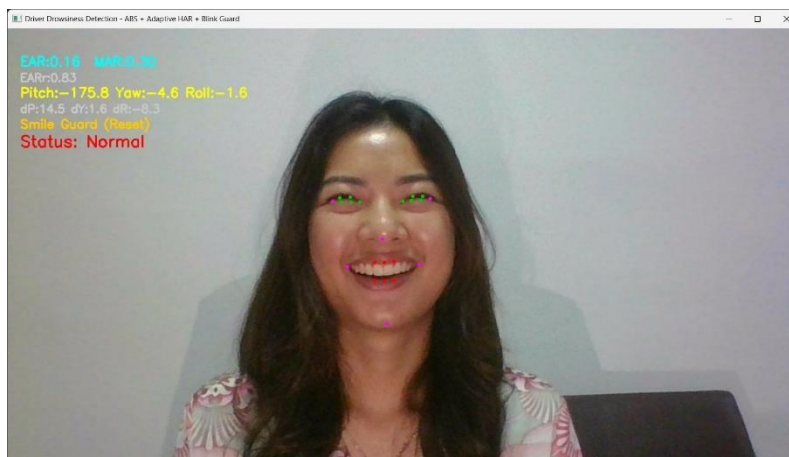
ภาพที่ 7 ผลการตรวจจับเมื่อผู้ทดสอบอ้าปากกว้าง หรือเรียกว่าการหาว

จากภาพที่ 7 แสดงถึงค่าอัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) เมื่อสูงกว่า 0.60 และคงอยู่เกิน 30 เฟรม ประมาณ 1 วินาที ระบบตรวจจับพฤติกรรมได้ว่าเป็นสถานะการหาว (Yawning) ได้อย่างถูกต้อง ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่บ่งบอกถึงการหาว



ภาพที่ 8 ผลการตรวจจับเมื่อศีรษะของผู้ทดสอบศีรษะตก

จากภาพที่ 8 แสดงถึงเมื่อตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของมุม Pitch มากกว่า 12° ขณะที่ค่า Yaw และ Roll อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์กันชน (35° และ 25° ตามลำดับ) ระบบตรวจจับพฤติกรรมได้ว่าเป็นสถานะศีรษะตก (Head Nodding) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของพฤติกรรม การง่วงนอน



ภาพที่ 9 ผลการตรวจจับเมื่อผู้ทดสอบมีการยิ้ม

จากภาพที่ 9 แสดงถึงการยิ้มของผู้ทดสอบ แม้ว่าจะส่งผลให้ค่า MAR เพิ่มขึ้น แต่ระบบมีเงื่อนไข Smile Guard ใช้รีเซ็ตสถานะ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตีความ จึงยังคงแสดงผลว่าเป็น Normal

2.5 การจำแนกท่าทางด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

ในการเก็บข้อมูล ผู้วิจัยได้บันทึกวิดีโอความละเอียด 1280×720 พิกเซล ที่อัตรา 30 เฟรมต่อวินาที ความยาว 4.55 นาที รวมจำนวนข้อมูลทั้งหมด 8,190 เฟรม โดยเฟรมที่ตรวจจับใบหน้าได้สมบูรณ์ถูกนำเข้าสู่กระบวนการคำนวณ EAR, MAR และ Euler angles เพื่อให้ระบบทำการจัดประเภทเฟรม (labeling) โดยอัตโนมัติตามเกณฑ์ Threshold ที่กำหนดในตารางที่ 1 แทนการกำหนดจำนวนเฟรมรายคลาสล่วงหน้า การจัดประเภทเฟรมด้วยวิธีดังกล่าวทำให้จำนวนเฟรมของแต่ละคลาสขึ้นอยู่กับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในวิดีโอ และเป็นผลลัพธ์จากค่าคุณลักษณะ EAR, MAR และ Euler angles ที่คำนวณได้ในแต่ละเฟรม ซึ่งชุดข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งเป็นข้อมูลฝึกสอน (Training set) และทดสอบ (Test set) ในอัตราส่วน 90:10 เพื่อใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้โมเดล 3 ประเภท ได้แก่ Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. Decision Tree Model

โมเดล Decision Tree (DT) เป็นอัลกอริทึมเชิงกฎ (rule-based) ที่สร้างโครงสร้างต้นไม้เพื่อใช้ในการตัดสินใจ โดยทำการแบ่งชุดข้อมูลตามคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์มากที่สุดในแต่ละโหนด ข้อดี คือความเข้าใจง่าย และสามารถตีความได้โดยตรง แต่มีข้อจำกัดด้านความแม่นยำเมื่อข้อมูลมีความซับซ้อนสูง [8]

2. Random Forest Model

โมเดล Random Forest (RF) เป็นการผสมผสานต้นไม้ตัดสินใจหลายต้น (ensemble learning) โดยใช้หลักการ bagging และการเลือกคุณลักษณะแบบสุ่ม ทำให้โมเดลมีความแม่นยำสูงและลดปัญหาการ overfitting เมื่อเทียบกับการใช้ต้นไม้เพียงต้นเดียว งานวิจัยหลายชิ้นยืนยันว่า Random Forest เหมาะกับการจำแนกข้อมูลเชิงพฤติกรรม และข้อมูลเชิงภาพ [9]

3. Gradient Boosted Trees Model

โมเดล Gradient Boosted Trees (GBT) เป็นอัลกอริทึมแบบ ensemble learning ที่อยู่ในกลุ่ม boosting โดยแนวคิดหลักคือการสร้างต้นไม้ตัดสินใจ (decision trees) ขนาดเล็กหลายต้นอย่างต่อเนื่อง (sequential) ซึ่งแต่ละต้นจะถูกฝึกเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดจากต้นก่อนหน้า ทำให้โมเดลค่อย ๆ ลดค่าความผิดพลาดสะสม (residual error) ลงเรื่อย ๆ โดยกลไกสำคัญของ GBT คือการใช้ gradient descent ในการหาค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันการสูญเสีย (loss function) เช่น mean squared error หรือ logistic loss แล้วสร้างต้นไม้ใหม่เพื่อประมาณทิศทางในการแก้ไขค่าความผิดพลาดในแต่ละรอบ (iteration) วิธีนี้ช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนของข้อมูลได้ดีกว่าการใช้ decision tree เพียงต้นเดียว [10]

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพโมเดล

ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบในการจำแนกพฤติกรรมง่วงนอน โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำแนกของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องจำนวน 3 โมเดล ได้แก่ Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees ซึ่งใช้ชุดข้อมูลเดียวกัน ผลลัพธ์ถูกวัดด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน ได้แก่ accuracy, precision และ recall ของแต่ละคลาส รวมทั้งค่าเฉลี่ยเชิงจุลภาค (micro average) เพื่อสะท้อนถึงความแม่นยำโดยรวมของโมเดล ผลลัพธ์การทดลองของแต่ละโมเดลแสดงดังตารางที่ 2-4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 Confusion Matrix Decision Tree Model (Accuracy: 89.32%)

	True Normal	True Drowsy	True Yawning	True Sleeping	True Head Nodding	Class precision
Pred. Normal	7660	210	10	37	63	95.99%
Pred. Drowsy	1176	2796	44	34	6	68.93%
Pred. Yawning	8	4	808	0	0	98.54%
Pred. Sleeping	10	0	0	1303	3	99.01%
Pred. Head Nodding	0	1	0	7	930	99.15%
Class recall	88.51%	92.86%	93.74%	94.34%	92.81%	

จากตารางที่ 2 แสดงถึง Confusion Matrix Decision Tree Model โดยให้ความแม่นยำรวมที่ 89.32% ซึ่งสามารถจำแนกคลาสการหาว (Yawning) และ หลับตา (Sleeping) ได้อย่างแม่นยำสูง เพราะ Precision เกิน 98% แต่มีข้อจำกัดสำคัญคือการจำแนกคลาสตาปรือ (Drowsy) ที่ได้ Precision เพียง 68.93% ทำให้ประสิทธิภาพรวมของโมเดลต่ำกว่าแบบอื่น

ตารางที่ 3 Confusion Matrix Random Forest Model (Accuracy: 91.28%)

	True Normal	True Drowsy	True Yawning	True Sleeping	True Head Nodding	Class precision
Pred. Normal	8035	283	51	43	61	94.83%
Pred. Drowsy	811	2723	5	34	8	76.04%
Pred. Yawning	6	5	806	0	0	98.65%
Pred. Sleeping	2	0	0	1297	2	99.69%
Pred. Head Nodding	0	0	0	7	931	99.25%
Class recall	90.75%	90.44%	93.50%	93.92%	92.91%	

จากตารางที่ 3 แสดงถึง Confusion Matrix Random Forest Model โดยให้ความแม่นยำเท่ากับ 91.28% ซึ่งมีผลการจำแนกพฤติกรรมหลับตา (Sleeping) และ ศีรษะตก (Head Nodding) ที่แม่นยำเกือบสมบูรณ์ เพราะ Precision เกิน 99% อย่างไรก็ตาม ยังคงพบข้อจำกัดในการจำแนกคลาส ตาปรือ (Drowsy) แม้จะดีขึ้นจาก Decision Tree Model แต่ยังมี Precision เพียง 76.04% แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีเสถียรภาพ และความแม่นยำที่ดีกว่าแต่ยังไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 4 Confusion Matrix Gradient Boosted Model (Accuracy: 92.96%)

	True Normal	True Drowsy	True Yawning	True Sleeping	True Head Nodding	Class precision
Pred. Normal	8163	234	5	45	31	96.28%
Pred. Drowsy	658	2768	3	27	4	80.00%
Pred. Yawning	15	7	852	0	0	97.48%
Pred. Sleeping	10	0	2	1298	2	98.93%
Pred. Head Nodding	8	2	0	11	965	97.87%
Class recall	92.20%	91.93%	98.84%	93.99%	96.31%	

จากตารางที่ 4 แสดงถึง Confusion Matrix Gradient Boosted Model โดยให้ความแม่นยำสูงสุดที่ 92.96% และมีความเสถียรสูงที่สุด เพราะมีค่าเบี่ยงเบนต่ำ ซึ่งมีความแม่นยำในการจำแนกเกือบทุกคลาสสูงกว่าโมเดลอื่น โดยเฉพาะพฤติกรรมการทาว (Yawning) และศีรษะตก (Head Nodding) ที่มี Precision และ Recall เกิน 97% แม้ว่าคลาสตาปรือ (Drowsy) จะยังต่ำกว่า เพราะ Precision 80% แต่ก็ยังดีกว่าโมเดลก่อนหน้านี้ และมีประสิทธิภาพดีที่สุด

อย่างไรก็ตาม จากผล Confusion Matrix ของทั้งสามโมเดลพบว่า คลาสตาปรือ (Drowsy) มีค่า Precision ต่ำกว่าคลาสอื่นอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะ Decision Tree Model ที่ให้ค่าเพียง 68.93% ความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากลักษณะของพฤติกรรมตาปรือ ซึ่งมีค่า EAR ซ้อนทับกับทั้งคลาสปกติ (Normal) และหลับตา (Sleeping) ทำให้ระบบจำแนกผิดได้ง่าย อีกทั้งพฤติกรรมตาปรือลักษณะเป็นช่วงเปลี่ยนผ่าน (transition) ที่เกิดเพียงสั้น ๆ ทำให้คุณลักษณะที่ได้มีความแปรผันสูง และมี noise มากกว่าคลาสอื่น ส่งผลให้โมเดลทุกประเภทมีความยากในการจำแนกพฤติกรรมนี้ได้แม่นยำ

ตารางที่ 5 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องจำนวน 3 โมเดล

	Decision Tree	Random Forest	Gradient Boosted
Accuracy (%)	89.32	91.28	92.96
Macro Precision (%)	92.72	93.29	94.11
Macro Recall (%)	92.05	92.30	94.25
Macro F1-score (%)	91.95	92.81	94.28

จากตารางที่ 5 แสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องทั้งสามประเภท พบว่าโมเดล Gradient Boosted ให้ผลการจำแนกที่ดีที่สุด โดยมีค่า Accuracy และค่า Macro F1-score สูงที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลสามารถจำแนกพฤติกรรมผู้ขับขี่ทุกรูปแบบได้อย่างแม่นยำ และสม่ำเสมอมากกว่าโมเดลอื่น จึงมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้จริงสำหรับระบบตรวจจับพฤติกรรมง่วงนอนของผู้ขับขี่

โดยสรุปผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโมเดล Gradient Boosted Trees มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการจำแนกพฤติกรรมที่สะท้อนถึงพฤติกรรมง่วงนอน โดยมีความแม่นยำสูงถึง 92.96% ซึ่งเหนือกว่า Decision Tree และ Random Forest ที่มีค่าความแม่นยำ 89.32% และ 91.28% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ยังพบข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การทดสอบที่ใช้ผู้เข้าร่วมจำนวนน้อย และสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ ซึ่งอาจไม่สะท้อนการทำงานจริงในสภาวะการขับขี่บนท้องถนนบนบอร์ดประมวลผลติดตั้งจริงบนรถยนต์

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบตรวจจับภาวะง่วงนอนของผู้ขับขี่รถยนต์ โดยใช้การประมวลผลภาพร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งผลการทดลองในห้องปฏิบัติการยืนยันว่าตัวชี้วัดเชิงภาพ ได้แก่ ค่าอัตราส่วนการเปิดตา (Eye Aspect Ratio: EAR) อัตราส่วนการอ้าปาก (Mouth Aspect Ratio: MAR) และมุมออยเลอร์ (Euler Angles) สามารถสะท้อนพฤติกรรมง่วงนอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการประเมินและเปรียบเทียบโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องทั้งสามประเภท ได้แก่ Decision Tree, Random Forest และ Gradient Boosted Trees พบว่าโมเดล Gradient Boosted Trees ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ด้วยค่าความแม่นยำสูงสุด 92.96% และค่า Macro F1-score สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของโมเดลในการจำแนกพฤติกรรมง่วงนอนแบบหลายลักษณะได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ 1. ใช้ผู้เข้าร่วมเพียงคนเดียว ทำให้ข้อมูลอาจไม่ครอบคลุมความหลากหลายของสรีรวิทยาและลักษณะใบหน้า 2. ทำการทดสอบในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมได้ เช่น ตำแหน่งกล้องคงที่ สภาพแสงคงที่ และไม่มีการกีดขวางบนใบหน้า ซึ่งอาจไม่สะท้อนสภาพจริงของการขับขี่บนท้องถนน 3. ไม่ได้ทดสอบในสภาพแสงที่หลากหลาย เช่น แสงกลางวัน กลางคืน แสงย้อน หรือแสงรบกวน ทำให้ประสิทธิภาพอาจลดลงเมื่อใช้จริง ดังนั้น แม้มีข้อจำกัดดังกล่าว ผลการทดลองชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบต้นแบบเพื่อนำไปใช้งานจริงบนบอร์ดประมวลผลภายในรถยนต์ แต่ยังจำเป็นต้องทดสอบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความมั่นใจในความทนทาน และความแม่นยำในสถานการณ์จริงก่อนการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์

5. ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งต่อไป ควรเพิ่มจำนวนและความหลากหลายของข้อมูล (Dataset) ให้ครอบคลุมปัจจัยที่แตกต่างกันมากขึ้น ทั้งในด้านเพศ อายุ ลักษณะทางกายภาพของผู้ขับขี่ รวมถึงสภาวะแวดล้อมในการขับขี่ที่หลากหลาย เช่น สภาพแสงกลางวัน-กลางคืน มุมกล้องที่ต่างกัน และการมีสิ่งกีดขวางบนใบหน้า เช่น การสวมแว่นตาหรือหน้ากากอนามัย เพื่อให้โมเดลมีความทนทาน และสามารถรองรับสถานการณ์จริงได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ควรพัฒนาระบบให้สามารถทำงานแบบเรียลไทม์บนอุปกรณ์ประมวลผลแบบฝังตัว (embedded system) เช่น บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หรือคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพต่ำที่ติดตั้งภายในรถยนต์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบภายใต้ข้อจำกัดด้านทรัพยากรจริง และเพิ่มความมั่นใจในการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะอันมีคุณค่า จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทางหลวง. (2566). รายงานอุบัติเหตุจากรบนทางหลวงแผ่นดิน ปี 2566. สำนักอำนวยความปลอดภัย กรมทางหลวง. https://bhs.doh.go.th/files/accident/66/report_accident_2566.pdf
- [2] Liu, X., Wu, C., & Chen, X. (2020). **Driver drowsiness detection based on eye state recognition**. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 50(4), 324–333. <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.2982891>
- [3] Phatrabuddha, N., Yingratanasuk, T., Rotwannasin, P., Jaidee, W., & Krajaiklang, N. (2017). **Assessment of sleep deprivation and fatigue among chemical transportation drivers in Chonburi, Thailand**. Safety and Health at Work, 9(2), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.06.014>
- [4] Soukupová, T., & Čech, J. (2016). **Real-time eye blink detection using facial landmarks**. 21st Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2016), Rimske Toplice, Slovenia.
- [5] Florez, R., Palomino-Quispe, F., Alvarez, A. B., Coaquira-Castillo, R. J., & Herrera-Levano, J. C. (2024). **A real-time embedded system for driver drowsiness detection based on visual analysis of the eyes and mouth using convolutional neural network and mouth aspect ratio**. Sensors, 24(19), 6261. <https://doi.org/10.3390/s24196261>
- [6] Albadawi, Y., Alghamdi, S., Alsubhi, K., Alhumam, A., & Mathkour, H. (2023). **Real-time machine learning-based driver drowsiness detection using facial landmarks**. Journal of Imaging, 9(5), 91. <https://doi.org/10.3390/jimaging9050091>
- [7] Albadawi, Y., AlRedhaei, A., & Takturi, M. (2023). **Real-time machine learning-based driver drowsiness detection using visual features**. Journal of Imaging, 9(5), 91. <https://doi.org/10.3390/jimaging9050091>
- [8] Hssina, B., Merbouha, A., Ezzikouri, H., & Erritali, M. (2020). **A comparative study of decision tree ID3 and C4.5**. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(12), 23–30. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111203>
- [9] Alghamdi, N., Gutub, A., & Alsubaie, A. (2022). **Random forest algorithm for classification and prediction of driver drowsiness**. Procedia Computer Science, 198, 425–432. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.272>
- [10] He, Z., Lin, D., Lau, T., & Wu, M. (2019). **Gradient boosting machine: A survey**. arXiv preprint arXiv:1908.06951. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.06951>
- [11] Kartynnik, Y., Ablavatski, A., Grishchenko, I., & Grundmann, M. (2019). **Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs**. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1907.06724>
- [12] Google Research. (2020). **MediaPipe Face Mesh: 3D face landmark detection**. https://mediapipe.readthedocs.io/en/latest/solutions/face_mesh.html
- [13] Viola, P., & Jones, M. (2001). **Rapid object detection using a boosted cascade of simple features**. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001). <https://www.cs.cmu.edu/~efros/courses/LBMV07/Papers/viola-cvpr-01.pdf>
- [14] Wei, F., Chi, Z., & Chen, L. (2023). **A multi-feature fusion and situation awareness-based method for fatigue driving level determination**. Electronics, 12(10), 2302. <https://doi.org/10.3390/electronics12102302>

การเปรียบเทียบการสกัดเคอร์คูมินจากขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน

Comparison of the curcumin extraction from turmeric with different solvents

ธนาภรณ์ วงษ์ธานี¹ ณัฐมน เทวรังษี² พชรินทร์ แนมจันทร์³ เกรียงไกร วันทอง⁴
และ กิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์^{5*}

^{1, 2, 4, 5*}สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Email: tanaporn.wongthani@kmutt.ac.th; ²Email: nattamon.thava@gmail.com; ³Email: rdi@aru.ac.th; ⁴Email: kriangkrai.wan@kmutt.ac.th

⁵E-mail Address: puri_kit@hotmail.com

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายและระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน ลักษณะเฉพาะทางกายภาพและเคมีของผงขมิ้นชันจะศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) และเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR) ตามลำดับ จากผลการทดสอบด้วยเครื่อง XRD และ FTIR แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารเคอร์คูมินและแป้งซึ่งถือเป็นสารประกอบหลักของผงขมิ้นชัน จากนั้นทำการสกัดสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม แล้วทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันที่มีสีเหลืองจากเคอร์คูมิน โดยค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัด และแสดงให้เห็นว่าเวลาในการให้ความร้อนอาจส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินที่ได้นั้นลดลง ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์มซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าตัวทำละลายน้ำกลั่น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมีค่าสูงที่สุดที่ 3.85 a.u. จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เวลาในการสกัดนานขึ้นทำให้สีที่ปรากฏออกมานั้นมีสีเข้มมากขึ้นไปด้วย แสดงให้เห็นถึงการละลายของเคอร์คูมินออกมาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มสามารถซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์และโครงสร้างเนื้อเยื่อของขมิ้นชันจึงเกิดการละลายมากขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นไปด้วย

คำสำคัญ: การสกัด ขมิ้นชัน เครื่องวัดการดูดกลืนแสง เคอร์คูมิน ตัวทำละลายอินทรีย์

Abstract

This study aimed to study the preparation of turmeric solution with different solvents and extraction times. The physical and chemical characteristics of turmeric powder were studied using an X-ray diffractometer (XRD) and a Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), respectively. The XRD and FTIR results revealed the presence of curcumin and starch, which are the main compounds of turmeric powder. Then, the turmeric solution was extracted with different solvents including distilled water, ethanol, methanol, acetone, and chloroform. The absorbance value of the extracted turmeric solution was measured by UV-Visible spectrophotometer. The results showed that the turmeric solution had the highest absorbance at 423 nm, corresponding to the yellow appearance of turmeric solution from curcumin. The absorbance values of turmeric solution extracted with distilled water at 70 °C and 90 °C showed only slight, insignificant changes in absorbance value with increased temperature and time and suggesting curcumin degradation under heat. While the absorbance value of turmeric solution extracted with ethanol, methanol, acetone and chloroform, which are organic solvents, had higher absorbance value than that of distilled water. The absorbance of turmeric extracts using chloroform was highest at 3.85 a.u. with longer

extraction times, the color becomes darker, indicating a greater amount of curcumin dissolution. This allows the chloroform solvent to penetrate the cell walls and tissue structures of turmeric, resulting in greater dissolution. This results in higher concentration, resulting in higher absorbance

Keyword: Extraction, Turmeric, UV-Visible spectrophotometry, Curcumin, Organic solvent

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันการใช้ประโยชน์จากวัสดุหรือผลผลิตจากธรรมชาติกำลังได้รับความสนใจและเป็นที่แพร่หลายในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืนและเทคโนโลยีสีเขียว (Green technology) ที่เข้ามาเป็นปัจจัยสำคัญในการปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมในปัจจุบันและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีจุดประสงค์หลักเพื่อการลดต้นทุนการผลิต ลดการสูญเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยไม่ว่าจะทำกิจกรรมใด ๆ ต้องคำนึงถึงแนวคิด “เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม” เป็นสำคัญ ซึ่งหากพิจารณาจากกระบวนการผลิต และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มของอุตสาหกรรมสิ่งทอถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลก แต่ขณะเดียวกันก็เป็นกลุ่มอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในระดับสูงเนื่องจากผลกระทบจากการใช้สีย้อมสังเคราะห์ เช่น ประเภอะโซ (Azo dyes) เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ให้สีสด และมีความคงทนสูง ทว่าการผลิตและการกำจัดสีย้อมเหล่านี้มักปลดปล่อยสารเคมีที่เป็นพิษ เช่น อะโรมาติกเอมีน โลหะหนัก และสารก่อมะเร็ง ลงสู่สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและสารพิษตกค้าง และผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต [1, 2] ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้การใช้สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyes) ที่ได้จากพืช สัตว์ และแร่ธาตุ จึงเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสีย้อมธรรมชาติมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ อีกทั้งยังมีความสอดคล้องกับแนวคิดเทคโนโลยีสีเขียวที่ให้ความสำคัญต่อการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนอีกด้วย โดยตัวอย่างของสีย้อมธรรมชาติสามารถสกัดได้จาก พืช แมลง แร่ธาตุ และใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างยาวนาน ได้แก่ ครั่ง (Lac dye) และ โคชินีล (Cochineal) จากแมลงซึ่งให้เฉดสีแดงไล่ไปจนถึงสีชมพูสด คราม (Indigo) ที่ให้สีน้ำเงินเข้ม เมล็ดคำแสด (Annatto seeds) ให้สีส้มสด ซึ่งในบรรดาสีย้อมธรรมชาติจากพืชมีชันชันก็ถือเป็นพืชอีกชนิดที่น่าสนใจเพราะนอกจากจะให้เฉดสีเหลืองอมส้มแล้วนั้น ยังมีสารออกฤทธิ์สำคัญหลักคือ เคอร์คูมิน (Curcumin) ที่มีสมบัติทางชีวภาพที่หลากหลายเช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบ เป็นต้น [3] ด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้สารสกัดจากชันชันไม่ใช่ว่าได้มาเพียงสีเท่านั้น แต่เป็นการเพิ่มคุณค่าหรือมูลค่าในด้านของอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ใช้ในการพัฒนาสีย้อมผ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพช่วยเพิ่มความคงทนของสิ่งทอจากการลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อีกทั้งยังสามารถต่อยอดไปสู่การใช้งานในด้านเทคโนโลยีที่ต้องการพัฒนาเป็นตัวบ่งชี้ pH ทางแสง (Optical pH indicators) [4] การแยกแยะด้วยสีในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ในงานบรรจุภัณฑ์ งานศิลปะหัตถกรรม การออกแบบสื่อศิลป์ นอกจากนี้ชันชันยังเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่าย มีราคาถูก การสกัดสารสีทำได้ง่ายด้วยตัวทำละลายอินทรีย์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดักชัน (Reduction reaction) ที่ซับซ้อนเหมือนการสกัดสีย้อมจากคราม [5] และมีการใช้ประโยชน์หลากหลายทั้งด้านอาหาร ยา และเครื่องสำอางอยู่แล้ว ทำให้การต่อยอดและพัฒนาสู่การประยุกต์ใช้งานนั้นจึงมีความเหมาะสมทั้งในทางงานวิจัยและด้านเศรษฐกิจ โดยเพื่อให้ตอบโจทย์ในการใช้เทคโนโลยีสีเขียวกับความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงได้มีแนวคิดในการนำเอาสารสกัดจากชันชันมาใช้ประโยชน์ โดยเริ่มจากการศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพและเคมี จากนั้นจึงได้ศึกษาการเตรียมสารละลายชันชันด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยจะทำการเปรียบเทียบความสามารถในการละลายของผงชันชันด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ และตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม และคำนวณหาค่าความเข้มข้นของสารละลายชันชันจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายชันชันที่ตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ซึ่งในการเปรียบเทียบความสามารถในการละลายผงชันชันนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากช่วยให้เข้าใจในกลไกหรือข้อจำกัดในการละลายของเคอร์คูมินในสภาวะต่าง ๆ และสามารถคัดเลือกตัวทำละลายที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ให้ตรงต่อความต้องการใช้งาน อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการสกัดที่คุ้มค่า ช่วยลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพสูงสุดในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม รวมไปถึงเป็นส่วนสำคัญในการสร้างองค์ความรู้พื้นฐานและแนวทางปฏิบัติที่จะช่วยยกระดับการใช้ประโยชน์จากชันชันซึ่งถือเป็นพืชสมุนไพรไทยให้มีมูลค่าสูงขึ้นสามารถแข่งขันได้ในระดับอุตสาหกรรมทั้งในและต่างประเทศ เพื่อเสริมสร้างคุณค่าและขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้สารสกัดจากธรรมชาติในมิติใหม่ ๆ ที่เชื่อมโยงกับทั้งศิลปะหัตถกรรม เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะทางกายภาพและเคมีของผงขมิ้นชัน
2. เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมในระยะเวลาที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดสารละลายขมิ้นชันของตัวทำละลายที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ในการศึกษาโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผงขมิ้นชันจะศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR) ตามลำดับ
2. ในการศึกษาการสกัดสารละลายขมิ้นชัน จะใช้ผงขมิ้นชันสำเร็จรูปที่ผลิตในประเทศพม่า ยี่ห้อ “โก ลา ทุน” (Ko Hla Tun)
3. ในกระบวนการสกัดสารละลายขมิ้นชันจะใช้ตัวทำละลาย 5 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น อะซิโตน เมทานอล เอทานอล และคลอโรฟอร์ม
4. ในกระบวนการสกัดสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายชนิดน้ำกลั่นจะทำการสกัดภายใต้อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C
5. ในการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้จะใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) โดยทำการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-600 nm

2. วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยนั้นจะประกอบไปด้วย ผงขมิ้นชัน (Turmeric powder) น้ำกลั่น (Distilled water) เอทานอล (Ethanol) เมทานอล (Methanol) อะซิโตน (Acetone) และคลอโรฟอร์ม (Chloroform) โดยทำการแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 2 ตอน ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 การศึกษาลักษณะเฉพาะของผงขมิ้นชัน

สำหรับการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงขมิ้นชันนั้นจะเริ่มจากนำผงขมิ้นชันปริมาณ 5 g มาร่อนด้วยตะแกรง แล้วนำไปบดให้ผงละเอียดด้วยโม่บดสาร จากนั้นนำผงที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (2 theta) ที่ 5° ถึง 40° และศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสงอินฟราเรด ด้วยโหมดการวัดแบบส่องผ่าน (Transmission mode) ในช่วงความยาวคลื่น 4000 - 500 cm^{-1}

2.2 การเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม

สำหรับการเตรียมสารละลายขมิ้นชันนั้นจะใช้ตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำกลั่น อะซิโตน เมทานอล เอทานอล และคลอโรฟอร์ม โดยการเตรียมสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยน้ำกลั่นนั้น จะเริ่มจากนำผงขมิ้นชันปริมาณ 0.030 g มาละลายในตัวทำละลายน้ำกลั่น 100 ml แล้วนำสารละลายที่ได้มากรองที่ความเร็วรอบ 150 rpm อุณหภูมิ 70 และ 90 °C ในเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min วางสารละลายไว้จนกระทั่งอุณหภูมิของสารละลายเท่ากับอุณหภูมิห้อง และกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง จะได้สารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่น และในการเตรียมสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่เป็นเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์มนั้น จะเริ่มจากการนำผงขมิ้นชันปริมาณ 0.030 g มาละลายในตัวทำละลายที่แตกต่างกันได้แก่ เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์มที่ปริมาตร 100 ml และทำการกรองสารละลายในเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min ที่ความเร็วรอบ 150 rpm จากนั้นกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองจะได้สารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม ตามลำดับ

ส่วนการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้นั้น จะนำสารละลายขมิ้นชันที่ได้จากตัวทำละลายทั้งหมดมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-600 nm และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายขมิ้นชัน ที่สกัดด้วยตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์มที่มีความเข้มข้น 0.030% w/v ในระยะเวลาในการสกัดแตกต่างกัน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

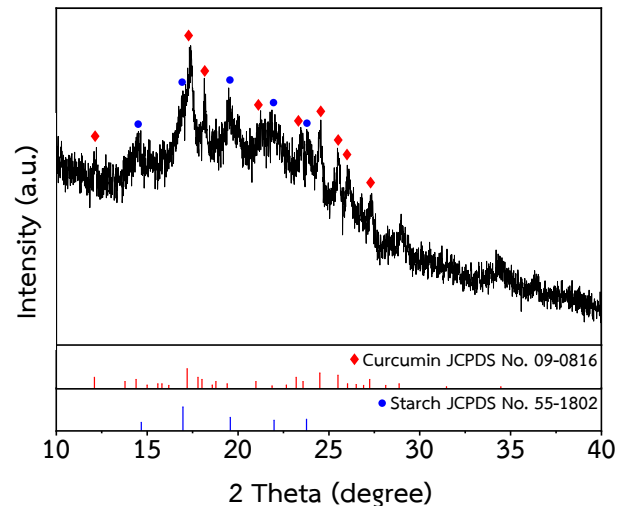
3.1 ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงขมิ้นชัน

โครงสร้างผลึกของผงขมิ้นชัน

สำหรับการศึกษาลักษณะเฉพาะของผงขมิ้นชัน เริ่มจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างผลึกของผงขมิ้นชันด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งผลแสดงได้ดังรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะของผงขมิ้นชัน

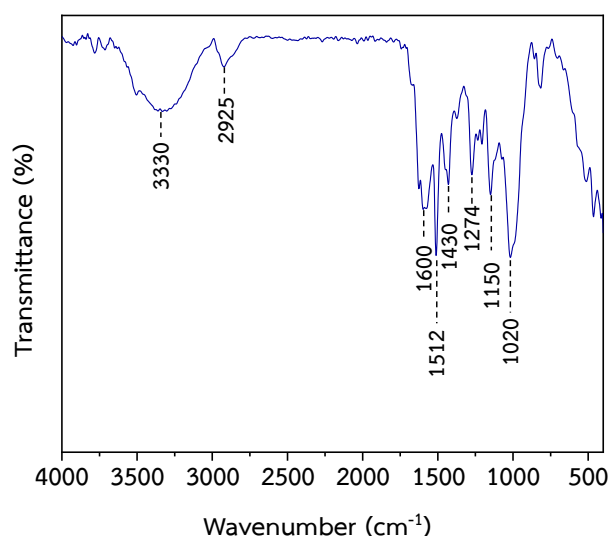


รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงขมิ้นชัน

จากรูปที่ 1 แสดงลักษณะของผงขมิ้นชันพบว่ามีลักษณะเป็นผงสีเหลืองส้ม และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงขมิ้นชัน จากผลการทดลองพบว่าผงขมิ้นชันมีโครงสร้างผลึกแบบออสัญฐาน โดยจะปรากฏมุมเลี้ยวเบน (2 Theta) ที่ 12.21, 17.33, 17.89, 21.04, 23.36, 24.56, 25.48, 26.02 และ 27.36 ซึ่งสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิง (Joint Committee on Power Diffraction Standard; JCPDS) หมายเลข 09-816 บ่งบอกถึงการมีอยู่ของสารเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งมีหน้าที่เป็นสารให้สีในขมิ้นชัน อีกทั้งยังปรากฏมุมเลี้ยวเบน (2 Theta) ที่ 14.68, 16.97, 19.58, 21.98 และ 23.77° ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS หมายเลข 55-1802 บ่งบอกถึงโครงสร้างผลึกของแป้งหรือคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของขมิ้นชันที่อาจพบมากถึง 69.4% [6-8]

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของผงขมิ้นชัน

สำหรับการศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของขมิ้นชันจะศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสงอินฟราเรด (FTIR) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของผงขมิ้นชัน

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าผงขมิ้นชันมีช่วงการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 4000 - 500 cm^{-1} ซึ่งประกอบด้วยเลขคลื่น 3330 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของออกซิเจนพันธะเดี่ยวต่อกับไฮโดรเจน (O-H Stretching) ที่เลขคลื่น 2925 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อกับไฮโดรเจน (C-H Stretching) ที่เลขคลื่น 1600 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของคาร์บอนพันธะคู่กับคาร์บอนของวงแหวน Aromatic ของเคอร์คูมิน (C=C Stretching) จากนั้นที่เลขคลื่น 1512 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) อีกทั้งที่เลขคลื่น 1430 และ 1274 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของคาร์บอนพันธะเดี่ยวกับออกซิเจน (C-O Stretching) บ่งบอกถึงการมีอยู่ของสารเคอร์คูมิน นอกจากนี้ที่เลขคลื่น 1150 และ 1020 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบยืดของคาร์บอนพันธะเดี่ยวต่อกับออกซิเจนและคาร์บอน (C-O-C Stretching) บ่งบอกถึงการมีอยู่ของแป้ง ซึ่งทั้งสารเคอร์คูมินและแป้งเป็นสารประกอบหลักของผงขมิ้นชัน [9-11]

1.2 ผลการเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม

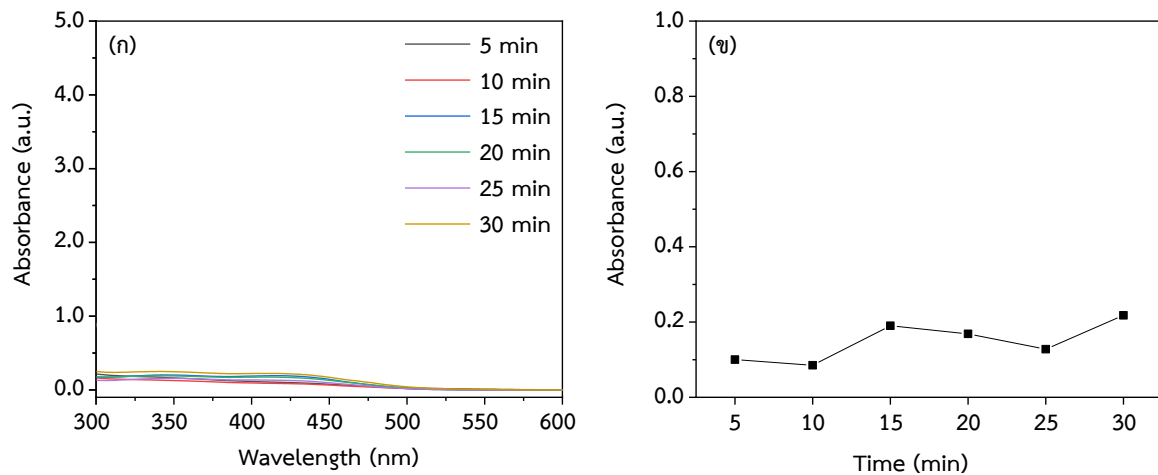
การศึกษาวิธีการสกัดสารละลายขมิ้นชันด้วยน้ำกลั่น

ในการทดลองนี้จะทำการสกัดสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่น เริ่มจากการนำผงขมิ้นชันปริมาณ 0.030 g ผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ 150 rpm อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min จากนั้นกรองสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้ด้วยกระดาษกรอง ผลที่ได้แสดงดังรูปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C ในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน

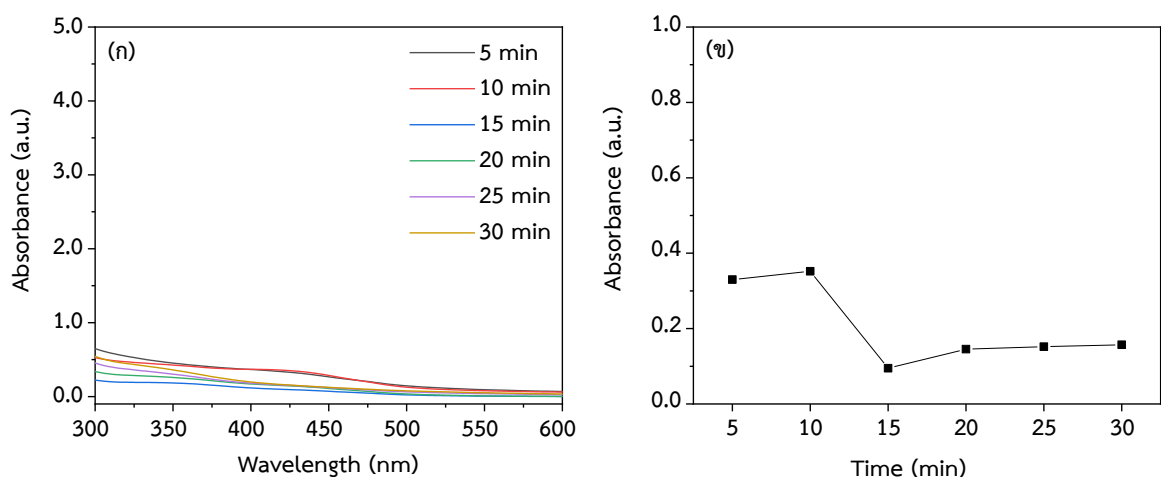
Temperature	Time (min)					
	5	10	15	20	25	30
70 °C						
90 °C						

จากตารางที่ 2 แสดงลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C ในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน โดยสารละลายที่ได้จะถูกบรรจุไว้ในขวดแก้วแบบแก้ว และทำการถ่ายภาพ จากนั้นทำการพิจารณาสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่น พบว่าสีที่ปรากฏมาจากสารที่ให้สีในผงขมิ้นชันที่เรียกว่า เคอร์คูมิน ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเหลือง ต่อมาได้นำตัวอย่างดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4 (ก) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 70 °C ในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-450 nm ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของสารละลายไขมันชั้นที่มีการดูดกลืนแสงของสารเคอร์คูมินที่มีความยาวคลื่น 423 nm เป็นค่าสูงที่สุด เนื่องจากที่ความยาวคลื่น 423 nm ซึ่งอยู่ในช่วง Visible light เป็นการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงินจึงทำให้เราเห็นสีของสารละลายเป็นสีเหลือง [12] เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่น 423 nm พบว่าค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละระยะเวลาของการสกัด ต่อมาจึงทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลาที่ใช้ในการสกัดสารละลายไขมันชั้น ที่ความยาวคลื่น 423 nm แสดงดังรูปที่ 4 (ข) พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 423 nm เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดที่ 15 min จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการสกัด จะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ จากนั้นได้ทำการนำเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการสกัดสารละลายไขมันชั้นด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 90 °C และ ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

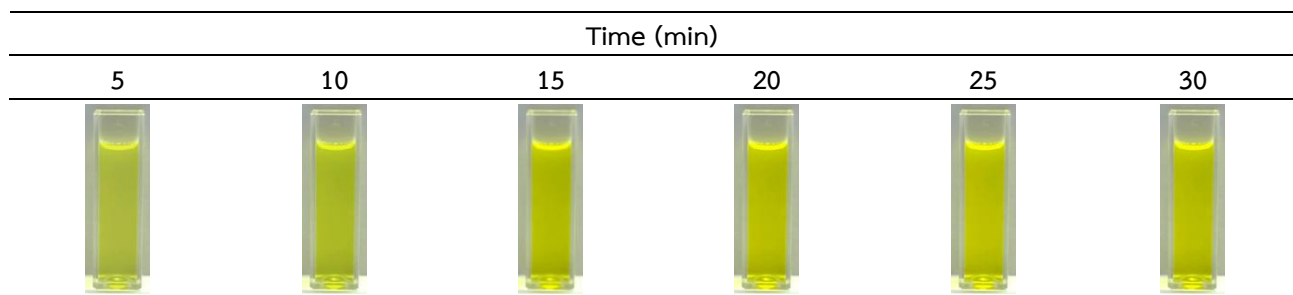
จากรูปที่ 5 (ก) แสดงลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 90 °C ในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงถึงลักษณะเฉพาะของสารละลายไขมันชั้นที่มีการดูดกลืนแสงของสารเคอร์คูมินที่มีความยาวคลื่น 423 nm เป็นค่าสูงที่สุดเช่นเดียวกับสกัดด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 70 °C จากนั้นได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับเวลาที่ใช้ในการสกัดสารละลายไขมันชั้น ที่ความยาวคลื่น 423 nm แสดงดังรูปที่ 5 (ข) พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสง

เมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัด 10 min จากนั้นเกิดการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงอย่างชัดเจนเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัด 15 min แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสกัดจนถึง 30 min พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ จากการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยของอุณหภูมิในการสกัดสารเคอร์คูมินในผงขมิ้นชันแสดงให้เห็นว่าเวลาในการให้ความร้อนอาจส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินที่ได้นั้นลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนนี้จะไปส่งผลทำให้สารเคอร์คูมินเกิดการเสื่อมสภาพได้ [13, 14] อีกทั้งปริมาณของสารเคอร์คูมินที่ได้จากการสกัดตามระยะเวลาต่าง ๆ ยังมีปริมาณที่ไม่แน่นอน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เห็นได้ว่าการสกัดสารเคอร์คูมินด้วยวิธีนี้นั้นไม่มีความเหมาะสม ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจะใช้วิธีการสกัดสารเคอร์คูมินจากตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดสารละลายขมิ้นชันต่อไป

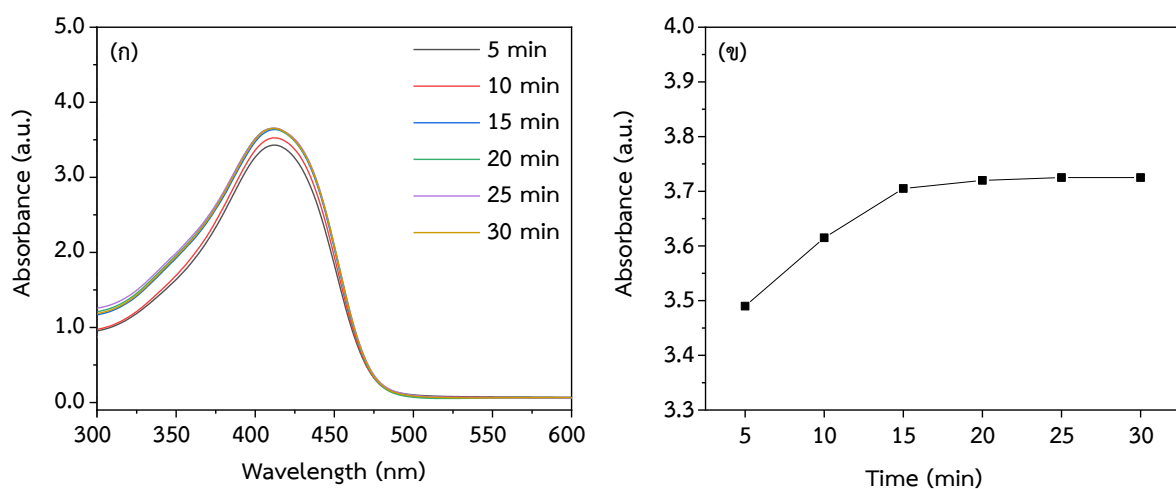
การศึกษาวิธีการสกัดสารละลายขมิ้นชันด้วยเอทานอล

ในการทดลองนี้จะทำการสกัดสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เริ่มจากการนำผงขมิ้นชันปริมาณ 0.030 g ผสมกับสารละลายเอทานอล 100 ml กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ 150 rpm เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min จากนั้นกรองสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยเอทานอลด้วยกระดาษกรอง ผลที่ได้แสดงดังรูปในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยเอทานอลในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน



จากตารางที่ 3 แสดงลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยเอทานอลในระยะเวลาที่ต่างกัน โดยสารละลายที่ได้จะถูกบรรจุไว้ในขวดแก้วแบบแก้วและทำการถ่ายภาพ จากนั้นพิจารณาสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยเอทานอล พบว่าสีที่ปรากฏมาจากสารที่ให้สีในผงขมิ้นชันที่เรียกว่าเคอร์คูมิน มีลักษณะเป็นสีเหลืองและเป็นสีเหลืองเข้มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาสกัดผ่านไป 15 min บ่งบอกให้เห็นถึงการละลายของเคอร์คูมินออกมาในปริมาณที่มากขึ้น และแม้ว่าระยะเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นไปถึง 30 min แต่ความเข้มของสีเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากการละลายของสารเคอร์คูมินเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุล ต่อมานำตัวอย่างดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 6 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นด้วยตัวทำละลายเอทานอล ที่ระยะเวลาในการสกัดแตกต่างกัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm โดยค่าความยาวคลื่นนี้สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะของสารเคอร์คูมิน จึงทำการพิจารณาการดูดกลืนแสงในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายไขมันชั้นด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความยาวคลื่น 423 nm และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอลที่ความเข้มข้น 0.030% w/v กับระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 (ข) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนมีค่าสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไป 20 min หลังจากนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นจะทำให้ตัวทำละลายเอทานอลสามารถซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างเนื้อเยื่อของผงไขมันชั้นมากขึ้นจึงเกิดการละลายมากขึ้น ทำให้สีของสารละลายมีความเข้มมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นไปด้วย [15] แต่หลังจากเวลาการสกัดที่ 20 min เป็นต้นไป ค่าการดูดกลืนแสงเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากการละลายถึงจุดอิ่มตัว ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

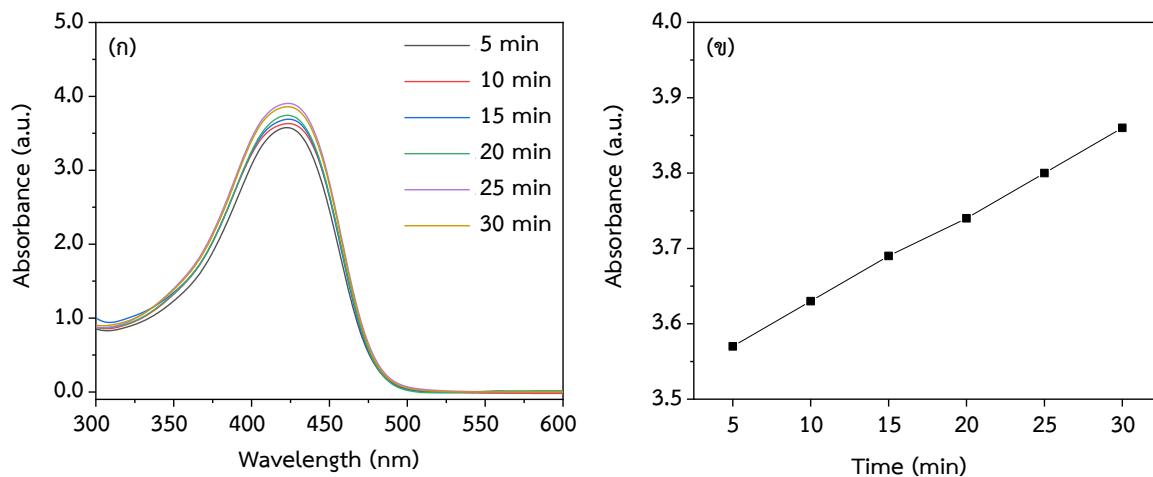
การศึกษาวิธีการสกัดสารละลายไขมันชั้นด้วยเมทานอล

ทำการสกัดสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล เริ่มจากการนำผงไขมันชั้นปริมาณ 0.030 g ผสมกับสารละลายเมทานอล 100 ml กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ 150 rpm เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min จากนั้นกรองสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยเมทานอลด้วยกระดาษกรอง ผลที่ได้แสดงดังรูปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ลักษณะสีของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยเมทานอลในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน

Time (min)					
5	10	15	20	25	30
					

จากตารางที่ 4 แสดงลักษณะสีของสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลในระยะเวลาการสกัดแตกต่างกัน โดยสารละลายที่ได้จะถูกใส่บรรจุไว้ในขวดแก้วแบบแกว์และทำการถ่ายภาพ พบว่าสีที่ปรากฏมาจากสารที่ให้สีในผงไขมันชั้นที่เรียกว่า เคอร์คูมิน มีลักษณะเป็นสีเหลืองสดเมื่อใช้ระยะเวลาสกัดที่ 5 min แต่เมื่อระยะเวลาในการสกัดผ่านไปนานขึ้นส่งผลให้สีที่ปรากฏออกมานั้นมีสีเหลืองเข้มมากขึ้นไปด้วย เนื่องจากเมทานอลเป็นสารละลายที่มีขี้้วสามารถละลายสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกที่มีสารสำคัญเคอร์คูมินอยด์ ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์สำคัญของไขมันชั้น ทำให้ตัวทำละลายเมทานอลสามารถซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์และโครงสร้างเนื้อเยื่อของไขมันชั้นมากขึ้น [15] แสดงถึงการละลายของผงไขมันชั้นมากขึ้นทำให้ความเข้มของสารละลายสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นไปด้วย ต่อมานำเอาตัวอย่างดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอลที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 7 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายเมทานอลในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 423 nm โดยค่าความยาวคลื่นนี้สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะของสารเคอร์คูมิน จึงทำการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความเข้มข้นของสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายเมทานอลที่ความยาวคลื่น 423 nm และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันกับระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 7 (ข) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบเส้นตรง และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดที่นานขึ้น

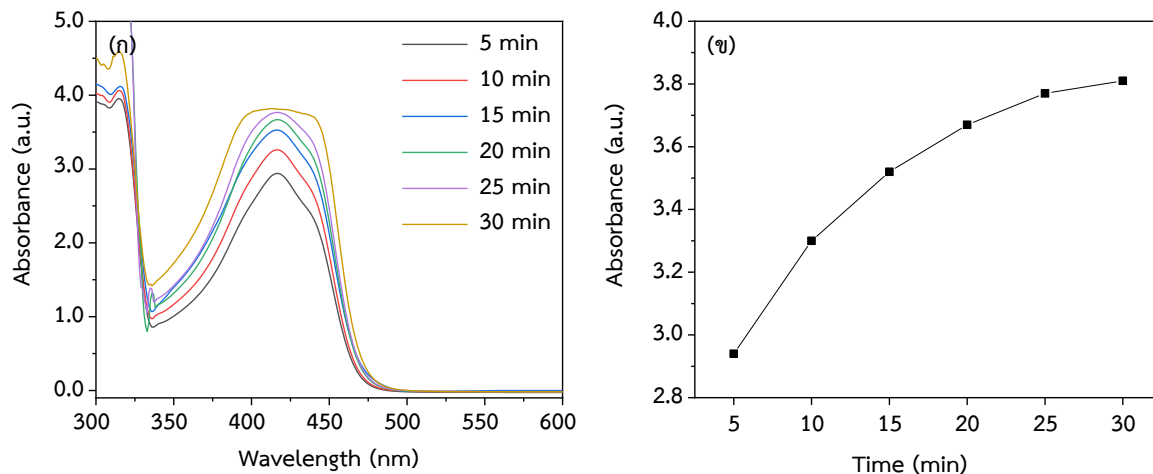
การศึกษาวิธีการสกัดสารละลายขมิ้นชันด้วยอะซิโตน

ในการทดลองนี้จะทำการสกัดสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตน เริ่มจากการนำผงขมิ้นชันปริมาณ 0.030 g ผสมกับสารละลายอะซิโตน 100 ml กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ 150 rpm เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min จากนั้นกรองสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยอะซิโตนด้วยกระดาษกรอง ผลที่ได้แสดงดังรูปในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยอะซิโตนในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน

Time (min)					
5	10	15	20	25	30
					

จากตารางที่ 5 แสดงลักษณะสีของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยอะซิโตนในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน โดยสารละลายที่ได้จะถูกใส่บรรจุไว้ในควีเวทแบบแก้วและทำการถ่ายภาพ จากนั้นพิจารณาสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยอะซิโตน พบว่าสีที่ปรากฏมาจากสารที่ให้สีในผงขมิ้นชันที่เรียกว่าเคอร์คูมิน มีลักษณะเป็นสีเหลือง เมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นส่งผลให้สีที่ปรากฏออกมามีสีเหลืองเข้มมากขึ้นไปด้วย บ่งบอกให้เห็นถึงการละลายของเคอร์คูมินออกมาในปริมาณที่มากขึ้น จากนั้นนำเอาตัวอย่างดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตนที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 8 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตน ในระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm โดยค่าความยาวคลื่นนี้สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะของสารเคอร์คูมิน จึงทำการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงแต่ละความเข้มข้นของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตนที่ความยาวคลื่น 423 nm และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายอะซิโตนที่ระยะเวลาการสกัดแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 8 (ข) พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดนานขึ้น บ่งบอกได้ว่าตัวทำละลายอะซิโตนสามารถซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์และโครงสร้างเนื้อเยื่อของไขมันชั้นมากขึ้นจึงเกิดการละลายมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นไปด้วย

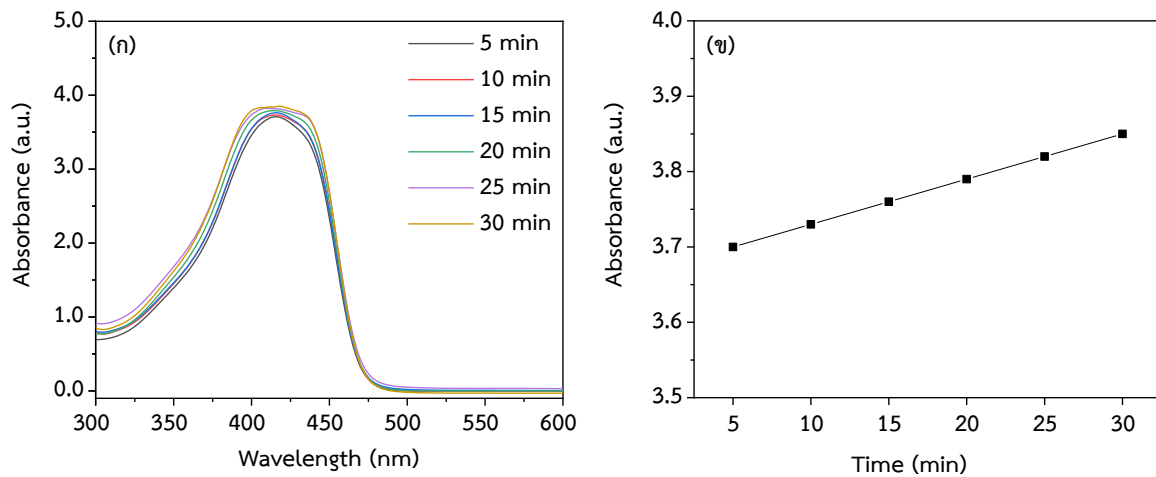
การศึกษาวิธีการสกัดสารละลายไขมันชั้นด้วยคลอโรฟอร์ม

ในการทดลองนี้จะทำการสกัดสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม เริ่มจากการนำผงไขมันชั้นปริมาณ 0.030 g ผสมกับสารละลายคลอโรฟอร์ม 100 ml กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ 150 rpm เป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min จากนั้นกรองสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยคลอโรฟอร์มด้วยกระดาษกรอง ผลที่ได้แสดงดังรูปในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะสีของสารละลายไขมันชั้นสกัดด้วยคลอโรฟอร์มในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน

Time (min)					
5	10	15	20	25	30
					

จากตารางที่ 6 แสดงลักษณะสีของสารละลายไขมันชั้นที่สกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มในระยะเวลาการสกัดแตกต่างกัน โดยสารละลายที่ได้จะถูกใส่บรรจุไว้ในควีเวทแบบแก้วและทำการถ่ายภาพ พบว่าสีที่ปรากฏมาจากสารที่ให้สีในผงไขมันชั้น มีลักษณะเป็นสีเหลือง และเมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นส่งผลให้สีที่ปรากฏออกมานั้นมีสีเข้มมากขึ้นไปด้วย แสดงให้เห็นถึงการละลายของเคอร์คูมินออกมาในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ตัวทำละลายคลอโรฟอร์มสามารถซึมผ่านเข้าไปในผนังเซลล์และโครงสร้างเนื้อเยื่อของไขมันชั้นจึงเกิดการละลายมากขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นไปด้วย ต่อมานำเอาตัวอย่างดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9

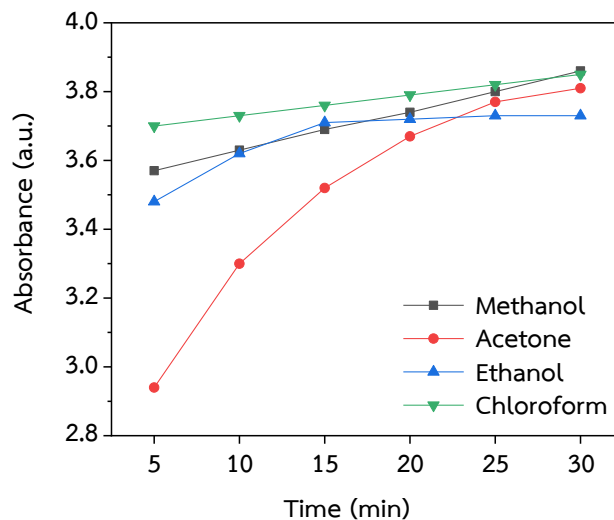


รูปที่ 9 (ก) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ระยะเวลาแตกต่างกัน และ (ข) กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 9 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันสกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0.030% w/v ในระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm โดยค่าความยาวคลื่นนี้สอดคล้องกับค่าการดูดกลืนแสงจำเพาะของสารเคอร์คูมิน จึงทำการพิจารณาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 423 nm และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่ความเข้มข้น 0.030% w/v กับระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 9 (ข) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นแบบเส้นตรง และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาในการสกัดที่นานขึ้น

ผลการเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม

จากการศึกษาวิธีการสกัดสารเคอร์คูมินจากผงขมิ้นชันที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm ระหว่างสารละลายขมิ้นชันที่ความเข้มข้น 0.030% w/v สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม แสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม

จากรูปที่ 10 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม จะเห็นว่าในทุกตัวทำละลายเมื่อระยะเวลาในการสกัดมากขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นทำให้ตัวทำละลายเอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม ซึ่งเป็นสารละลายที่มีขั้วสามารถซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างเนื้อเยื่อของผงขมิ้นชันมากขึ้นจึงเกิดการละลายมากขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาเริ่มต้นในการสกัดเท่ากัน ค่าการดูดกลืนแสงของ

สารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มมีค่ามากกว่าการสกัดด้วยตัวทำละลายเมทานอล เอทานอล และอะซิโตน ตามลำดับ ซึ่งการละลายที่เกิดขึ้นนั้นเนื่องจากตัวทำละลายคลอโรฟอร์มเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีขั้วต่ำถึงปานกลางที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับ โมเลกุลเคอร์คูมินทำให้สามารถละลายสารเคอร์คูมินได้ดีกว่าน้ำกลั่นตามหลักการ like dissolves like โดยตัวถูกละลายที่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่นเดียวกับตัวถูกละลายที่ไม่มีขั้วจะละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการละลายของสารละลายขมิ้นชันเกิดขึ้นจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับสารเคอร์คูมิน [16] จึงทำให้สามารถซึมผ่านเข้าไปในโครงสร้างเนื้อเยื่อของผงขมิ้นชันได้ ทำให้เมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดนานขึ้นความเข้มข้นสีจึงมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สามารถคัดเลือกตัวทำละลายที่มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ให้ตรงต่อความต้องการใช้งานต่อไปได้

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมสารละลายขมิ้นชันที่ตัวทำละลายที่เหมาะสมในระยะเวลาการสกัดที่ 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 min เมื่อทำการศึกษาการเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 70 °C และ 90 °C พบว่าสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ 70 °C มีลักษณะสีเหลืองซึ่งเป็นผลมาจากสารที่ให้สีในผงขมิ้นชันที่เรียกว่าเคอร์คูมิน เมื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นชันที่พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 423 nm ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงิน จึงทำให้เห็นสีของสารละลายเป็นสีเหลือง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสกัดพบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดเป็น 90 °C ค่าการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อใช้ระยะเวลาในการสกัดที่ 15 min พบว่าค่าการดูดกลืนแสงลดลงอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าเวลาในการให้ความร้อนอาจส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดได้ลดลง ในส่วนของการศึกษาการเตรียมสารละลายขมิ้นชันด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ เอทานอล เมทานอล อะซิโตน และคลอโรฟอร์ม พบว่าสารละลายขมิ้นชันที่สกัดได้มีลักษณะสีเหลืองเข้มและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าสารละลายขมิ้นชันที่สกัดด้วยตัวน้ำกลั่น โดยคลอโรฟอร์มมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดที่ 3.85 a.u. เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลาย เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดด้านความปลอดภัยจึงนิยมใช้ตัวทำละลายเอทานอลในการใช้งานมากที่สุด

5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการสกัดผงขมิ้นที่ตัวทำละลายควรเพิ่มระยะเวลาในการสกัดเพื่อดูแนวโน้มค่าการดูดกลืนแสงของสารเคอร์คูมินในขมิ้นชัน
2. ในการเก็บรักษาสารละลายขมิ้นหลังจากสกัดที่ระยะเวลาที่แตกต่างกันควรเก็บไว้ในขวดสีชาและหลีกเลี่ยงไม่ให้โดนแสง

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย วิทยาศาสตร์และนวัตกรรมแห่งชาติ (สกว.) ปีงบประมาณ 2568 หมายเลขทุน FRB680074/0164 และได้รับการสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจากสำนักงานปรมานูเพื่อสันติ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Samanta, A. K., and Agarwal, P. (2020). Application of natural dyes on textiles. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 34, 384-399.
- [2] Kant, R. (2012). Textile dyeing industry: An environmental hazard. *Natural Science*. 4(1). 22-26.
- [3] Priyadarsini, K. I. (2014). The chemistry of curcumin: from extraction to therapeutic agent. *Molecules*, 19, 20091-20112.
- [4] Mohammad, R., Ahmad, M and Daud, J. M. (2007). The potential of curcumin reagent as a natural pH indicator for the development of an optical pH sensor. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 11(2), 351-360.
- [5] Popescu, V., Alexandrescu, A. D., Popescu, G and Vasilache, V. (2025). Eco-friendly extraction of curcumin from turmeric and dyeability of textile fibers. *Fibers*, 13(6). 73
- [6] Lin, L and Lee, K. H. (2006). structure-activity relationships of curcumin and its analogs with different biological activities. *Studies in Natural Products Chemistry*, 33, 785-812.
- [7] Ueno, K. (1998). Development of a plastic dosimeter for industrial use with high dose. *Radiation Physics and Chemistry*, 31(4-6), 467-472.

- [8] Priyadarsini, K. I. (2013). Chemical and structural features influencing the biological activity of curcumin. *Current Pharmaceutical Design*, 19(11), 2093-2100.
- [9] Wilczewski, S., Skórczewska, K., Tomaszewska, J., Lewandowski, K., Studzinski, W., Osial, M., Jenczyk, P., Grzywacz, H. and Domanska, A. (2022). Curcuma longa l. rhizome extract as a poly (vinyl chloride)/graphene nanocomposite green modifier. *Molecules*, 27(22), 8081.
- [10] Hezma, A. M., Abdelrazzak, A. B. and El-Bahy, G. S. (2019). Preparation and spectroscopic investigations of hydroxyapatite-curcumin nanoparticles-loaded polylactic acid for biomedical application. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 6(1), 1-9.
- [11] Cocean, A., Cocean, I., Cimpoesu, N., Cocean, G., Cimpoesu, R., Postolachi, C., Popescu, V. and Gurlui, S. (2021). Laser induced method to produce curcuminoid-silanol thin films for transdermal patches using irradiation of turmeric target. *Applied Sciences*, 11(9), 4030.
- [12] Sohn, S. I., Priya, A., Balasubramaniam, B., Muthuramalingam, P., Sivasankar, C., Selvaraj, A., Valliammai, A., Jothi, R. and Pandian, S. (2021). Biomedical applications and bioavailability of curcumin—an updated overview. *Pharmaceutic*, 13(12), 2102.
- [13] Sun, J. L., Ji, H. F. and Shen, L. (2019). Impact of cooking on the antioxidant activity of spice turmeric. *Food & Nutrition Research*, 63, 3451.
- [14] Nandiyanto, A. B. D. (2020). Thermal decomposition of turmeric microparticles under atmosphere condition. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(5), 3025-3033.
- [15] Suresh, D., Manjunatha, H. and Srinivasan, K. (2007). Effect of heat processing of spices on the concentrations of their bioactive principles: turmeric (*curcuma longa*), red pepper (*capsicum annuum*) and black pepper (*piper nigrum*). *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(3-4), 346-351.
- [16] Park, J., Do, S., Lee, M., Ha, S. and Lee, K. G. (2022). Preparation of turmeric powder with various extraction and drying methods. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(39), 2-9.

การสร้างเส้นพลาสติกผสมจากพอลิแลคติกแอซิดและไฮดรอกซีอะพาไทต์ผ่านเครื่องฉีดเส้นพลาสติก อย่างง่ายสำหรับการใช้งานการพิมพ์ 3 มิติ

Fabrication of composite filaments from polylactic acid and hydroxyapatite through the facile extruder for 3D printing applications

ธนาภรณ์ วงษ์ธานี¹ สุรพงษ์ เนตรประสม² พชรินทร์ แนมจันทร์³ แสงกฤษ กลั่นบุศย์⁴
และ กิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์^{5*}

^{1, 2, 4, 5*} สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹Email: tanaporn.wongt@kmutt.ac.th; ²Email: surapongnatprasom@gmail.com; ³Email: rdi@aru.ac.th; ⁴Email: saengkrit.klu@kmutt.ac.th

⁵E-mail Address: puri_kit@hotmail.com

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเส้นพลาสติกผสมจากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และไฮดรอกซีอะพาไทต์ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จะใช้สารตั้งต้นจากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาวที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากครัวเรือน โดยไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่จะสังเคราะห์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี ในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวจะสังเคราะห์ด้วยวิธีการอบด้วยความร้อน จากนั้นนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกและหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer; XRD) และเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer; FTIR) ตามลำดับ จากผลการทดสอบด้วยเครื่อง XRD แสดงให้เห็นว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้มีเฟสของแคลเซียมฟอสเฟตที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) โดยจะพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวมีค่าความเป็นผลึกสูงกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ และจากการทดสอบด้วยเครื่อง FTIR แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่บ่งชี้ถึงแคลเซียมฟอสเฟตที่เป็นเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยเครื่องฉีดเส้นอย่างง่ายที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมนั้นทำมาจากท่อเหล็ก ดอกสว่าน ฮีตเตอร์รัดท่อ และมอเตอร์ปั้มน้ำฝน จากนั้นผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ปริมาณความเข้มข้น 0-3 wt% กับพอลิแลคติกแอซิดแล้วฉีดขึ้นเป็นเส้นพลาสติกผสมด้วยเครื่องฉีดเส้นอย่างง่ายและทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ จากผลการทดลองพบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ปริมาณความเข้มข้น 0-3 wt% และ PLA สามารถฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติกผสมได้ด้วยเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 1.70-1.65 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกผสมลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อปริมาณความเข้มข้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มขึ้น โดยเส้นพลาสติกผสมทั้งหมดนั้นสามารถผ่านการทดสอบการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเส้นพลาสติกผสมทั้งหมดสามารถพิมพ์ออกมาเป็นรูปทรงลูกบาศก์ได้สำเร็จ ดังนั้นงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตเส้นใยพลาสติกผสมได้จากไฮดรอกซีอะพาไทต์และพอลิแลคติกแอซิดด้วยเครื่องฉีดเส้นอย่างง่ายได้

คำสำคัญ : เครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย เครื่องพิมพ์ 3 มิติ พอลิแลคติกแอซิด เส้นพลาสติกผสม ไฮดรอกซีอะพาไทต์

Abstract

The purpose of this research is to facilitate the composite filament that consists of polylactic acid (PLA) and hydroxyapatite. The eggshell and seabass scale from food waste production as a precursor were used to synthesize the hydroxyapatite. The hydroxyapatite from eggshell was synthesized by the precipitate method while the seabass scale was synthesized by the heat treatment method. Hydroxyapatites were investigated in the crystal structure and chemical functional group by X-ray diffractometer (XRD) and Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), respectively. The XRD results showed that the hydroxyapatite has a calcium phosphate phase with a hexagonal structure. The crystallinity of the hydroxyapatite from seabass scale is higher than of hydroxyapatite from eggshell. The FTIR results showed that the chemical functional group indicated the calcium phosphate of hydroxyapatite. The facile extruder machine that produces composite filaments was fabricated from a steel pipe, drill bit, heater band and wiper motor. The hydroxyapatite powder with different 0-3 wt% was mixed with the polylactic acid. The mixture was extruded into composite filaments by the facile extruder. The composite filaments were measured in diameter using a vernier caliper. The results showed that 0-3 wt% of hydroxyapatite and polylactic acid can produce composite filaments with a facile extruder. All composite filament diameters have a range of 1.70-1.65 mm. The diameter of composite filaments shows a no significant decrease with increasing concentrations of hydroxyapatite. All composite filaments were tested for printability by a commercial 3D printer. The results showed that all composite filaments have successfully printed the cubic shape. This research indicated that composite filaments can be produced from hydroxyapatite and polylactic acid with a facile extruder.

Keyword: Composite filament, Facile extruder machine, Polylactic acid, Hydroxyapatite, 3D Printer

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การพิมพ์สามมิติ (3D printing) เป็นเทคโนโลยีที่น่าจับตามองในปัจจุบัน ซึ่งเป็นการสร้างวัตถุสามมิติหรือการสร้างแบบจำลองต้นแบบในกิจกรรมต่าง ๆ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจะสร้างโครงสร้างที่เป็นสามมิติจากไฟล์ที่ออกแบบโดยซอฟต์แวร์การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์หรือแคด (Computer aided design/CAD) [1, 2] และมีความสามารถในการสร้างชิ้นงานที่ตรงตามลักษณะงานอย่างเฉพาะเจาะจง และมีความแม่นยำสูงในการขึ้นรูป ซึ่งเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน อาทิ การสร้างวัตถุสามมิติ และการผลิตแบบจำลองต้นแบบ รวมถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์สำหรับใช้พิมพ์แบบจำลองอวัยวะของผู้ป่วยเพื่อวางแผนการรักษา การสร้างกระดูกเทียม และอวัยวะเทียมเฉพาะรายที่มีความสมจริงสำหรับการทำศัลยกรรมตกแต่งให้เหมาะสมกับผู้ป่วย โดยการรักษาผู้ป่วยด้วยอวัยวะเทียมจำเป็นต้องนำเข้าวัสดุเทียมจากต่างประเทศส่วนใหญ่มักทำจากโลหะ ซึ่งมีข้อดีคือแข็งแรง ทนทาน และรองรับน้ำหนักได้ดี แต่ก็มีข้อจำกัดคือมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพต่ำ ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นในทางการแพทย์จึงมีความพยายามปรับเปลี่ยนไปใช้วัสดุอื่นทดแทนการใช้โลหะ โดยพลาสติกเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง โดยเฉพาะพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น ทำให้สามารถเกิดการย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ (Biodegradable) [3] โดยพลาสติกชีวภาพที่นิยมใช้งานในเชิงพาณิชย์ คือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สลายตัวได้ (Compostable polymer) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้จากทรัพยากรที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ทำให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) สามารถนำมาขึ้นรูป (Processability) หรือทำการแปรรูปได้ง่ายเพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) [4] ดังนั้นเพื่อตอบสนองต่อโจทย์ทางการแพทย์ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจึงมีการใช้พลาสติกชีวภาพดังกล่าวทดแทนการใช้โลหะในการขึ้นรูปวัสดุที่มีความจำเพาะเจาะจงในการรักษาทางการแพทย์มากยิ่งขึ้น ซึ่งพลาสติกชีวภาพที่เข้ากับเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติยังขาดสมบัติที่จำเป็นในการใช้เป็นวัสดุทดแทน โดยเฉพาะสมบัติการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactivity) อย่างไรก็ตามการพัฒนาและผลิตเส้นพลาสติกผสมสารเติมแต่งที่มีสมบัติเฉพาะสำหรับการใช้งานในเครื่องพิมพ์สามมิติยังคงเป็นกระบวนการที่ไม่ได้มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากต้องอาศัยขั้นตอนการผลิตขึ้นรูปเส้นพลาสติก ซึ่งเริ่มจากการ

ใส่เม็ดพลาสติกเข้าสู่เครื่องฉีดขึ้นรูป จากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกทำให้เกิดการหลอมเหลวภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนถูกฉีดออกมาเป็นเส้นพลาสติกที่มีขนาดสม่ำเสมอ กระบวนการดังกล่าวสามารถผสมสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางชีวภาพของเส้นพลาสติกได้ ทั้งนี้เพื่อลดข้อจำกัดด้านเครื่องมือและต้นทุนจึงมีแนวคิดในการสร้างเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายที่สามารถประกอบได้จากอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานและสามารถหาได้ทั่วไปภายในครัวเรือน เพื่อใช้เป็นต้นแบบสำหรับการผลิตเส้นพลาสติกผสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาเส้นพลาสติกผสม (Composite filament) สารเติมแต่งไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ ด้วยวิธีการสังเคราะห์ทางเคมีและไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากระพงด้วยวิธีการทางความร้อน โดยการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย และเส้นพลาสติกผสมสามารถนำมาขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีสามมิติเพื่อสร้างเป็นวัสดุทดแทนสำหรับประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านศัลยกรรมกระดูกและข้อ (Orthopedic) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการศึกษาการออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายสำหรับการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติก จากนั้นจะทำการศึกษาการขึ้นรูปเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด พร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเติมสารเติมแต่งในเส้นพลาสติกชีวภาพ ตลอดจนศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สำหรับการประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากระพงขาว
2. เพื่อศึกษาการออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย
3. เพื่อศึกษาการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมจากพอลิแลคติกแอซิดและใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นสารเติมแต่ง
4. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้เปลือกไข่ไก่เป็นสารตั้งต้น
2. ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการทางความร้อน โดยใช้เกล็ดปลากระพงขาวเป็นสารตั้งต้น
3. การออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายให้เหมาะสมกับเม็ดพลาสติกแต่ละชนิดจากวัสดุและอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานและหาได้ทั่วไป
4. การสังเคราะห์เส้นพลาสติกผสมจะใช้เม็ดพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) เป็นสารตั้งต้นในการฉีดเป็นเส้นพลาสติก
5. อัตราส่วนในการเติมสารเติมแต่งลงในเส้นพลาสติกผสมจะปรับเปลี่ยนในช่วง 0-3 wt% ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสม
6. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ เป็นเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นพลาสติกผสมที่สังเคราะห์ได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมและการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากระพงขาว

สำหรับการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่นั้นจะเริ่มจากการนำเปลือกไข่ไก่ไปแช่น้ำเพื่อลอกเยื่อออกและล้างทำความสะอาดแล้วนำไปตากแดดให้แห้งประมาณ 24 h จากนั้นนำเปลือกไข่ที่แห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยครกอาเกตและร่อนผ่านตะแกรกร่อนสารให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 150 μm โดยเปลือกไข่ไก่ที่บดแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min เป็นเวลา 4 h ได้เป็นแคลเซียมออกไซด์ต่อมานำแคลเซียมออกไซด์ไปทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีจนได้เป็นตะกอนไฮดรอกซีอะพาไทต์ แล้วอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 h หลังจากนั้นนำตะกอนที่อบแล้วไปทำการบดให้เป็นผงละเอียดด้วยครกอาเกตและร่อนผ่านตะแกรกร่อนสารให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 150 μm

สำหรับการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากระพงขาวนั้นจะเริ่มจากการนำเกล็ดปลากระพงขาวแช่น้ำเป็นเวลา 24 h และล้างทำความสะอาดเพื่อกำจัดเนื้อเยื่อและสิ่งสกปรกที่ติดมากับเกล็ดปลากระพงขาวด้วย จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งโดยใช้เวลาประมาณ 10 h ต่อมานำเกล็ดปลากระพงขาวต้มในน้ำอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 1 h แล้วล้างทำความสะอาดและต้มในน้ำอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 1 h อีกครั้งเพื่อกำจัดคอลลาเจน จากนั้นนำไปตากแดดให้แห้งเป็นระยะเวลา 10 h โดยเกล็ดปลากระพงขาวที่ตากแดดแล้วจะนำไปอบที่ความร้อนอุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 24 h ซึ่งเกล็ดปลากระพงขาวที่ผ่านการอบจะนำไปบดให้เป็นผงละเอียด

ด้วยครกอาเกตและร่อนผ่านตะแกรงร่อนสารให้มีขนาดอนุภาคประมาณ 150 μm และจะนำเกล็ดปลากะพงขาวปริมาณ 100 g เฝ้าที่อุณหภูมิ 900 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 °C/min

ศึกษาลักษณะเฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาว

สำหรับการศึกษาลักษณะเฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาวจะเริ่มจากการศึกษาโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาวทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser ที่ใช้ความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 10 mA และความเร็วในการนับวัด 0.02 °/s จากนั้นจะทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาว ด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform Infrared Analysis; FTIR) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum Two ในช่วงความยาวคลื่น 4000-500 cm^{-1}

การฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

สำหรับการออกแบบเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายที่ใช้เม็ดพลาสติกในการฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติกผสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยการหลอมเม็ดพลาสติกและใช้สกรูดึงพลาสติก (Screw conveyor) ผ่านหัวฉีด (Extruder) ให้ออกมาเป็นเส้นพลาสติก ซึ่งใช้ท่อเหล็กขนาด 1/2 inch ยาว 30 mm เป็นท่อลำเลียงเม็ดพลาสติกไปที่หัวฉีดด้วยดอกสว่านเจาะไม้ขนาด 5/8 inch โดยทำหน้าที่เป็นสกรูดึงเม็ดพลาสติก สกรูดึงเม็ดพลาสติกนั้นขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ปั้มน้ำฝน (Wiper motor) จากระยนต์ เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V 30 W ที่ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตชิงพาวเวอร์ซัพพลาย (Switching power supply) ขนาด 12 V 10 A รุ่น C-120-12 ซึ่งทำหน้าที่เป็นหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ฮีตเตอร์รัดท่อ (Heater band) ขนาด 220 V 250 W เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ยาว 30 mm เพื่อใช้ในการหลอมเม็ดพลาสติก และใช้ชุด PID Temperature controller รุ่น REX-C100 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ และหัวฉีดจะเป็นฝาคอของเหล็กรัดท่อน 1/2 นิ้ว เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 mm โดยมีมอเตอร์ปั้มน้ำฝนที่เป็นตัวขับเคลื่อนสกรูดึงเม็ดพลาสติกถูกควบคุมผ่านแผงวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor speed controller) ขนาด 30 A

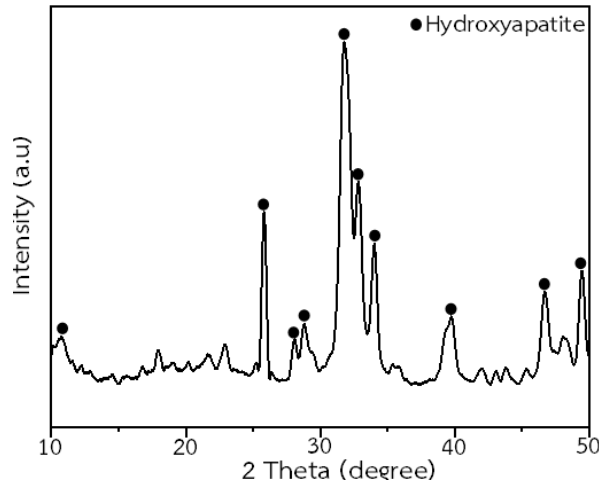
สำหรับการศึกษาการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมที่เติมสารเติมแต่งไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากะพงขาวนั้น จะเริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด 100 g ผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ 0, 1, 2 และ 3 wt% แล้วฉีดเป็นเส้นพลาสติกผสม จากนั้นเปลี่ยนไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวที่ 0, 1, 2 และ 3 wt% แล้วฉีดเป็นเส้นพลาสติกผสม จากนั้นนำเส้นพลาสติกผสมทั้ง 2 แบบ มาทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและศึกษารูปร่างและลักษณะของเส้นพลาสติกผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง (Optical Microscopy; OM) พร้อมทั้งศึกษาการขึ้นรูปทรงลูกบาศก์ (Cubic) ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ยี่ห้อ Artillery รุ่น Hornet โดยกำหนดขนาดของรูปทรงลูกบาศก์เป็น 10.00 × 10.00 × 10.00 mm

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาไฮดรอกซีอะพาไทต์

ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และเกล็ดปลากระพงขาว

สำหรับการศึกษาโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งจะศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุม 10 ถึง 50° ซึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่

จากรูปที่ 1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไฮดรอกซีอะพาไทต์ปรากฏที่มุมการเลี้ยวเบนในช่วง 25.87, 31.98, 39.81, 46.71 และ 49.46° สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐานอ้างอิง (Joint committee on powder diffraction standards; JCPDS) หมายเลข 09-0432 [5] บ่งบอกว่าเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) และสามารถคำนวณหาขนาดผลึกได้จากสมการเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) ดังสมการที่ 1 [6]

$$L = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

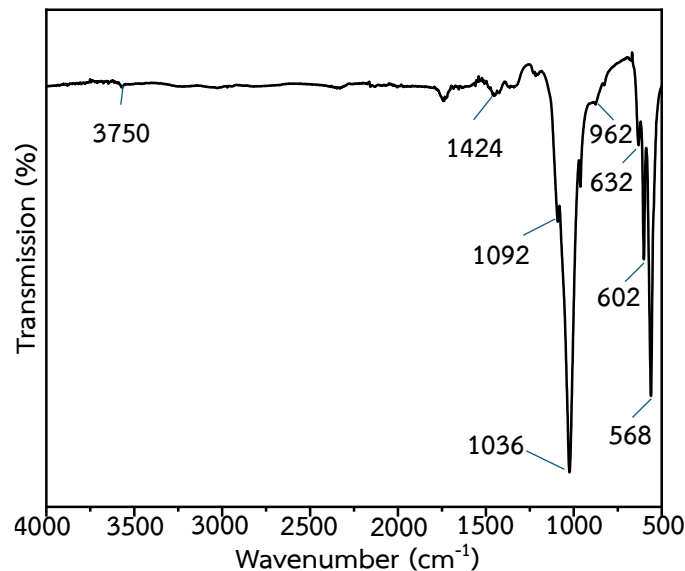
เมื่อ L คือ ขนาดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Å)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.5418 Å)

β คือ ความกว้างที่ความสูงครึ่งหนึ่งของตำแหน่งพีคสูงสุด (Full width half maximum; FWHM)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

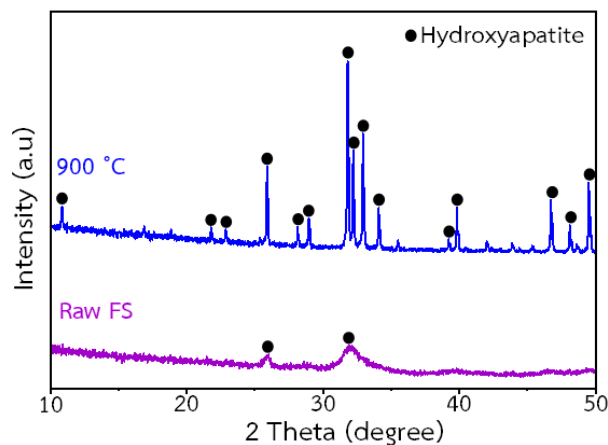
ซึ่งขนาดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีขนาดเท่ากับ 20.66 nm จากนั้นศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยแสงอินฟราเรด (FTIR) ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่

จากรูปที่ 2 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์มีอยู่เลขคลื่นในช่วง 3750 และ 632 cm^{-1} เป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซิล (OH^-) ต่อมาที่เลขคลื่นในช่วง 1424 cm^{-1} จะเห็นได้ว่าเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอเนต (CO_3) และเมื่อพิจารณาเลขคลื่นในช่วง 1092, 1036, 962, 602 และ 568 cm^{-1} จะเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟส (PO_4^{3-}) [7, 8]

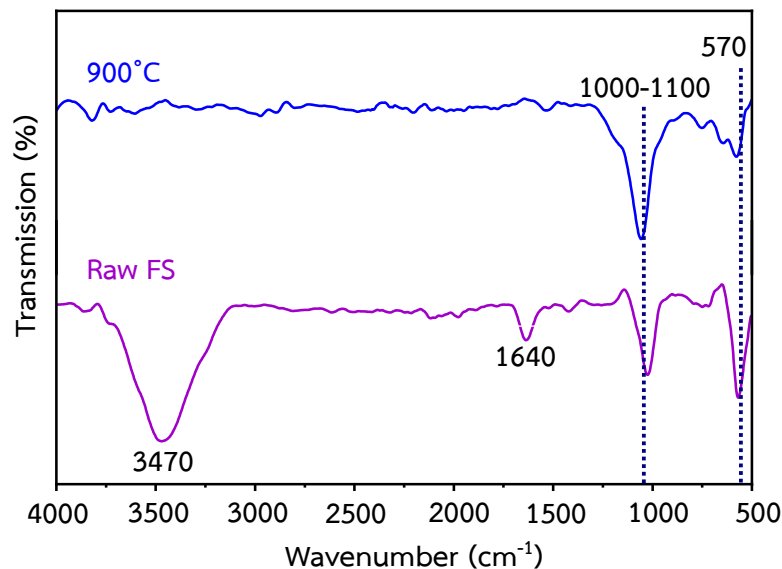
สำหรับการศึกษาโครงสร้างผลึกของเกล็ดปลากะพงขาวทั้งก่อนและหลังเผาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่มุม 10 ถึง 50° ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังการเผา

จากรูปที่ 3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผา พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนเผามีพีคที่กว้างปรากฏที่มุม 26.03 และ 31.92° ซึ่งพีคที่มีลักษณะกว้างนั้นจะเป็นพีคที่มีความเป็นผลึกต่ำ [9, 10] เมื่อทำการเผาเกล็ดปลากะพงขาวที่อุณหภูมิ 900 °C รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะที่แคบและสูง ซึ่งพีคปรากฏที่มุม 11.75, 20.95, 23.35, 26.01, 28.12, 28.96, 31.91, 32.19, 32.09, 35.48, 39.60, 40.02, 46.71, 48.10 และ 49.46° สอดคล้องกับข้อมูลมาตรฐานอ้างอิง (JCPDS) หมายเลข 09-0432 ที่แสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ซึ่งจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผานั้นจะเห็นได้ว่าเกล็ดปลากะพงขาวก่อนเผามีโครงสร้างผลึกที่สอดคล้องกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เป็นรูปแบบเบื้องต้น หลังจากนั้นเมื่อเผาเกล็ดปลากะพงขาวที่อุณหภูมิ 900 °C พบว่าเกล็ดปลากะพงขาวมีความเป็นผลึกสูงขึ้นและขนาดผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผาที่คำนวณจากสมการที่ 1 แสดงให้เห็นว่าขนาดผลึกของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผา

เป็น 15.88 และ 203.16 nm ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวจะมีความเป็นผลึกสูงขึ้นเมื่อผ่านการเผา เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์จำพวกเจลาติน โปรตีน และคอลลาเจนที่เป็นส่วนประกอบของเกล็ดปลากะพงขาวนั้น จะถูกกำจัดออกได้ด้วยการเผา อีกทั้งไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังการเผาจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึก [11, 12] หลังจากนั้น นำเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผาไปศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยแสงอินฟราเรด (FTIR) ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 4



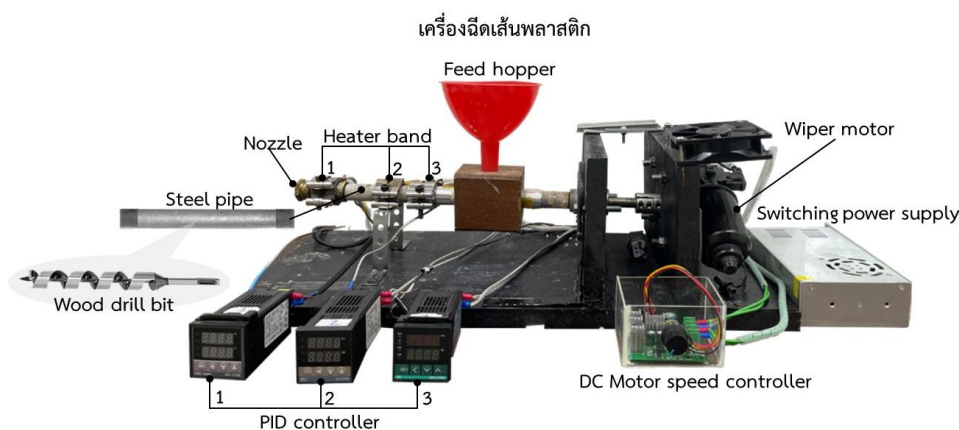
รูปที่ 4 สเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผา

จากรูปที่ 4 แสดงเส้นสเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังเผา พบว่าเกล็ดปลากะพงขาวก่อนเผาจะมีเลขคลื่น 3470 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Stretching ของหมู่ N-H (Amide A) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโปรตีนที่ยังคงเหลือในเกล็ดปลากะพงขาว และเลขคลื่น 1640 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Stretching ของหมู่ C=O (Amide I) เป็นการบ่งบอกถึงว่ายังคงมีคอลลาเจนและเจลาตินคงเหลืออยู่ในเกล็ดปลากะพงขาว ในช่วงเลขคลื่น 1000-1100 cm^{-1} และ 570 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ Asymmetric stretching ของหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ต่อมาเมื่อทำการเผาเกล็ดปลากะพงขาวที่อุณหภูมิ 900 °C ไม่พบสเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดของหมู่ Amide A และ Amide I เกิดจากการสลายสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นโปรตีนและคอลลาเจนอย่างสมบูรณ์ และลักษณะสเปกตรัมการส่งผ่านแสงอินฟราเรดน้อยลงในช่วงเลขคลื่น 1000-1100 cm^{-1} และเลขคลื่น 570 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ที่บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกล็ดปลากะพงขาวก่อนและหลังการเผามีช่วงเลขคลื่นเป็นหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเกล็ดปลากะพงขาว [12, 13]

3.2 ผลการศึกษาการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

การออกแบบและพัฒนาเครื่องฉีดเส้นพลาสติก

สำหรับการพัฒนาเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมที่สามารถใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้น จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องฉีดเส้นพลาสติกจากวัสดุและอุปกรณ์ที่ผ่านการใช้งานและหาได้ทั่วไป โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเครื่องฉีดเส้นพลาสติกและส่วนที่เป็นชุดเก็บเส้นพลาสติก ซึ่งส่วนประกอบและรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 5



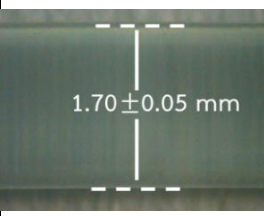
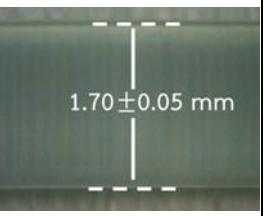
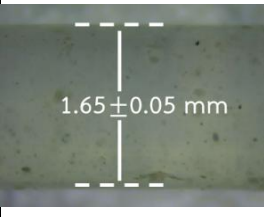
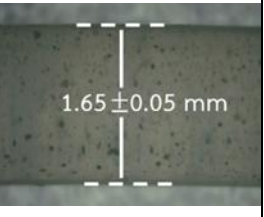
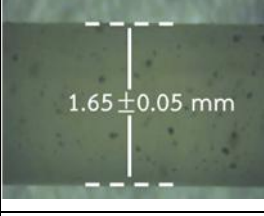
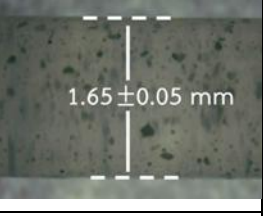
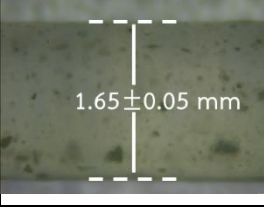
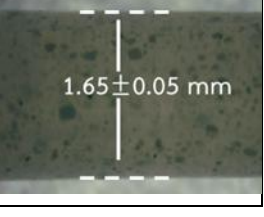
รูปที่ 5 เครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย

จากรูปที่ 5 แสดงเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นท่อลำเลียงเม็ดพลาสติกที่เป็นท่อเหล็กกลวง (Steel pipe) ภายในท่อลำเลียงจะมีดอกสว่าน (Drill bit) ซึ่งเกลียวของดอกสว่านจะทำหน้าที่ลำเลียงเม็ดพลาสติกภายในท่อเหล็กกลวงที่หุ้มด้วยฮีตเตอร์รัดท่อ (Heater band) จำนวน 3 ตัว เมื่อเม็ดพลาสติกได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์รัดท่อ จะเกิดการหลอมละลายและถูกลำเลียงผ่านหัวฉีด (Nozzle) เป็นเส้นพลาสติก ซึ่งดอกสว่านจะถูกเชื่อมต่อกับมอเตอร์ปั้มน้ำฝน (Wiper motor) สำหรับส่วนที่ 2 จะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์จะประกอบด้วย 2 ชุด คือ ชุดควบคุมอุณหภูมิ (PID temperature controller) และ ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (DC motor speed controller) โดยชุดควบคุมอุณหภูมิจะใช้กับฮีตเตอร์รัดท่อทั้ง 3 ตัว เพื่อทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิให้เหมาะสมสำหรับการฉีดเส้นพลาสติกแต่ละชนิดได้ ในขณะที่ชุดควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์จะถูกต่อเข้ากับมอเตอร์ปั้มน้ำฝน เพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วให้เหมาะสมในการลำเลียงเม็ดพลาสติก โดยเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายจะใช้วัสดุอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย โดยใช้ไม้หนา 3 ขนาดความหนา 1 inch ที่เหลือทิ้งตามครัวเรือน สำหรับใช้เป็นฐานวางและเป็นส่วนยึดมอเตอร์ปั้มน้ำฝนกับท่อเหล็กกลวง โดยเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายมีลักษณะที่ไม่มีความซับซ้อน และสามารถสร้างได้ง่าย ซึ่งจะนำเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายมาทำการศึกษาศึกษาการฉีดเส้นพลาสติกผสมในหัวข้อต่อไป

ผลการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสม

สำหรับการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้น จะต้องมีความขนาดและลักษณะของเส้นพลาสติกที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยในการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ได้แก่ อุณหภูมิของท่อลำเลียง โดยอุณหภูมิจะส่งผลกับพลาสติกที่ผ่านการหลอม จะมีลักษณะการเย็นตัวช้าหลังจากออกจากหัวฉีด ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์รัดท่อแต่ละตัว โดยที่อุณหภูมิตัวที่ 1 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 170 °C อุณหภูมิตัวที่ 2 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 190 °C และอุณหภูมิตัวที่ 3 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 200 °C ที่ความเร็วของมอเตอร์ลำเลียงพลาสติกคงที่ โดยมีความเร็วของมอเตอร์อยู่ที่ 11.0 rpm ต่อมาทำการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ 0, 1, 2 และ 3 wt% และปรับเปลี่ยนไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่เป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวที่ 0, 1, 2 และ 3 wt% จากนั้นนำเส้นพลาสติกผสมทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นพลาสติกด้วยกล้องจุลทรรศน์เชิงแสง และทำการวัดขนาดของเส้นพลาสติกผสมด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ซึ่งมีรายละเอียดผลการทดลองดังตารางที่ 1

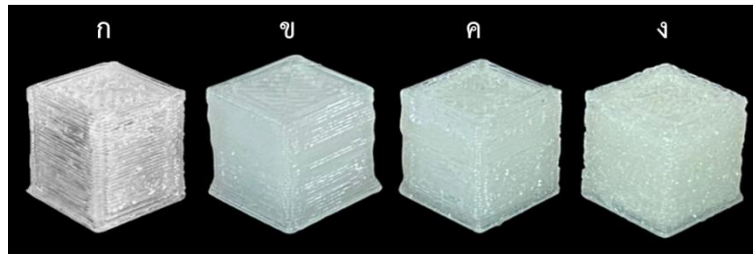
ตารางที่ 1 แสดงเส้นพลาสติกผสมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

ความเข้มข้น (wt%)	ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่		ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาว	
	เส้นพลาสติกผสม	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นพลาสติกผสม (mm)	เส้นพลาสติกผสม	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นพลาสติกผสม (mm)
0		 $1.70 \pm 0.05 \text{ mm}$		 $1.70 \pm 0.05 \text{ mm}$
1		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$
2		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$
3		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$		 $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$

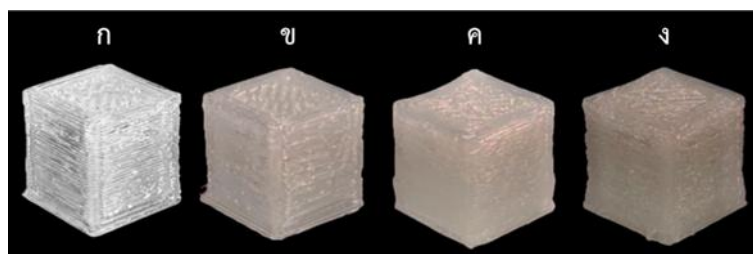
จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันและเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกันสามารถฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติกได้ทุกปริมาณความเข้มข้นด้วยเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่าย โดยเส้นพลาสติกผสมจะถูกม้วนเก็บเป็นขดดังรูปในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นพลาสติกที่ผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้ง 2 ชนิด ที่ปริมาณความเข้มข้นที่ 0 wt% จะเป็นการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่มีการผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ พบว่าลักษณะเส้นพลาสติกมีความใส และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากันที่ $1.70 \pm 0.05 \text{ mm}$ ซึ่งเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกมาตรฐานสำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ [14] ต่อมาเมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณความเข้มข้น 1, 2 และ 3 wt% พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากันที่ $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$ และมีการกระจายตัวของไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปทั่วบริเวณและมีความขาวขุ่นมากขึ้นตามปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกที่ผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวที่ปริมาณความเข้มข้นที่ 1, 2 และ 3 wt% พบว่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากันที่ $1.65 \pm 0.05 \text{ mm}$ โดยลักษณะของเส้นพลาสติกจะมีไฮดรอกซีอะพาไทต์กระจายทั่วบริเวณและมีสีเข้มมากขึ้นภายในเส้นพลาสติกตามปริมาณของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย เนื่องจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณของพลาสติกที่ถูกหลอมและเมื่อผ่านหัวฉีดเส้นพลาสติกเกิดการเย็นตัวช้า ซึ่งบริเวณที่มีไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเกิดการเย็นตัวก่อน ทำให้บริเวณที่ไม่มีไฮดรอกซีอะพาไทต์จะเกิดการเย็นตัวช้าและยืดตัวออกเล็กน้อย [15] จากนั้นนำไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากะพงขาวหลังเฝ้าทำการศึกษาการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ผลการขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสม

จากผลการทดลองการฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่และไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากระพงหลังการเผา โดยนำเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้ง 2 ชนิด มาทำการศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยทำการพิมพ์เป็นรูปทรงอย่างง่าย ได้แก่ รูปทรงลูกบาศก์ (Cubic) [16] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ



รูปที่ 6 ลักษณะของรูปทรงลูกบาศก์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน ก) 0 ข) 1 ค) 2 และ ง) 3 wt%



รูปที่ 7 ลักษณะของรูปทรงลูกบาศก์ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากระพงขาวหลังการเผาที่ปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน ก) 0 ข) 1 ค) 2 และ ง) 3 wt%

จากรูปที่ 6 ก) และ รูปที่ 7 ก) จะเห็นได้ว่ารูปทรงลูกบาศก์ที่ขึ้นรูปด้วยเส้นพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่มีการเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์พบว่ามีความใส ซึ่งเป็นสีของพลาสติกชนิดพอลิแลคติกแอซิดและขึ้นรูปได้สมบูรณ์ เมื่อพิจารณารูปที่ 6 ข) - ง) รูปทรงลูกบาศก์ที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเปลือกไข่ไก่ที่ปริมาณความเข้มข้น 1, 2 และ 3 wt% พบว่าสามารถขึ้นรูปได้อย่างสมบูรณ์และมีสีขาวขุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และเมื่อพิจารณารูปที่ 7 ข) - ง) รูปทรงลูกบาศก์ที่ขึ้นรูปจากเส้นพลาสติกผสมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากเกล็ดปลากระพงขาวหลังการเผาที่ปริมาณความเข้มข้น 1, 2 และ 3 wt% สามารถขึ้นรูปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสีของรูปทรงลูกบาศก์มีความเข้มมากขึ้นโดยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้จาก 2 วิธี คือ การสังเคราะห์จากเปลือกไข่ไก่ด้วยวิธีตกตะกอนทางเคมี และการสังเคราะห์จากเกล็ดปลากระพงขาวด้วยวิธีการทางความร้อน ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้ทั้ง 2 วิธี มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล และไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากเกล็ดปลากระพงขาวหลังการเผานั้นมีความเป็นผลึกมากกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์ได้จากเปลือกไข่ไก่ สำหรับเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายนั้นถูกออกแบบและสร้างขึ้นจากการนำมอเตอร์ปั้มน้ำฝรยยนต์มาต่อกับดอกสว่านที่ครอบด้วยท่อเหล็กและหุ้มด้วยฮีตเตอร์รัดท่อเพื่อหลอมเม็ดพลาสติกและฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติก เครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายนี้ได้ทดสอบการขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมที่ใช้เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ปริมาณความเข้มข้น 0 - 3 wt% ซึ่งเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายที่สร้างขึ้นสามารถฉีดขึ้นรูปเส้นพลาสติกผสมได้สำเร็จ และเส้นพลาสติกผสมสามารถผ่านการทดสอบการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในเชิงพาณิชย์ได้ ดังนั้นจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถสังเคราะห์เส้นพลาสติกผสมจากเครื่องฉีดเส้นพลาสติกอย่างง่ายที่สร้างขึ้นเองได้ อีกทั้งเส้นพลาสติกผสมนี้สามารถใช้งานกับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่มีจำหน่ายทั่วไปได้

5. ข้อเสนอแนะ

1. ในการฉีดเส้นพลาสติกต้องควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของพลาสติก
2. ในการฉีดเส้นพลาสติกผสมควรมีปริมาณวัสดุเติมแต่งที่เหมาะสมเพื่อลดการอุดตันของท่อหลักและหัวฉีดเส้นพลาสติก
3. ในการเก็บรักษาเส้นพลาสติกหลังจากการฉีดเส้นพลาสติกควรเก็บไว้ในถุงซิปล็อคเพื่อไม่ให้เส้นพลาสติกสัมผัสกับอากาศและความชื้น ซึ่งจะช่วยให้ยืดอายุการใช้งานเส้นพลาสติกได้นานขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย วิทยาศาสตร์และนวัตกรรมแห่งชาติ (สกว.) ปีงบประมาณ 2567 หมายเลขทุน FRB670016/0164 และได้รับการสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจากคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ดุรงค์ฤทธิศรีภาค และ พีรยศ ภูมิศิลปธรรม. (2558). การพิมพ์สามมิติ: เทคโนโลยีเปลี่ยนโลกสุขภาพ, *วารสารไทยเภสัชศาสตร์และวิทยาการสุขภาพ*, 10(4), 199-206.
- [2] จิตรวดี สุขวรรณ. (2562). *การพัฒนาเซรามิกเซอร์โคเนียสำหรับการใช้งานด้านทันตกรรมด้วยการพิมพ์ 3 มิติ* [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาทันตกรรมทั่วไปชั้นสูง]. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [3] Abang, S., Wong, F., Sarbatly, R., Sariau, J., Baini, R. and Besar, N. A. (2023). Bioplastic classifications and innovations in antibacterial, antifungal, and antioxidant applications. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 8(4), 361-387.
- [4] Datta, R. and Henry, M. P. (2006). Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies - a review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81(7), 1119-1129.
- [5] Palanivelu, R. and Kumar, A. R. (2014). Synthesis, characterization, in vitro anti-proliferative and hemolytic activity of hydroxyapatite. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 127, 434-438.
- [6] Zenou, V.Y. and Bakardjieva, S. (2018). Microstructural analysis of undoped and moderately Sc-doped TiO₂ anatase nanoparticles using Scherrer equation and Debye function analysis. *Materials Characterization*, 144, 287-296.
- [7] Muñoz-Sanchez, E. R., Arrieta-Gonzalez, C. D., Quinto-Hernandez, A., Garcia-Hernandez, E., and Porcayo-Calderon, J. (2023). Synthesis of hydroxyapatite from eggshell and its electrochemical characterization as a coating on titanium. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(9), 100204.
- [8] Wu, S. C., Hsu, H. C., Wang, H. F., Liou, S. P., and Ho, W. F. (2023). Synthesis and characterization of nano-hydroxyapatite obtained from eggshell via the hydrothermal process and the precipitation method. *Molecules*, 28(13), 4926.
- [9] Wijayanti, I., Sookchoo, P., Prodpran, T., Mohan, C. O., Aluko, R. E., and Benjakul, S. (2021). Physical and chemical characteristics of Asian sea bass bio-calcium powders as affected by ultrasonication treatment and drying method. *Journal of Food Biochemistry*, 45(4), 13652.
- [10] Safronova, T., Vorobyov, V., Kildeeva, N., Shatalova, T., Toshev, O., Filippov, Y., Dmitrienko, A., Gavlina, O., Chernega, O., Nizhnikova, E., Akhmedov, M., Kukueva, E., and Lyssenko, K. (2022). Inorganic powders prepared from fish scales. *Ceramics*, 5(3), 484-498.
- [11] Wang, H., Qian, M., Zhang, D., Wu, Q., and Zhao, Z. (2023). Ammonia-nitrogen removal by hydroxyapatite prepared from waste fish scale. *Water*, 15(7), 1274.

- [12] Paul S., Pal A., Choudhury A.R., Bodhak S., Balla V.K., Sinha A. and Das M. (2017). Effect of trace elements on the sintering effect of fish scale derived hydroxyapatite and its bioactivity. *Ceramics International*. 43(17), 15678-15684.
- [13] Zainol I., Adenan N.H., Rahim N.A. and Jaafar C.N.A. (2019). Extraction of natural hydroxyapatite from tilapia fish scales using alkaline treatment. *MaterialsToday: Proceedings*, 16(4), 1942-1948.
- [14] Ahmad, M. N., Ishak, M. R., Taha, M. M., Mustapha, F., and Leman, Z. (2023). A Review of Natural Fiber-Based Filaments for 3D Printing: Filament Fabrication and Characterization. *Materials (Basel)*, 16(11), 4052.
- [15] Hamat, S., Ishak, M. R., Sapuan, S. M., Yidris, N., Hussin, M. S., and Abd Manan, M. S. (2023). Influence of filament fabrication parameter on tensile strength and filament size of 3D printing PLA-3D850. *Materials Today: Proceedings*, 74, 457-461.
- [16] Mekhileri, N. V., Lim, K. S., Brown, G. C. J., Mutreja, I., Schon, B. S., Hooper, G. J., and Woodfield, T. B. F. (2018). Automated 3D bioassembly of micro-tissues for biofabrication of hybrid tissue engineered constructs. *Biofabrication*, 10(2), 024103.

การสังเคราะห์แผ่นยางพาราคอมโพสิตด้วยกระบวนการตกตะกอน

โดยใช้กรดและศึกษาผลของการเติมวัสดุเติมแต่ง

Fabrication of Natural Rubber Composites Using Acids for Coagulation Process and
Study the Effects of Filler Additivesสมญา ทันสมัย¹ สุรพัศ พันธุ์สำโรง² พชรินทร์ แนมจันทร์³ แสงกฤษ กลั่นบุศย์⁴
และ กิตติศักดิ์ชัย แนมจันทร์^{5*}^{1, 2, 4, 5*}สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี³สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ¹Email: Somya199@hotmail.com; ²Email: Surapat.psr@hotmail.com; ³Email: rdi@aru.ac.th; ⁴Email: saengkrit.klu@kmutt.ac.th⁵E-mail Address: puri_kit@hotmail.com

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

ยางพาราเป็นวัสดุธรรมชาติที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นและความแข็งแรง ทำให้ถูกนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม ในกระบวนการแปรรูปนิยมใช้ยางแผ่นรมควันเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิต เนื่องจากมีสมบัติในการป้องกันเชื้อราได้ดีและสามารถยืดอายุในการเก็บรักษา อย่างไรก็ตาม การใช้ยางแผ่นรมควันยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุนและกระบวนการที่ซับซ้อน ด้วยเหตุนี้เองการแปรรูปยางจากกระบวนการตกตะกอนด้วยกรดจึงเป็นทางเลือกที่สะดวกและใช้ต้นทุนต่ำสำหรับเกษตรกรที่สามารถนำไปแปรรูปเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ยางคอมโพสิตซึ่งเป็นวัสดุที่ผสมร่วมกับสารเติมแต่งหรือสารเสริมสมบัติเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความทนทาน ความสม่ำเสมอ รวมถึงสมบัติพิเศษอื่น ๆ เพื่อให้วัสดุที่ได้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้านมากขึ้น จากงานวิจัยพบว่าข้อมูลของการใช้กรดเพื่อทำให้ยางเกิดการตกตะกอนยังไม่เป็นที่แน่ชัดในการบ่งชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกรดที่เหมาะสม รวมทั้งชนิดของกรดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและการจับตัวของตัวอย่างพารา งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการตกตะกอนน้ำยางพาราด้วยการเติมกรดต่างชนิดกัน ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดอะซิติก (CH_3COOH) และกรดฟอร์มิก ($HCOOH$) ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า กรดฟอร์มิกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำให้น้ำยางพาราจับตัว โดยให้น้ำหนักก้อนยางสูงสุด 28.75 g เมื่อเปรียบเทียบกับกรดอะซิติกซึ่งให้น้ำหนักก้อนยาง 22.90 g และกรดซัลฟิวริกที่ให้น้ำหนักต่ำที่สุด 22.23 g เนื่องจากเป็นกรดแก่ที่เร่งปฏิกิริยาเร็วส่งผลให้น้ำยางเกิดการตกตะกอนไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งเพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดเป็นยางพาราคอมโพสิตโดยการเติมผงคาร์บอน (Carbon Black) และแบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) ด้วยวิธีการผสมเชิงกล (mechanical mixing) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่นำน้ำยางพาราที่ผ่านการตกตะกอนแล้วไปผสมร่วมกับผงคาร์บอนหรือแบเรียมซัลเฟต ในอัตราส่วนที่ต่างกันเพื่อศึกษาผลต่อการขึ้นรูปแผ่นยางพาราและลักษณะทางกายภาพ พบว่าการเติมผงคาร์บอนส่งผลต่อสีของแผ่นยาง โดยที่เงื่อนไขสูงสุด 90% ทำให้น้ำยางมีสีดำเข้มที่สุด เมื่อทำการศึกษาผลของการเติมแบเรียมซัลเฟตพบว่าที่เงื่อนไข 60% จะได้เนื้อยางที่มีความสามารถในการขึ้นรูปยางได้และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ชนิดของกรดและอัตราส่วนการเติมสารเติมแต่ง มีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพของยางพารา ทั้งในด้านโครงสร้าง ความสม่ำเสมอ และสีของแผ่นยาง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาแผ่นยางคอมโพสิตสำหรับเกษตรกรผู้เพาะปลูก

คำสำคัญ : ยางพารา การตกตะกอนด้วยกรด ยางคอมโพสิต

Abstract

Natural rubber is a crucial material in Thailand's economy due to its outstanding elasticity and strength, which enable its broad applications across various industries. Traditionally, ribbed smoked sheets (RSS) have been the main form of processed rubber because they prevent fungal growth and extend storage life. However, this method involves high production costs and complicated procedures. As an alternative, latex coagulation using acids provides a simpler, low-cost approach for rubber farmers while offering potential for developing natural rubber into composite materials with enhanced properties. This research aimed to investigate the effects of different acids and reinforcing fillers on the coagulation efficiency and physical properties of natural rubber. Three acids sulfuric acid (H_2SO_4), acetic acid (CH_3COOH), and formic acid (HCOOH) were employed under controlled conditions to induce latex coagulation. In addition, carbon black and barium sulfate (BaSO_4) were incorporated at varying ratios to evaluate their influence on the formation, structure, and quality of rubber sheets. The results indicate that formic acid exhibited the highest coagulation efficiency, producing the greatest coagulum weight of 28.75 g, followed by acetic acid at 22.90 g, while sulfuric acid yielded the lowest coagulum weight of 22.23 g, due to its strong acidity which accelerates the reaction too rapidly, leading to incomplete coagulation. For filler addition, carbon black significantly affected the rubber sheet color, with 90% loading producing the darkest shade, whereas barium sulfate at 60% achieved uniform dispersion and improved formability of the rubber matrix. In conclusion, both acid type and filler ratio directly affect the physical properties of natural rubber, particularly its structure, uniformity, and appearance. These findings provide valuable insights for developing natural rubber composites suitable for industrial applications and specialized uses such as radiation shielding materials.

Keyword: Natural rubber, Acid coagulation, Rubber composites

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการพัฒนายาสู่เพื่อรองรับความต้องการของโลกยุคใหม่ ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงประสิทธิภาพเชิงกลเท่านั้น แต่ยังคงต้องตอบโจทย์ในด้านความยั่งยืน และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าอีกด้วย จากแนวโน้มดังกล่าวทำให้วัสดุจากธรรมชาติได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีสมบัติพิเศษ อีกทั้งยังสามารถปรับแต่ง รูปร่างได้อย่างยืดหยุ่นเพื่อเพิ่มมูลค่าได้อีกด้วย ซึ่งในบรรดาวัสดุธรรมชาติ อย่างพารา ถือว่าเป็นวัสดุจากธรรมชาติชาติ มีสมบัติที่โดดเด่น ได้แก่ ความยืดหยุ่นสูง ความแข็งแรง ความสามารถในการคืนรูปได้ดี ความทนทานต่อการสึกหรอ และความสามารถในการปรับปรุงสมบัติผ่านกระบวนการผสมยาง (Compounding) หรือการเติมตัวเติม ได้หลายรูปแบบ [1, 2] นอกจากนี้ยางพารามีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิต ซึ่งช่วยลดต้นทุน เพิ่มสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความทนทาน และเพิ่มสมบัติทางกายภาพ เช่น ความสม่ำเสมอ ความหนาแน่น หรือสมบัติพิเศษตามการใช้งาน เช่น การป้องกันรังสี การดูดซับแรงกระแทก รวมถึงช่วยขยายโอกาสการใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลาย อีกทั้งยางพารายังเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย ด้วยสมบัติเหล่านี้ทำให้ยางพารามีความเหมาะสมในการนำไปเป็นตัวแทนกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิตที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายในด้านอุตสาหกรรม เช่น ยางรถยนต์ ถังมือทางการแพทย์ รองเท้า และยางคอมโพสิต ยิ่งไปกว่านั้นยางพารายังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งช่วยลดมลพิษตกค้างในสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสังเคราะห์ เช่น พลาสติก หรือ ยางสังเคราะห์ ด้วยวัสดุเหล่านี้จำเป็นต้องใช้ต้นทุนสูงในกระบวนการผลิต อีกทั้งใช้พลังงานและสารเคมีเป็นจำนวนมากซึ่งก่อให้เกิดมลพิษและสร้างผลกระทบต่อระบบนิเวศ [1, 3] ด้วยปัจจัยดังกล่าวจึงทำให้ยางพาราถูกนำมาศึกษาและพัฒนาต่อยอดสู่การใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น โดยเฉพาะในด้านวัสดุประยุกต์ชั้นสูง อาทิ วัสดุคอมโพสิต และผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของยางพาราในการตอบโจทย์ความต้องการของอุตสาหกรรมยุคใหม่ และการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างยั่งยืน เมื่อพิจารณาจากกระบวนการขึ้นรูปยางพาราเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเป็นคอมโพสิตที่สามารถทำได้ง่ายและยังเปิดโอกาสในการนำยางที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุคอมโพสิตได้โดยตรง [4] โดยวิธีการขึ้นรูปยางพารามักเป็นวิธีที่นิยมเนื่องจากสามารถลดต้นทุนการตกตะกอน โดยกรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริก ซึ่งมีความสามารถในการลดค่า pH ของน้ำยาง ทำให้อนุภาครวมตัวและแยกออกจากเฟสของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5, 6] แม้ว่ากรดทั้งสามชนิดนี้จะถูกใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในระดับเกษตรกรและระดับอุตสาหกรรม แต่ข้อมูลเกี่ยวกับเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการตกตะกอน รวมถึงผลที่แตกต่างกันของกรดแต่ละชนิดต่อโครงสร้าง ความสม่ำเสมอ และคุณภาพของก้อนยางยังไม่ถูกระบุอย่างชัดเจน จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรศึกษาเพิ่มเติม พบว่าการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการนี้ช่วยให้เกษตรกรสามารถแปรรูปยางได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้กรดเพื่อกระตุ้นการตกตะกอนยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้ปริมาณกรดที่เหมาะสมสำหรับตกตะกอนยางในสภาวะต่าง ๆ ซึ่งปริมาณกรดที่แตกต่างกันนี้สามารถส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและความสม่ำเสมอของเนื้อยาง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาเพื่อหาปริมาณและชนิดของกรดที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนน้ำยาง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและสร้างมาตรฐานสำหรับการแปรรูปยางในระดับชุมชนและอุตสาหกรรม ถึงแม้ว่าการตกตะกอนน้ำยางด้วยกรดจะช่วยให้เกษตรกรสามารถขึ้นรูปยางได้ง่ายและต้นทุนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกลที่ส่งผลต่อความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของเนื้อยาง ดังนั้นกระบวนการปรับปรุงสมบัติของยางพาราให้เหมาะสมกับการใช้งานจึงเป็นส่วนสำคัญ โดยวัสดุหรือสารเติมแต่งที่ถูกนิยมนำมาใช้ในกระบวนการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว คือผงคาร์บอน (Carbon Black) ที่มีส่วนช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานของยางได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การนำแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) มาใช้เป็นสารเติมแต่งยังช่วยเพิ่มสมบัติในการป้องกันรังสีเอกซ์ซึ่งถือเป็นสมบัติที่มีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการแพทย์และอุตสาหกรรม [7] จากข้อมูลงานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของการเติมคาร์บอนและแบเรียมซัลเฟตในยางที่ผ่านการตกตะกอนด้วยการเติมกรดยังมีไม่มากนัก อีกทั้งการเติมวัสดุเติมแต่งเพื่อพัฒนาสมบัติของยางพารายังมีข้อจำกัดในเรื่องของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป เช่น ปริมาณและการกระจายตัวของสารในเนื้อยาง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอและสมบัติของยางที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและเพิ่มศักยภาพในการประยุกต์ใช้ยางคอมโพสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการใช้กรดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริก ต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนน้ำยางพาราดิบและเปรียบเทียบความเข้มข้นที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นยาง
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมผงคาร์บอน (Carbon black) และ แบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ในปริมาณที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพและการขึ้นรูปของแผ่นยางพารา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการใช้กรดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดฟอร์มิก กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริก ในการทำให้น้ำยางพาราเกิดการตกตะกอนเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรดแต่ละชนิดต่อการเกิดก้อนยางพารา นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมแบเรียมซัลเฟต เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งสำหรับการเพิ่มสมบัติการป้องกันรังสีและได้ทำการศึกษาผลของการเติมผงคาร์บอนเพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อสีและลักษณะเนื้อยางธรรมชาติ โดยทำการเปรียบเทียบในสัดส่วนของสารเติมแต่งที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ การศึกษาจะจำกัดอยู่ที่การวิเคราะห์เชิงกระบวนการของการขึ้นรูปและลักษณะทางกายภาพของแผ่นยางพาราที่ได้เท่านั้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการศึกษากระบวนการตกตะกอนและการจับตัวของน้ำยางพาราและศึกษาผลกระทบที่ส่งผลต่อแผ่นยางพาราโดยใช้สารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ เพื่อให้ได้แผ่นยางที่มีความเหมาะสมในการขึ้นรูป การดำเนินงานวิจัยจึงถูกจัดแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนหลัก ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรดในการทำให้น้ำยางพาราตกตะกอน และเกิดการจับตัวไปจนถึงการศึกษาลักษณะของสารเติมผงคาร์บอนและแบเรียมซัลเฟตที่ส่งผลผลกระทบต่อสีและสมบัติของแผ่นยางที่ขึ้นรูป

2.1 การศึกษาผลของการเติมกรดต่อการจับตัวของน้ำยางพารา

สำหรับการศึกษาผลของการเติมกรดต่อการจับตัวของน้ำยางพารา สามารถทำได้จากการแบ่งน้ำยางพารออกเป็นชุดการทดลองหลายชุด จากนั้นทำการเติมกรดชนิดต่าง ๆ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ลงไปในน้ำยาง โดยกำหนดปริมาณของกรดที่เติมให้มีค่าต่างกันได้คือ 2, 4, 6, 8 และ 10 ml เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรดแต่ละชนิดต่อการทำให้น้ำยางพาราตกตะกอน หลังจากเติมกรดแล้วจึงพักน้ำยางเป็นเวลา 10 min เพื่อให้กระบวนการจับตัวของอนุภาคยางเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จากนั้นทำการสังเกตลักษณะของการจับตัวที่เกิดขึ้น รวมทั้งบันทึกปริมาณน้ำหนักของก้อนยางที่ได้ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบถึงความแตกต่างในการตกตะกอนของน้ำยางพาราเมื่อใช้กรดแต่ละชนิดและปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงบทบาทของกรดในกระบวนการทำให้น้ำยางพาราตกตะกอนและสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการเลือกใช้กรดที่เหมาะสมต่อไป

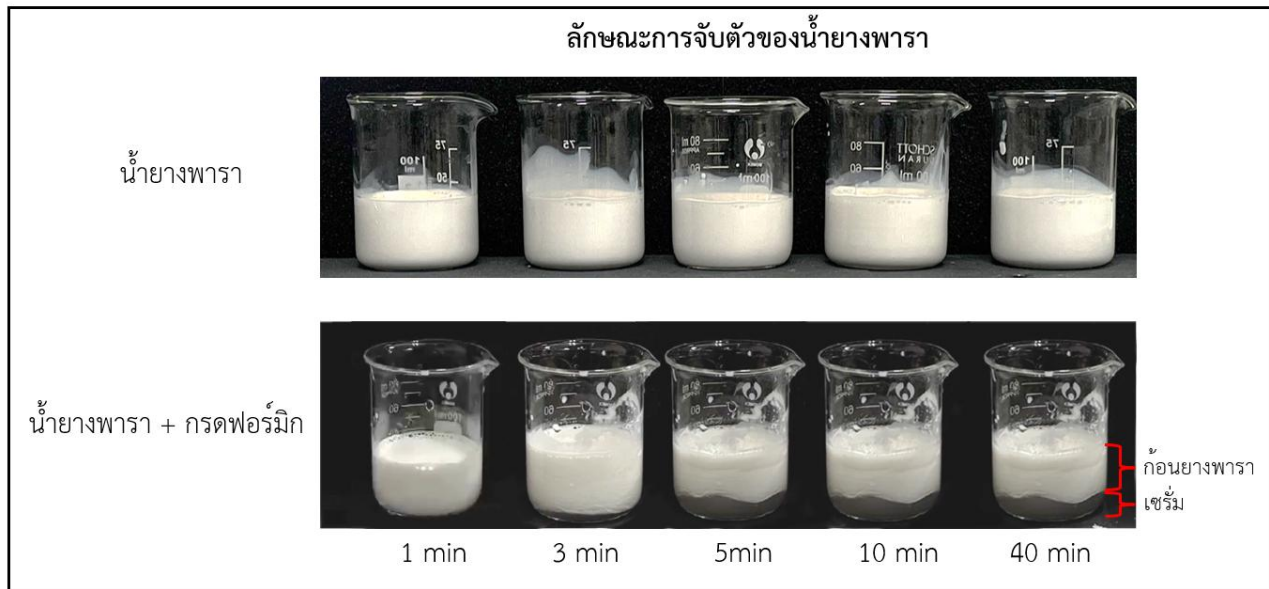
2.2 การศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งลงในแผ่นยางหลังจากขึ้นรูป

ศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งลงในแผ่นยางหลังจากขึ้นรูป ก้อนยางที่ได้จากกระบวนการตกตะกอนจะถูกนำมาผสมกับสารเติมแต่งสองชนิด ได้แก่ ผงคาร์บอนและแบเรียมซัลเฟต โดยผงคาร์บอนจะถูกเติมในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่มีต่อสีของแผ่นยางและลักษณะการขึ้นรูป ขณะที่แบเรียมซัลเฟต จะถูกเติมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง 10–90% โดยน้ำหนัก เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบต่อสมบัติของการขึ้นรูปและคุณภาพของแผ่นยางที่ได้ การศึกษานี้มีเป้าหมายเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างจากการใช้สารเติมแต่งแต่ละชนิด รวมทั้งหาปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสามารถเพิ่มสมบัติของแผ่นยางพาราได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การใช้งานต่อไป

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การศึกษาการจับตัวของน้ำยางพารา

สำหรับการศึกษาการจับตัวของน้ำยางพารานั้นจะเริ่มจากการศึกษาลักษณะน้ำยางพาราปริมาณ 40 ml ก่อนและหลังการเติมกรดฟอร์มิกแล้วพักทิ้งไว้ในระยะเวลาแตกต่างกัน โดยมีลักษณะของน้ำยางพาราก่อนและหลังการเติมกรดแสดงดังรูปที่ 1

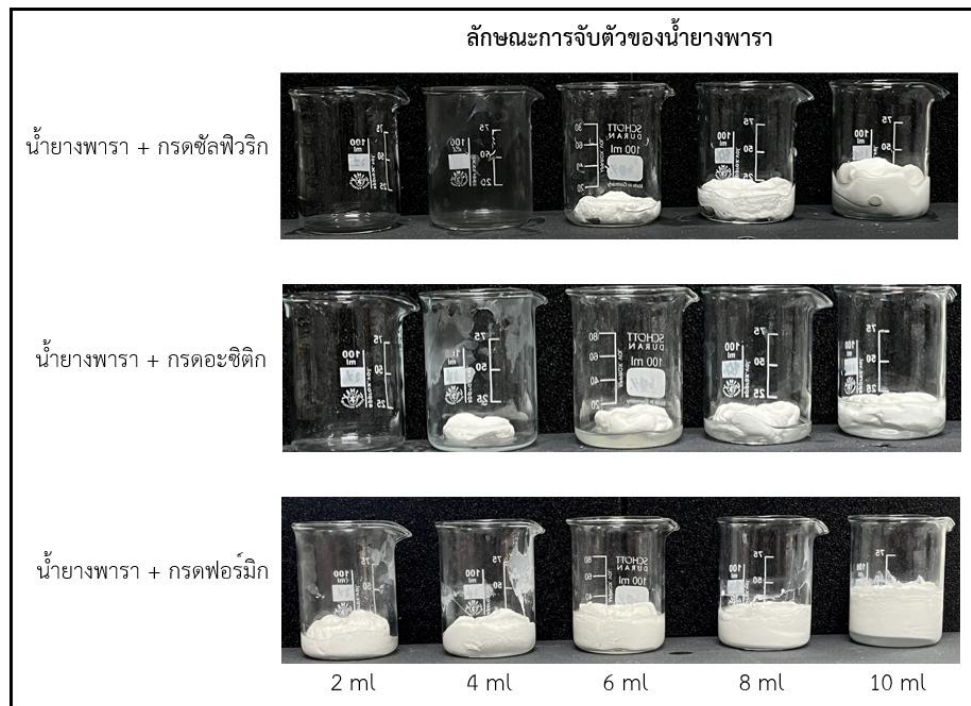


รูปที่ 1 ลักษณะของน้ำยางพาราก่อนและหลังการเติมกรดที่พักทิ้งไว้ในระยะเวลาแตกต่างกัน

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าน้ำยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวคอลลอยด์สีขาวขุ่นในช่วงเวลาเริ่มต้น 1 min และเมื่อปล่อยทิ้งไว้ที่เวลา 3, 5, 10 และ 40 min พบว่าน้ำยางยังคงสภาพเดิม โดยไม่พบการตกตะกอนของน้ำยาง ภายหลังจากการเติมกรดฟอร์มิก (HCOOH) ปริมาณ 2 ml ลงในน้ำยางพาราและพักทิ้งไว้ 1 min พบว่าน้ำยางยังคงเป็นคอลลอยด์เนื้อเดียวกันสีขาวขุ่นเช่นเดิม แต่เมื่อเวลาผ่านไป 3 min สังเกตได้ว่าการเกิดตะกอนของอนุภาคพอลิเมอร์ยาง โดยอนุภาคเริ่มเกิดการรวมตัวเป็นก้อนยางพร้อมกับการแยกชั้นของของเหลว (เซรั่ม) [8] ที่บริเวณด้านล่างของบีกเกอร์ หลังจากเวลาผ่านไป 5 min กระบวนการจับตัวและการแยกชั้นของของเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของก้อนยางที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อสังเกตที่เวลา 10 min และ 40 min พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมอย่างมีนัยสำคัญ โดยน้ำยางพารานั้นจะมีอนุภาคยางที่ถูกห่อหุ้มด้วยโปรตีนหรือสารหุ้มผิวที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคนั้นส่งผลให้อนุภาคยางไม่สามารถจับตัวกันได้ จากนั้นเมื่อเติมกรดลงในน้ำยางพาราจะส่งผลให้โปรตีนหรือสารหุ้มผิวอนุภาคยางนั้นสูญเสียประจุไฟฟ้าทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงจึงก่อให้เกิดการจับตัวของอนุภาคยางเป็นก้อนยางและเกิดของเหลวส่วนเกินที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยในการทดลองต่อไปจะทำการศึกษาชนิดของกรดในปริมาณแตกต่างกันที่ส่งผลต่อการจับตัวของน้ำยางพารา

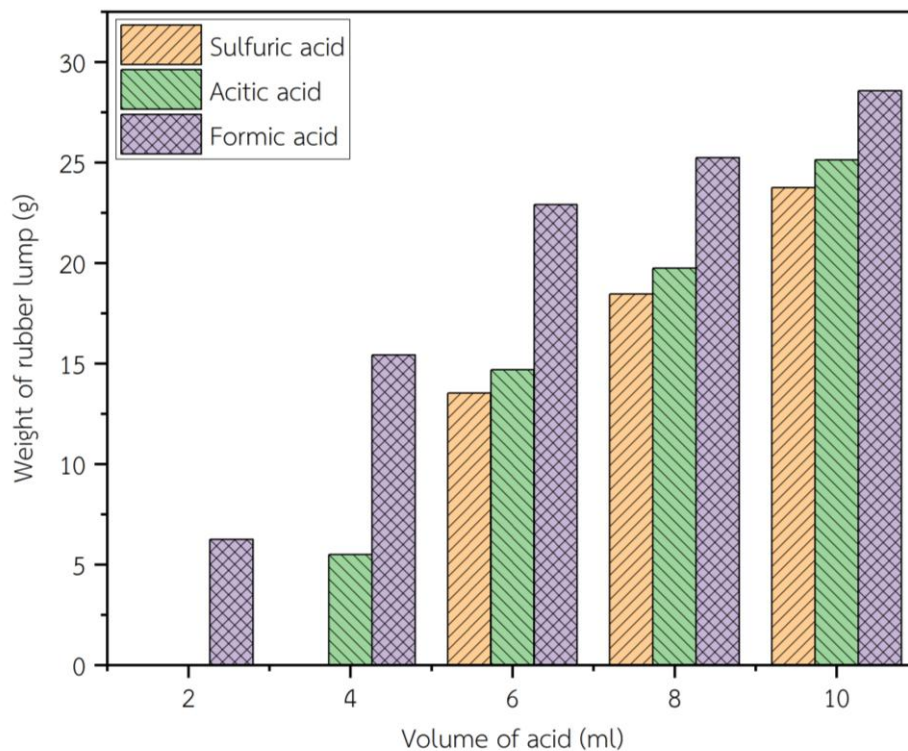
3.2 การศึกษาชนิดของกรดที่ปริมาณแตกต่างกันสำหรับการจับตัวของน้ำยางพารา

การศึกษาการจับตัวของน้ำยางพาราจะเริ่มจากการเติมกรดแต่ละชนิดที่ปริมาณแตกต่างกันลงในน้ำยางพาราแล้วพักทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 10 min เพื่อศึกษาลักษณะการจับตัวของน้ำยางพาราที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของน้ำยางพาราหลังการเติมกรดชนิดแตกต่างกัน

ในการทดลองนี้ ได้ศึกษาการใช้กรดต่างชนิดกันเติมลงในน้ำยางพาราเพื่อให้เกิดการตกตะกอนและการรวมตัวเป็นก้อนยาง ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดอะซิติก (CH_3COOH) และกรดฟอร์มิก (HCOOH) ในปริมาณ 2, 4, 6, 8 และ 10 ml หลังจากนั้นเมื่อทำการเติมกรด น้ำยางแต่ละบีกเกอร์จะถูกพักทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้กระบวนการตกตะกอนและการรวมตัวของอนุภาคยางเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้น น้ำยางที่ไม่ผ่านกระบวนการจับตัวจะถูกแยกออก เพื่อให้เหลือเพียงก้อนยางที่เกิดขึ้นจากการตกตะกอน ดังรูปที่ 2 เริ่มจากการทดลองเติมกรดซัลฟิวริก พบว่าเมื่อเติมในปริมาณ 2 และ 4 ml จะยังไม่เกิดการตกตะกอนของพอลิเมอร์ยาง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเป็น 6 ml พบว่าเกิดการรวมตัวของอนุภาคและเริ่มเกิดก้อนยางสีขาวปรากฏขึ้น หลังจากนั้นทำการเพิ่มปริมาณของกรดเป็น 8 และ 10 ml พบว่าขนาดของก้อนยางมีการเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ ต่อมาได้ทำการทดลองใช้กรดอะซิติกพบว่า เมื่อเติมในปริมาณเริ่มต้น 2 ml จะสังเกตได้ว่าน้ำยางยังไม่เกิดการตกตะกอน แต่เมื่อเพิ่มกรดเป็น 4 ml จะเริ่มสังเกตเห็นก้อนยางสีขาว และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดเป็น 6, 8 และ 10 ml ขนาดของก้อนยางมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของกรดอะซิติกที่สูงขึ้น สำหรับการศึกษาโดยใช้กรดฟอร์มิก ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าแม้ที่ปริมาณเพียง 2 ml ก็สามารถทำให้น้ำยางจับตัวกันเป็นก้อนที่สังเกตได้อย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดเป็น 4, 6, 8 และ 10 ml ขนาดของก้อนยางเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณกรดที่เติม จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการทำให้เกิดการแข็งตัวของน้ำยางพาราแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของกรดที่ใช้ โดยกรดฟอร์มิกมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ กรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริกตามลำดับ ซึ่งจะนำไปสู่การศึกษาน้ำหนักของก้อนยางที่เกิดขึ้นหลังการเติมกรดแต่ละชนิดในปริมาณต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3

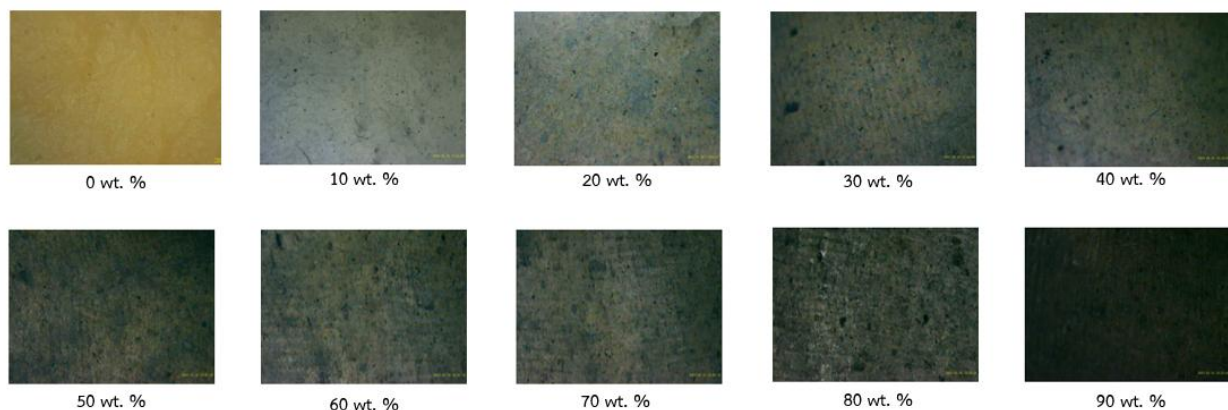


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักก้อนยางและปริมาณของกรดแต่ละชนิด

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของก้อนยางพารา กับปริมาณและชนิดของกรดที่ใช้ในการทำให้ยางจับตัว พบว่าแนวโน้มน้ำหนักของก้อนยางมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดที่เติม 2, 4, 6, 8 และ 10 ml โดยมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้กรดต่างชนิดกัน สำหรับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) พบว่าน้ำหนักก้อนยางมีค่า 0, 0, 10.25, 17.48 และ 22.23 g ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าที่ปริมาณกรดต่ำ 2 และ 4 ml ไม่สามารถทำให้ยางเกิดการรวมตัวจนปรากฏเป็นก้อนอย่างชัดเจน เนื่องจากระบวนการเกิด coagulum ต้องอาศัยการทำให้ประจุลบบนผิวอนุภาคยางให้มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็นกลาง (neutralization) ส่งผลให้แรงผลักไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคลดลง จึงเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคยาง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดจะสังเกตได้ว่าน้ำยางพาราเกิดการตกตะกอนและรวมตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็วซึ่งส่งผลให้น้ำหนักของก้อนยางเพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของการใช้กรดอะซิติก (CH_3COOH) พบว่า น้ำหนักของก้อนยางมีค่า 0, 5.01, 13.21, 19.22 และ 22.90 g ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการจับตัวที่มีประสิทธิภาพมากกว่ากรดซัลฟิวริก นอกจากนี้ได้ทำศึกษาน้ำหนักของก้อนยางเมื่อใช้กรดฟอร์มิก (HCOOH) พบว่าน้ำหนักก้อนยางมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดทั้งสองชนิด โดยมีค่าเริ่มต้นจาก 6.01, 15.14, 22.41, 25.48 และสูงสุดที่ 28.75 g ตามลำดับ สะท้อนถึงประสิทธิภาพในการเร่งการจับตัวของอนุภาคยางที่ดีกว่า จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า กรดฟอร์มิกมีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำให้ยางพาราแข็งตัวและให้ก้อนยางที่มีน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากกรดฟอร์มิกมีสมบัติเป็นกรดอ่อนปานกลางที่สามารถกระตุ้นการรวมตัวของอนุภาคยาง ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่เร่งปฏิกิริยามากเกินไป ทำให้การเกิด coagulum มีความสมบูรณ์ ในขณะที่กรดอะซิติกซึ่งเป็นกรดอ่อน แม้สามารถทำให้เกิดการแข็งตัวของน้ำยางได้ แต่ให้ก้อนยางที่มีน้ำหนักน้อยกว่า ส่วนกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นกรดแก่ (strong acid) มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้การเกิด coagulum ไม่สมบูรณ์และได้ก้อนยางที่มีน้ำหนักต่ำที่สุด [9]

3.3 การศึกษาปริมาณผงคาร์บอนที่แตกต่างกันสำหรับขึ้นรูปแผ่นยาง

จากรายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับยางพารา การเติมผงคาร์บอน (Carbon Black) ลงในเนื้อยางมีส่วนสำคัญในการช่วยเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลของยาง [10] โดยมีข้อจำกัดที่สำคัญคือ การเติมผงคาร์บอนในอัตราสูงเกินไปอาจทำให้การขึ้นรูปแผ่นยางพาราทำได้ยาก เนื่องจากอนุภาคคาร์บอนมีแนวโน้มรวมตัวกันมากขึ้น ส่งผลให้การจับตัวของเนื้อยางไม่สมบูรณ์และอาจลดสมบัติทางกลบางประการของวัสดุ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลของการเติมผงคาร์บอนลงในแผ่นยางพาราที่ถูกขึ้นรูปด้วยกรดฟอร์มิก โดยเน้นการสังเกตลักษณะการกระจายตัวและผลกระทบต่อการขึ้นรูปของเนื้อยาง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4

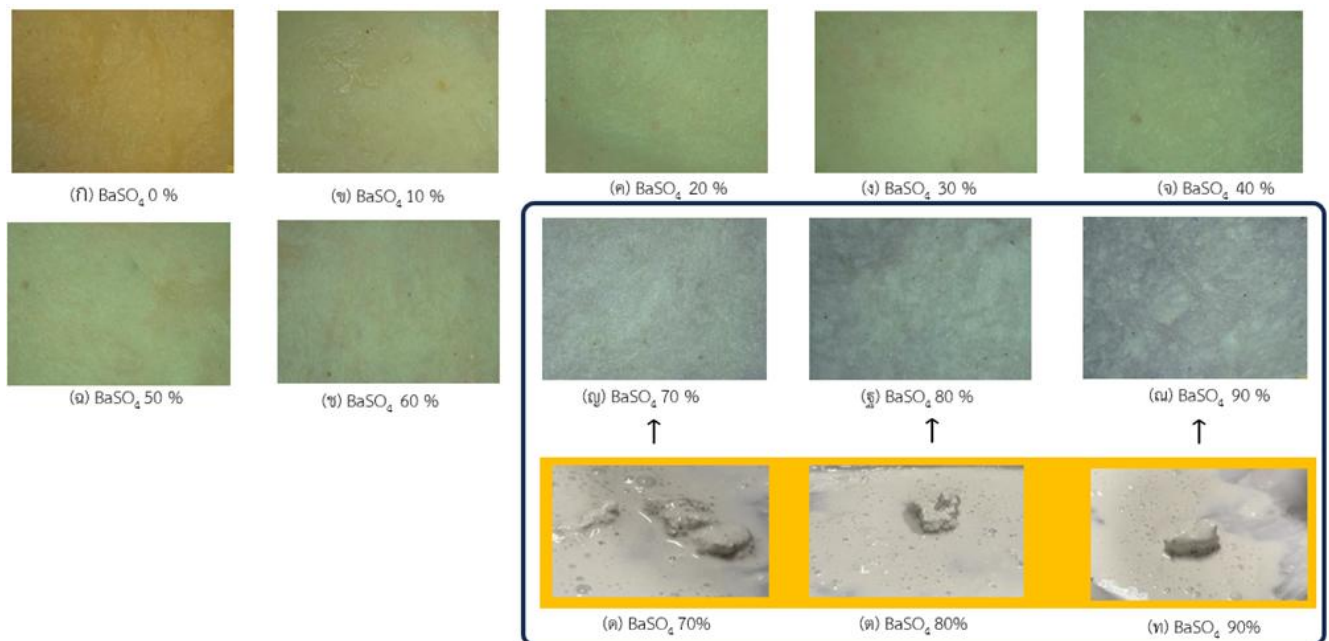


รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางพาราผสมผงคาร์บอนที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4 แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางพาราผสมผงคาร์บอนที่มีปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า สีของแผ่นยางพารามีผลโดยต่อปริมาณของผงคาร์บอนในเนื้อยาง โดยแผ่นยางที่ไม่ได้เติมผงคาร์บอนจะมีสีน้ำตาลเข้มซึ่งเป็นสีตามธรรมชาติของแผ่นยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูป เมื่อเติมผงคาร์บอนในปริมาณเริ่มต้น 10% สีของแผ่นยางเปลี่ยนเป็นสีเทาอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าแม้ปริมาณคาร์บอน 10 % สามารถเปลี่ยนสีของเนื้อยางได้ เมื่อเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนสูงขึ้นถึง สีของแผ่นยางมีแนวโน้มเข้มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ระดับ 90% แผ่นยางมีลักษณะเป็นสีดำเข้มที่สุด การเปลี่ยนสีดังกล่าวเกิดจากการกระจายตัวของอนุภาคคาร์บอนในเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเติมแต่ง อนุภาคคาร์บอนมีสมบัติในการดูดกลืนแสงได้ดีส่งผลให้การสะท้อนแสงจากพื้นผิวลดลงซึ่งส่งผลให้สีของแผ่นยางเข้มขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพถ่ายพื้นผิวของแผ่นยางที่ผ่านการเติมผงคาร์บอน พบว่ายังมีบางบริเวณที่ผงคาร์บอนเกิดการรวมตัวกัน ภายในเนื้อยาง ซึ่งบ่งบอกว่าการกระจายตัวของคาร์บอนยังไม่สมบูรณ์

3.4 การศึกษาปริมาณผงแบเรียมซัลเฟตที่เติมลงในแผ่นยางพารา

ในการทดลองนี้ได้ศึกษาผลของการเติมผงแบเรียมซัลเฟตในอัตราส่วนที่แตกต่างกันลงในแผ่นยางพาราที่ถูกขึ้นรูปด้วยกรดฟอร์มิก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งให้สมบัติทางกายภาพของแผ่นยางที่ดีและสามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ภาพแสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นยางพาราที่ผสมแบเรียมซัลเฟตที่มีปริมาณความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 5 (ก) แสดงภาพของแผ่นยางพาราที่ไม่มีส่วนผสมของแบเรียมซัลเฟต โดยมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มสำหรับรูปที่ 5 (ข-ฉ) แสดงผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมแบเรียมซัลเฟตในปริมาณต่าง ๆ ต่อการขึ้นรูปแผ่นยางพารา ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมแบเรียมซัลเฟตในระดับความเข้มข้น 10–60% สีของแผ่นยางเปลี่ยนไปเล็กน้อยจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 70–90% สีของแผ่นยางเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนเป็นสีขาวขุ่น การเปลี่ยนสีนี้เกิดจากลักษณะทางกายภาพของแบเรียมซัลเฟตซึ่งเป็นผงสีขาว เมื่อมีอัตราส่วนสูงขึ้นแผ่นยางจึงปรากฏเป็นสีขาวชัดเจนมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของแบเรียมซัลเฟตยังส่งผลต่อความหนาแน่นและโครงสร้างของแผ่นยาง โดยพบว่าที่ความเข้มข้น 60% แผ่นยางสามารถขึ้นรูปได้ดี เนื้อยางไม่เกาะตัวกันมากเกินไป แต่ที่ความเข้มข้น 70–90% แม้จะได้สีขาวชัดเจน แต่การขึ้นรูปเป็นแผ่นยางทำได้ยากจำกัด เนื่องจากปริมาณแบเรียมซัลเฟตจะส่งผลให้พื้นผิวในการจับตัวกันของอนุภาคยางลดลง

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลอง การจับตัวของน้ำยางพาราจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของกรดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการเติมกรดฟอร์มิก (HCOOH) พบว่าสามารถทำให้อนุภาคยางรวมตัวเป็นก้อนและแยกชั้นของของเหลวได้ชัดเจนแม้ในปริมาณต่ำเพียง 2 ml และเมื่อเพิ่มปริมาณกรด ขนาดของก้อนยางและน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่ากรดฟอร์มิกมีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ กรดอะซิติก (CH₃COOH) และกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) ตามลำดับ จากการทดลองพบว่ากรดซัลฟิวริก ทำให้ได้ก้อนยางน้ำหนักตํ่า นอกจากนี้ผลการศึกษาการเติมสารเติมแต่งในเนื้อยางพบว่า ผงคาร์บอน ส่งผลต่อสีและการกระจายตัวของผงคาร์บอนของแผ่นยาง โดยการเพิ่มปริมาณคาร์บอนจาก 0–90% ทำให้สีของแผ่นยางเข้มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีดำ สำหรับการเติม แบเรียมซัลเฟต (BaSO₄) พบว่าเมื่อความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10–60% สีของแผ่นยางเปลี่ยนเล็กน้อยเป็นสีน้ำตาลอ่อน และที่ความเข้มข้น 70–90% สีเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นชัดเจน การเพิ่มแบเรียมซัลเฟตมีผลต่อความหนาแน่นและโครงสร้างของแผ่นยาง โดยสารเติมแต่งจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคยาง ลดการจับตัวของพอลิเมอร์ ทำให้การรวมตัวเป็นก้อนยางหรือการขึ้นรูปแผ่นยางไม่สมบูรณ์ ปริมาณที่เหมาะสมประมาณ 60% ทำให้ยางสามารถขึ้นรูปได้ดีและมีการกระจายตัวของสารเติมแต่งอย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า การเลือกชนิดและปริมาณกรดมีผลต่อการจับตัวของน้ำยาง การเติมผงคาร์บอนสามารถปรับสีและเป็นแนวทางเพิ่มสมบัติเชิงกลของแผ่นยางได้ ส่วนการเติมแบเรียมซัลเฟตมีบทบาทสำคัญในการปรับสมบัติทางกายภาพและเป็นสารเติมเต็มเพื่อพัฒนาวัสดุป้องกันรังสี ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาแผ่นยางคอมโพสิตสำหรับการใช้งานจริงที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม

5. ข้อเสนอแนะ

การเติมผงคาร์บอนและแบเรียมซัลเฟตมีผลต่อสีและสมบัติของแผ่นยาง จึงควรศึกษาสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมและผลต่อสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อการสึกหรอพร้อมทั้งทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และประสิทธิภาพการป้องกันรังสี เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกและต่อยอดสู่การผลิตวัสดุป้องกันรังสีที่ปลอดภัยและใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย วิทยาศาสตร์และนวัตกรรมแห่งชาติ (สกว.) ปีงบประมาณ 2568 หมายเลขทุน FRB680074/0164

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Omar, M. F., Ali, F., Jam, M. S., Azm, A. S., Ahmad, F. Marzuki, M. Z., Muniyandi, S. K., Zainudin, Z. and Kim, M. P. (2025). A comprehensive review of natural rubber composites: properties, compounding aspects, and renewable practices with natural fibre reinforcement. *Journal of Renewable Materials*, 13(3), 497-538.
- [2] Firoozi, A. A., Firoozi, A. A., Oyejobi, D. O., Avudaiappan, S. and Flores, E. S. (2024). Emerging trends in sustainable building materials: Technological innovations, enhanced performance, and future directions. *Results in Engineering*, 24, 103521.
- [3] Shah, A. A., Hasan, F., Shah, Z., Kanwal, N. and Zeb, S. (2013). Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 83, 145-157.
- [4] ปรีดีเปรม ทศนกุล. (2563). ยางแผ่นรมควันแบบมัด อีกทางเลือกหนึ่งของผู้ซื้อ, *วารสารยางพารา*, 43(4), 1-13.
- [5] Ng, J. W., Othman, N. and Yusof, N. H. (2022). Various coagulation techniques and their impacts towards the properties of natural rubber latex from *Hevea brasiliensis* - a comprehensive review related to tyre application. *Industrial Crops and Products*, 181, 114835.

- [6] สายสุณี จิตกล้า. (2565). การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของยางแผ่นรมควันเกรดพรีเมียม (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 6459.
- [7] Sopradit, W., Jaturapiree, A., Chaichana, E. and Saowapark, T. (2021). Properties of natural rubber with molasses carbon powder activated using microwave radiation as a filler. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 24(2), 80-90.
- [8] Reis, G. de O., Menut, P., Bonfils, F., Vaysse, L., Hemar, Y. and Sanchez, C. (2015). Acid-induced aggregation and gelation of natural rubber latex particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 482, 9–17.
- [9] Mekonnen, T. H., Ah-Leung, T., Hojabr, S. and Berry, R. (2019). Investigation of the co-coagulation of natural rubber latex and cellulose nanocrystals aqueous dispersion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 583, 123949.
- [10] Robertson, C. G. and Hardman, N. J. (2021). Nature of carbon black reinforcement of rubber: Perspective on the original polymer nanocomposite. *Polymers*, 13(4), 583.

การประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยชุมชน ในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

Assessment of Carbon Dioxide Emissions from Municipal Solid Waste Management in Bang Khla Subdistrict Municipality, Bang Khla District, Chachoengsao Province

สุรีย์พร ธรรมิกพงษ์¹ ณัฐพร สนเผือก¹ และ ผุสดี ภูมรา^{1*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

¹Email: sureeporn.thu@rru.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) โดยใช้แบบสำรวจเพื่อบันทึกข้อมูลปริมาณขยะและนำข้อมูลมาศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ผลการศึกษา พบว่า เทศบาลตำบลบางคล้า มีแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยมาจากพื้นที่ชุมชน จำนวน 10 ชุมชน โดยสามารถเก็บขยะมูลฝอยได้เฉลี่ย 8.90 ตันต่อวัน หรือ 3,248.50 ตันต่อปี โดยสามารถเรียงลำดับปริมาณขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิด ได้ดังนี้ ตลาดสด ที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ โดยมีปริมาณขยะมูลฝอยเฉลี่ย 4.11 3.86 0.52 0.21 0.11 และ 0.09 ตันต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 46.18 43.37 5.84 2.36 1.24 และ 1.01 ตามลำดับ สำหรับผลการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย รวมทั้งสิ้น 46,453.55 kgCO₂eq ต่อปี สามารถเรียงลำดับตามแหล่งกำเนิด ได้ดังนี้ ตลาดสด 21,452.15 kgCO₂eq ต่อปี ที่อยู่อาศัย 20,147.27 kgCO₂eq ต่อปี สถานศึกษา 2,714.14 kgCO₂eq ต่อปี วัด 1,096.10 kgCO₂eq ต่อปี หน่วยงานสาธารณสุข 574.15 kgCO₂eq ต่อปี และร้านสะดวกซื้อ 469.76 kgCO₂eq ต่อปี และ 2) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย รวมทั้งสิ้น 654,967.41 kgCO₂eq ต่อปี ประกอบด้วยปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากรถเก็บขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 1 ตัน จำนวน 1 คัน 275,276.16 kgCO₂eq ต่อปี และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากรถเก็บขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 6 ตัน จำนวน 1 คัน 379,691.25 kgCO₂eq ต่อปี

คำสำคัญ : การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การจัดการขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

Abstract

This research is survey research using a survey to record the amount of waste and to study the amount of carbon dioxide emissions from solid waste management of Bang Khla Subdistrict Municipality, Bang Khla District, Chachoengsao Province. The results of the study found that Bang Khla Subdistrict Municipality has solid waste sources from 10 communities, collecting an average of 8.90 tons of waste per day or 3,248,500 tons per year. The amount of solid waste can be ranked by source as follows: fresh markets, residences, educational institutions, temples, public health agencies, and convenience stores. The average amount of solid waste was 4.11, 3.86, 0.52, 0.21, 0.11, and 0.09 tons per day, representing 46.18, 43.37, 5.84, 2.36, 1.24, and 1.01 percent, respectively. The study of carbon dioxide emissions from waste management in Bang Khla Subdistrict Municipality, Bang Khla District, Chachoengsao Province, consisted of two parts: 1) the amount of carbon dioxide emissions from waste collection in Bang Khla Subdistrict Municipality. The total amount of carbon dioxide emissions was found to be 46,453.55 kgCO₂eq per year, which can be sorted by source as follows: fresh market 21,457.293 kgCO₂eq per year, residence 20,147.27 kgCO₂eq per year, educational institution 2,714.14 kgCO₂eq per year, temple 1,096.10 kgCO₂eq per year, public health agency 574.15 kgCO₂eq per year, and convenience store 417.56 kgCO₂eq per year, and 2) the amount of carbon dioxide emissions from waste transportation, Bang Khla Subdistrict Municipality. The total amount of carbon dioxide emissions from waste transportation is 645,605.16 kgCO₂eq per year. This includes 275,276.16 kgCO₂eq per year from a single 1-ton rear-compressed waste truck and 370,329.00 kgCO₂eq per year from a single 6-ton rear-compressed waste truck.

Keywords: Carbon dioxide emissions, waste management, Bang Khla Subdistrict Municipality, Chachoengsao Province

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในศตวรรษที่ 21 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ที่มีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศได้กลายเป็นปัญหาสำคัญระดับโลกที่ส่งผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อระบบนิเวศ สังคม และเศรษฐกิจ [1] องค์การและประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ซึ่งเป็นตัวการหลักของภาวะเรือนกระจก

การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนถือเป็นกิจกรรมที่มีความเชื่อมโยงโดยตรงกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดวงจรชีวิต ตั้งแต่ขั้นตอนการเก็บรวบรวม การขนส่ง (การใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ) ไปจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการกำจัด (การย่อยสลายของขยะอินทรีย์ในการฝังกลบหรือการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์) [2] วิธีการจัดการขยะที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น การฝังกลบที่ไม่ถูกสุขลักษณะจะปล่อยก๊าซมีเทนในปริมาณมาก ขณะที่การคัดแยกขยะเพื่อนำไปรีไซเคิลหรือผลิตปุ๋ยจะช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการขยะมีแหล่งที่มาหลัก 3 ส่วน [3] คือ 1) การฝังกลบขยะ ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศ 2) การขนส่งและแปรรูปขยะ ที่ปล่อย (CO₂) จากเครื่องจักรกล 3) การเผาขยะ ซึ่งสร้าง (CO₂) โดยตรง การจัดการขยะตลอดวงจรจึงต้องพิจารณาการลดการปล่อยก๊าซเหล่านี้ในทุกขั้นตอน ตั้งแต่การลดปริมาณขยะ (reduce) การใช้ซ้ำ (reuse) การรีไซเคิล (recycle) ไปจนถึงการบำบัดและใช้ประโยชน์จากขยะอย่างถูกวิธี

ปัจจุบันเมืองและชุมชนในประเทศไทยมีการเติบโตและขยายตัวมากขึ้น มีจำนวนประชากรและกิจกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้น ทำให้แนวโน้มปัญหาสิ่งแวดล้อมทวีมากขึ้น เช่น มลพิษทางน้ำ อากาศเสีย ขยะ การใช้พลังงานเกินความจำเป็น รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกิจกรรมบางประเภทซึ่งส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากรายงานสถานการณ์สิ่งแวดล้อม พบว่าประเทศไทยมีการจัดการขยะมูลฝอย อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีสัดส่วนของขยะมูลฝอยที่นำกลับมาใช้ประโยชน์มากขึ้น โดยพื้นที่ที่มีสัดส่วนของ การนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคใต้ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในแต่ละภูมิภาคมีขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น และขยะมูลฝอยที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์ ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากข้อมูลรายงานสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนของไทยในปี 2566 พบว่าพื้นที่ที่มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นมากที่สุด ได้แก่ พื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล รองลงมาคือ พื้นที่ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตามลำดับ

สำหรับพื้นที่ที่มีปัญหาขยะมูลฝอยมากที่สุด คือเป็นพื้นที่ที่มีสัดส่วนของขยะมูลฝอยที่กำจัดแบบไม่ถูกต้องสูงสุด คือ พื้นที่ภาคตะวันออก [4] ทั้งนี้ ประเทศไทยมีสถานีนถ่ายขยะมูลฝอย และสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยแบบถูกต้องและไม่ถูกต้องรวม 2,115 แห่งกระจายอยู่ใน ภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วประเทศ

ทั้งนี้ องค์การปกครองส่วนท้องถิ่นและชุมชนในประเทศไทยเริ่มมีการประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะ ตัวอย่างเช่น ในปี พ.ศ.2561 เทศบาลเมืองอุทัยธานี มีคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากขยะ 1 ตัน เท่ากับ 2.47 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตัน โดยมาจากการฝังกลบ 2.41 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตัน [5] ในปี พ.ศ.2562 เทศบาลเมืองน่าน พบว่า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยรวม 16,647,623.90 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยมาจากการรวบรวม การขนส่ง และการกำจัด [6] และในปี พ.ศ.2562 ชุมชนตำบลบ้านยาง จังหวัดบุรีรัมย์ มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขยะมูลฝอยชุมชนทั้ง 4 ประเภท ปริมาณรวม 6,093.11 KgCO₂e/day [7] เป็นต้น

สำหรับพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นพื้นที่กึ่งเมือง ซึ่งมีความเจริญอย่างต่อเนื่องจากความเจริญดังกล่าว และจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละปี ส่งผลให้ปริมาณขยะในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้ามีจำนวนเพิ่มขึ้น โดยที่ยังไม่มีการประเมินการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อนำไปสู่การวางแผนการบริหารจัดการขยะในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า และเกิดการมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนในการขับเคลื่อนชุมชนสู่การเป็นสังคมคาร์บอนต่ำ ให้สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development Goals-SDG) ตามที่องค์การสหประชาชาติได้กำหนดเป้าหมายไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

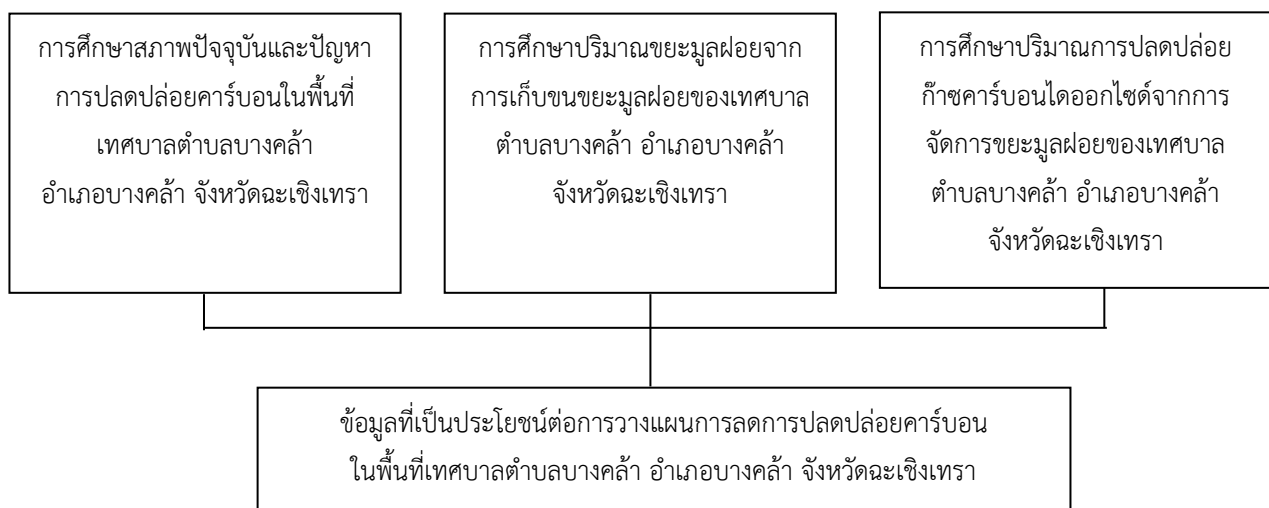
1.2.1 เพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาการปลดปล่อยคาร์บอนในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการศึกษาการจัดการขยะมูลฝอยของชุมชนดำเนินการในพื้นที่ชุมชนในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย ตลาดสด ที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ รวมจำนวน 10 ชุมชน ได้แก่ 1) ชุมชนสวนประดู่ 2) ชุมชนดงตาล 3) ชุมชนหลังวัดโพธิ์ 4) ชุมชนหลังวัดแจ้ง 5) ชุมชนโจ้วฉู้ 6) ชุมชนบ้านครัว 7) ชุมชนบ้านปลายคลอง (บัวสีเงิน) 8) ชุมชนพระเจ้าตากสิน 9) ชุมชนศาลเจ้าพ่อหลักเมือง และ 10) ชุมชนพระเจ้าตากสินรำลึก

1.4 กรอบแนวคิดในการวิจัย



2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) โดยใช้แบบสำรวจเพื่อบันทึกข้อมูลปริมาณขยะ และนำข้อมูลมาทำการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาการปลดปล่อยคาร์บอนในพื้นที่ศึกษา

การดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย

การศึกษาปริมาณขยะมูลฝอยจากการเก็บขนขยะมูลฝอย โดยใช้แบบสำรวจบันทึกข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยในพื้นที่ 10 ชุมชนที่เก็บขนโดยรถเก็บขนมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า

การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย มีวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้

การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย โดยนำข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยที่สำรวจได้ (กิโลกรัมต่อปี) มาคูณกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ของการจําเก็บรวบรวม และขนถ่ายขยะมูลฝอยชุมชน โดยเลือกใช้ค่าปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ตามแนวทางของ IPCC AR5 (2014) ข้อมูลอ้างอิง Thai National LCI Database, TIS-MTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018) คือ 0.0143 kgCO₂eq [8] ดังสมการที่ (1)

$$\text{EmissionC} = \text{Solid waste} \times \text{EF} \quad (1)$$

EmissionC = ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย (kgCO₂eq)

Solid waste = ปริมาณขยะมูลฝอย (กิโลกรัมต่อปี)

EF = Emission Factor (kgCO₂eq ต่อกิโลกรัม)

การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย โดยนำข้อมูลระยะทางที่รถเก็บขนขยะมูลฝอยวิ่งในแต่ละวัน มาคูณกับน้ำหนักบรรทุก และคูณกับค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ของรถบรรทุกขยะ รังปกติ 100% Loading [8] คือ 0.0475 ดังสมการที่ (2)

$$\text{EmissionC} = \text{Distance} \times \text{Loading} \times \text{EF} \quad (2)$$

EmissionC = ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย (kgCO₂eq)

Distance = ระยะทาง (กิโลเมตรต่อปี)

Loading = น้ำหนักบรรทุก (ตันต่อปี)

EF = Emission Factor (kgCO₂eq ต่อดันกิโลเมตร)

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันและปัญหาการปลดปล่อยคาร์บอนในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

จากการศึกษาข้อมูลสภาพปัจจุบันและปัญหาการปลดปล่อยคาร์บอนในพื้นที่อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ได้ผลการศึกษา ดังนี้

แหล่งกำเนิดขยะมูลฝอย

เทศบาลตำบลบางคล้า ในปัจจุบันมีแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยส่วนใหญ่มาจากพื้นที่ชุมชน ได้แก่ ตลาดสด ที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ รวมทั้งหมด 10 ชุมชน [10] ได้แก่ 1) ชุมชนสวนประดู่ 2) ชุมชนดงตาล 3) ชุมชนหลังวัดโพธิ์ 4) ชุมชนหลังวัดแจ้ง 5) ชุมชนโจ้วฉู้ 6) ชุมชนบ้านครัว 7) ชุมชนบ้านปลายคลอง (บัวสีเงิน) 8) ชุมชนพระเจ้าตากสิน 9) ชุมชนศาลเจ้าพ่อหลักเมือง และ 10) ชุมชนพระเจ้าตากสินรำลึก

บ้านเรือน ประกอบด้วย ครัวเรือนรวมจำนวนทั้งสิ้น 5,341 หลังคาเรือน มีจำนวนประชากร 9,744 คน สถานที่ให้บริการด้านสาธารณสุขในเขตเทศบาล ได้แก่ 1) ศูนย์บริการสาธารณสุขเทศบาลตำบลบางคล้า จำนวน 1 แห่ง 2) คลินิกรัฐบาล จำนวน 1 แห่ง ได้แก่ สาขาขยายโรงพยาบาลบางคล้า และ คลินิกเอกชน จำนวน 5 แห่ง ได้แก่ คลินิกรักษาโรคทั่วไป จำนวน 3 แห่ง และคลินิกทันตกรรม จำนวน 2 แห่ง 3) ร้านขายยาแผนปัจจุบัน จำนวน 10 แห่ง [9]

ระบบการจัดการขยะ

เทศบาลตำบลบางคล้ามีการจัดการขยะโดยใช้รถเก็บขนขยะมูลฝอยของเทศบาล ซึ่งเก็บขยะมูลฝอยตั้งแต่แหล่งกำเนิดไปจนถึงปลายทางในการกำจัดขยะมูลฝอย

การรวบรวมมูลฝอย

เทศบาลตำบลบางคล้า จะออกเก็บขยะมูลฝอยในพื้นที่ชุมชนในเขตเทศบาลตำบลบางคล้าทุกวันไม่เว้นวันหยุดราชการ วันละ 1-5 รอบ โดยมีรถเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย รวมจำนวน 2 คัน ประกอบด้วย 1) รถเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 1 ตัน จำนวน 1 คัน มีระยะทางวิ่งเฉลี่ย 15 กิโลเมตรต่อวัน หรือ 5,475 กิโลเมตรต่อปี และ 2) รถเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 6 ตัน จำนวน 1 คัน โดยมีระยะทางวิ่งเฉลี่ย 10 กิโลเมตรต่อวัน หรือ 3,650 กิโลเมตรต่อปี

การขนส่งและการกำจัดขยะมูลฝอย

เทศบาลตำบลบางคล้า ขนส่งขยะมูลฝอยที่เก็บรวบรวมได้ในแต่ละวันไปเทกอง ณ ศูนย์กำจัดขยะเทศบาลตำบลบางคล้า ดังรูปที่ 1 จากนั้นบริษัทเอกชนที่ได้รับการว่าจ้างจะเก็บขนขยะมูลฝอยจากกองขยะเทศบาลตำบลบางคล้าไปยังโรงงานแปรรูปขยะ เพื่อนำขยะไปคัดแยกและทำประโยชน์อื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 1 ศูนย์กำจัดขยะเทศบาลตำบลบางคล้า

3.2 ผลการศึกษาปริมาณและอัตราการเกิดขยะมูลฝอย

การศึกษ ปริมาณขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า ดำเนินการศึกษ ปริมาณขยะมูลฝอย ในช่วงเดือน กันยายน พ.ศ.2568 จากแหล่งกำเนิด 6 แหล่ง ประกอบด้วย ตลาดสด ที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ ผลการศึกษา พบว่า เทศบาลตำบลบางคล้ามีปริมาณขยะมูลฝอยเฉลี่ย 8.90 ตันต่อวัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า

แหล่งกำเนิดขยะมูลฝอย	ปริมาณขยะมูลฝอย (ตันต่อวัน)	ปริมาณขยะมูลฝอย (ตันต่อปี)	สัดส่วนการเกิดขยะมูลฝอย (ร้อยละ)
ตลาดสด	4.11	1,500.15	46.18
ที่อยู่อาศัย	3.86	1,408.90	43.37
สถานศึกษา	0.52	189.80	5.84
วัด	0.21	76.65	2.36
หน่วยงานสาธารณสุข	0.11	40.15	1.24
ร้านสะดวกซื้อ	0.09	32.85	1.01
รวม	8.90	3,248.50	100.00

จากตารางที่ 2 พบว่า พื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณมูลฝอยจากแหล่งกำเนิดตลาดสดมากที่สุด มีปริมาณเฉลี่ย 4.11 ตันต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 46.18 รองลงมาคือ มูลฝอยจากแหล่งกำเนิดที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ มีปริมาณเฉลี่ย 3.86 0.52 0.21 0.11 และ 0.09 ตันต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 43.37 5.84 2.36 1.24 และ 1.01 ตามลำดับ

3.3 ผลการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอ บางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย ได้ผลการศึกษาดังนี้

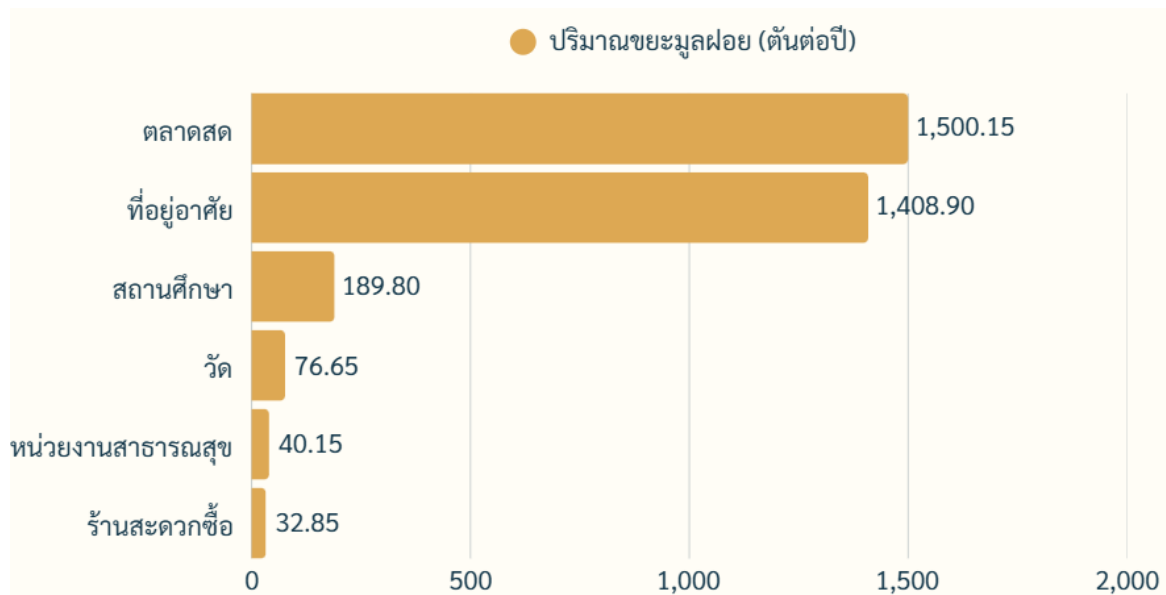
1) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย

การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรวบรวมขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า ดำเนินการศึกษาโดยใช้ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอย และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ได้ผลการศึกษา ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 2 และรูปที่ 3

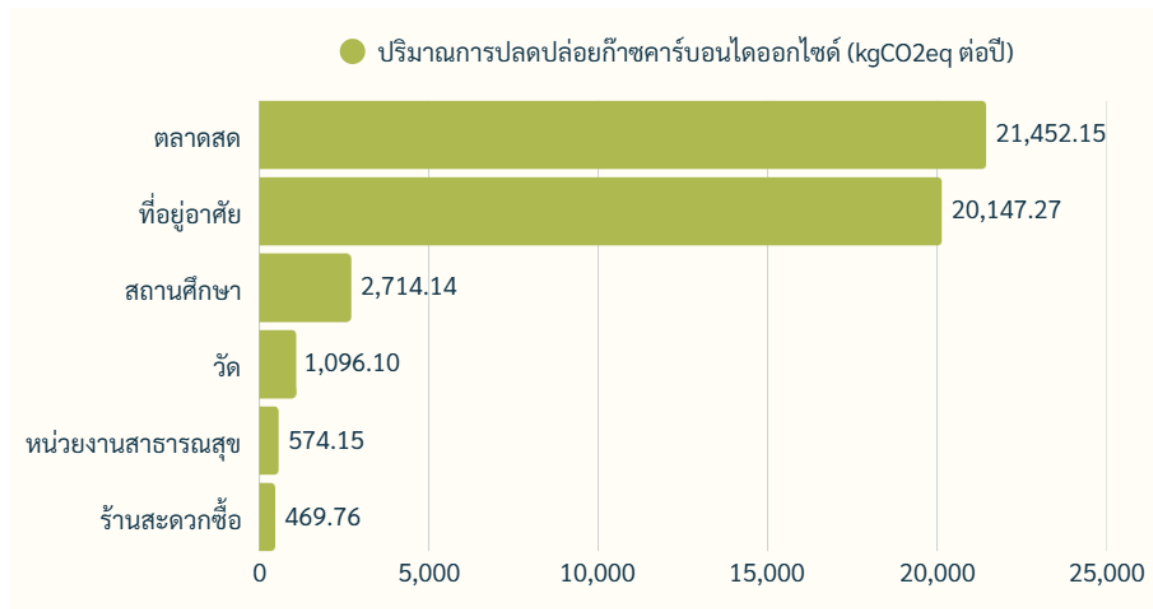
ตารางที่ 3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรวบรวมขยะมูลฝอย

แหล่งกำเนิดขยะมูลฝอย	ปริมาณขยะมูลฝอย (ตันต่อปี)	ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO ₂ eq ต่อปี)
ตลาดสด	1,500.51	21,452.15
ที่อยู่อาศัย	1,408.90	20,147.27
สถานศึกษา	189.80	2,714.14
วัด	76.65	1,096.10
หน่วยงานสาธารณสุข	40.15	574.15
ร้านสะดวกซื้อ	29.20	469.76
รวม	3,248.50	46,453.55

หมายเหตุ: ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) = 0.0143 kgCO₂eq ต่อกิโลกรัม



รูปที่ 2 ปริมาณขยะมูลฝอย แยกตามแหล่งกำเนิดมูลฝอย ในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า



รูปที่ 3 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แยกตามแหล่งกำเนิดมลพิษ ในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า

จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แปรผันตรงกับปริมาณขยะมูลฝอย โดยในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกำเนิดตลาดสดมากที่สุด คือ 21,452.15 kgCO₂eq ต่อปี รองลงมา คือ ที่อยู่อาศัย 20,147.27 kgCO₂eq ต่อปี สถานศึกษา 2,714.14 kgCO₂eq ต่อปี วัด 1,096.10 kgCO₂eq ต่อปี หน่วยงานสาธารณสุข 574.15 kgCO₂eq ต่อปี และร้านสะดวกซื้อ 469.76 kgCO₂eq ต่อปี ตามลำดับ

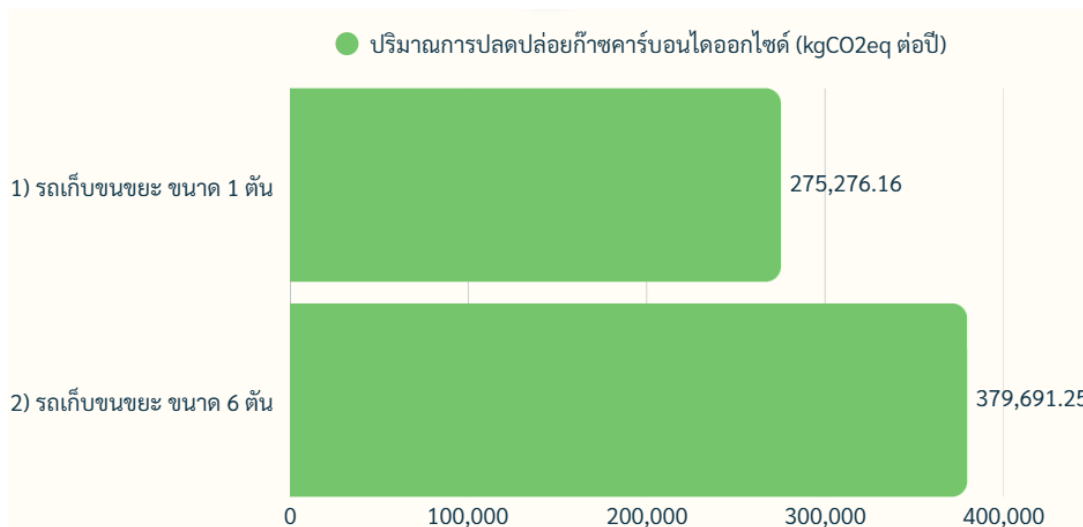
2) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย

การศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการรวบรวมขยะมูลฝอยในเขตเทศบาลตำบลบางคล้า ดำเนินการศึกษาโดยใช้ข้อมูลระยะทางที่รถเก็บขนขยะมูลฝอยวิ่งเฉลี่ย น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) ได้ผลการศึกษา ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บขนขยะมูลฝอย

ประเภทรถเก็บขนขยะมูลฝอย	ระยะทางวิ่งเฉลี่ย (กิโลเมตรต่อปี)	น้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย (ตันต่อปี)	ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ (kgCO ₂ eq ต่อปี)
1) รถเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 1 ตัน จำนวน 1 คัน	5,475	1,058.50	275,276.16
2) รถเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 6 ตัน จำนวน 1 คัน	3,650	2,190.00	379,691.25
รวม			654,967.41

หมายเหตุ: ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor) = 0.0475 kgCO₂eq ต่อตันกิโลเมตร



รูปที่ 4 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แยกตามประเภทรถเก็บขนขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า

4. สรุปผลการวิจัย

เทศบาลตำบลบางคล้า มีแหล่งกำเนิดขยะมูลฝอยมาจากพื้นที่ชุมชน จำนวน 10 ชุมชน ประกอบด้วย บ้านเรือน รวมจำนวนทั้งสิ้น 5,341 หลังคาเรือน มีจำนวนประชากร 9,744 คน สถานที่ให้บริการด้านสาธารณสุขในเขตเทศบาล ได้แก่ 1) ศูนย์บริการสาธารณสุข เทศบาลตำบลบางคล้า จำนวน 1 แห่ง 2) คลินิกรัฐบาล จำนวน 1 แห่ง ได้แก่ สาขาอายุรเวชโรงพยาบาลบางคล้า และ คลินิกเอกชน จำนวน 5 แห่ง ได้แก่ คลินิกรักษาโรคทั่วไป จำนวน 3 แห่ง และคลินิกทันตกรรม จำนวน 2 แห่ง 3) ร้านขายยาแผนปัจจุบัน จำนวน 10 แห่ง

เทศบาลตำบลบางคล้า สามารถเก็บขนขยะมูลฝอยได้เฉลี่ย 8.90 ตันต่อวัน หรือ 3,248.50 ตันต่อปี โดยสามารถเรียงลำดับปริมาณขยะมูลฝอยจากแหล่งกำเนิด ได้ดังนี้ ตลาดสด ที่อยู่อาศัย สถานศึกษา วัด หน่วยงานสาธารณสุข และร้านสะดวกซื้อ โดยมีปริมาณขยะมูลฝอยเฉลี่ย 4.11 3.86 0.52 0.21 0.11 และ 0.09 ตันต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 46.18 43.37 5.84 2.36 1.24 และ 1.01 ตามลำดับ

ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย รวมทั้งสิ้น 46,453.55 kgCO₂eq ต่อปี สามารถเรียงลำดับตามแหล่งกำเนิด ได้ดังนี้ ตลาดสด 21,452.15 kgCO₂eq ต่อปี ที่อยู่อาศัย 20,147.27 kgCO₂eq ต่อปี สถานศึกษา 2,714.14 kgCO₂eq ต่อปี วัด 1,096.10 kgCO₂eq ต่อปี หน่วยงานสาธารณสุข 574.15 kgCO₂eq ต่อปี และร้านสะดวกซื้อ 469.76 kgCO₂eq ต่อปี

ทั้งนี้ตลาดสดมีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เพราะมีปริมาณขยะมูลฝอยมากที่สุด อีกทั้งองค์ประกอบส่วนใหญ่ของขยะมูลฝอยจากตลาดสดเป็นจำพวกขยะอินทรีย์และเศษอาหาร

2) ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลบางคล้า มีปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการขนส่งขยะมูลฝอย รวมทั้งสิ้น 654,967.41 kgCO₂eq ต่อปี ประกอบด้วย ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 1 ตัน จำนวน 1 คัน 275,276.16 kgCO₂eq ต่อปี และปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเก็บขนขยะมูลฝอยแบบอัดท้าย ขนาด 6 ตัน จำนวน 1 คัน 379,691.25 kgCO₂eq ต่อปี

5. ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนงานและโครงการเพื่อลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Dioxide, CO₂) ในพื้นที่เทศบาลตำบลบางคล้า อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยมุ่งเน้นที่แหล่งกำเนิดและกระบวนการจัดการขยะที่ปล่อย CO₂
2. วิธีดำเนินการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของหน่วยงานอื่นๆ ในพื้นที่อื่นๆ ได้ต่อไป
3. จากผลการวิจัยจะเห็นว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปลดปล่อยจากกิจกรรมการขนส่งขยะมูลฝอยมากกว่ากิจกรรมการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย ดังนั้น ควรวางแผนเส้นทางการเดินทางขนส่งขยะมูลฝอย ให้มีระยะทางสั้นลงแต่ครอบคลุมพื้นที่เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง และควรปรับเปลี่ยนรถเก็บขนขยะมูลฝอยเป็นรถที่ใช้พลังงานสะอาด เพื่อลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการวิจัยเพื่อการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตลอดวงจรชีวิต (Life Cycle Assessment - LCA) โดยศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลตำบลบางคล้า ตลอดวงจรชีวิต ตั้งแต่การผลิต การบริโภควัสดุที่กลายเป็นขยะ ไปจนถึงการกำจัดขั้นสุดท้าย เพื่อระบุจุดที่เกิดผลกระทบสูงสุดได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น
2. ควรมีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการมีส่วนร่วมของประชาชน ในการคัดแยกขยะและการลดปริมาณขยะที่ต้นทาง เพื่อออกแบบกลไกและนโยบายที่สร้างแรงจูงใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ควรมีการใช้เทคโนโลยีเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล เช่น การใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System - GIS) เก็บข้อมูลในเชิงพื้นที่ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนตลอดมา และขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ทุกประการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
- [2] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น, พิมพ์ครั้งที่ 1 องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2561.
- [3] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). (17 พฤศจิกายน 2568). “ขยะ” ตัวการโลกร้อนที่ไม่ควรมองข้าม. สืบค้นจาก <http://electricplayground.nia.or.th/innovator-detail%20?id=371>.
- [4] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, รายงานสถานการณ์ดัชนีสมรรถนะสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ปี 2568, 2568.

- [5] การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์สำหรับการจำลองสถานการณ์ประสิทธิภาพบ่อฝังกลบขยะ เทศบาลเมืองอุทัยธานี โดยการบำบัดขยะด้วยกรรมวิธีเชิงกล-ชีวภาพ ไฟลิว ชุมเชิงค้ำ วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ปีการศึกษา 2565 ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร 2565.
- [6] การประเมินปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการจัดการขยะมูลฝอยของเทศบาลเมืองน่าน ประภัสสร กาวิณู วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรสิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2565.
- [7] พงศ์ธร แสงชุติ และคณะ, “การประเมินการเกิดก๊าซเรือนกระจก : ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากระบบการจัดการขยะมูลฝอยในชุมชนตำบลบ้านยาง จังหวัดบุรีรัมย์”, Journal of Energy and Environment Technology, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, หน้า 29-37. 2563.
- [8] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (20 กันยายน 2568). Emission Factor (CFP). สืบค้นจาก <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod=Y0hKdlpIVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>.
- [9] รายงานข้อมูลเทศบาลตำบลบางคล้า, กองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม เทศบาลตำบลบางคล้า, 2568.

การเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในการทำนายการจัดส่งสินค้าตรงเวลา Comparison of Machine Learning Models for On-Time Delivery Prediction

นัฐริตา เงินประเสริฐ¹ ไชยวัฒน์ ศรีแสง¹ และ ชนิตา แก้วเพชร^{2*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

²สาขาวิชาสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

¹Email: 367347221015-st@rmutsb.ac.th; ¹Email: 367347221008-st@rmutsb.ac.th; ²Email: Chanida.k@rmutsb.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์เชิงทำนาย (Predictive Pipeline) สำหรับการพยากรณ์การจัดส่งสินค้าตรงเวลา (On-Time Delivery: OTD) โดยอาศัยข้อมูลการขนส่งเชิงปฏิบัติการที่รวมมาจากหลายชุดข้อมูลในรูปแบบ Excel ภายหลังจากการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) และการเตรียมข้อมูลเพื่อป้องกันการรั่วไหลของข้อมูล (Anti-Leakage Preprocessing) ซึ่งประกอบด้วย การจัดกลุ่มค่าที่พบน้อย (Rare-Category Grouping) การแทนค่าที่ขาดหายด้วยค่ามัธยฐาน (Median Imputation) และการปรับมาตรฐานข้อมูล (Standardization) จากนั้นทำการคัดเลือกคุณลักษณะสำคัญด้วยเทคนิค SelectKBest เหลือเพียง 465 ตัวแปรสำคัญ ชุดข้อมูลรวมทั้งสิ้น 6,866 รายการ แบ่งเป็น Delay = 4,318 (62.89%) และ On-time = 2,548 (37.11%) โดยแบ่งข้อมูลแบบ Stratified เป็น Train = 5,492 (79.99%) และ Test = 1,374 (20.01%) เพื่อรักษาสัดส่วนคลาสให้ใกล้เคียงกับภาพรวมทั้งหมด

การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง 3 ประเภท ได้แก่ Logistic Regression, Random Forest และ XGBoost ภายใต้เงื่อนไขพารามิเตอร์เริ่มต้นเดียวกัน ผลการประเมินพบว่าแบบจำลอง XGBoost ให้ผลดีที่สุดทั้งในภาพรวม โดยมี Accuracy = 0.9243, F1-score = 0.9411, ROC-AUC = 0.9667 [0.957–0.976], PR-AUC = 0.9743 และ Brier Score = 0.0589 ซึ่งดีกว่า Logistic Regression (Brier = 0.0681) และ Random Forest (Brier = 0.0625) เส้นโค้ง Calibration Curve ของ XGBoost ยังมีความสอดคล้องใกล้เคียงเส้นอุดมคติ (Ideal Line) มากที่สุด

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณา PR-AUC พบว่า Logistic Regression ให้ค่าสูงสุด (0.9762) ตามตารางที่ 1 ขณะที่ XGBoost มี AUC และ F1-score สูงกว่าในภาพรวม ผลการทดสอบทางสถิติด้วย DeLong Test แสดงว่าความแตกต่างของ AUC ระหว่างโมเดลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.99$) ขณะที่ McNemar Test พบความแตกต่างของอัตราความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Logistic Regression และ XGBoost ($p = 0.0044$) นอกจากนี้ยังตรวจสอบความเสถียรของผลลัพธ์ด้วย Cross-Validation แบบ 5-Fold (F1-macro variance < 0.02) เพื่อยืนยันความทั่วไปของแบบจำลอง

โดยสรุป แบบจำลอง XGBoost มีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูงสุด ส่วน Random Forest ให้ผลใกล้เคียงพร้อมการสอบเทียบความน่าจะเป็นที่ดี ขณะที่ Logistic Regression แม้มีความแม่นยำต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ยังคงเด่นด้านความสามารถในการตีความผลลัพธ์ จึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในเชิงวิเคราะห์และการตัดสินใจในระบบโลจิสติกส์จริง

คำสำคัญ: การจัดส่งสินค้า การเรียนรู้ของเครื่อง ทำนายการจัดส่งสินค้า

Abstract

This research aims to develop and evaluate a predictive pipeline for on-time delivery (OTD) forecasting using operational transportation data consolidated from multiple Excel-based sources. After comprehensive data cleaning and anti-leakage preprocessing—including rare-category grouping, median imputation, and standardization—key features were selected using the SelectKBest method, resulting in 465 significant variables. The dataset comprises 6,866 records, divided into Delay = 4,318 (62.89%) and On-time = 2,548 (37.11%). Data were stratified into Train = 5,492 (79.99%) and Test = 1,374 (20.01%) to preserve class proportions.

Three machine-learning models—Logistic Regression, Random Forest, and XGBoost—were compared under identical parameter settings. Results show that XGBoost achieved the best overall performance, with Accuracy = 0.9243, F1-score = 0.9411, ROC-AUC = 0.9667 [0.957–0.976], PR-AUC = 0.9743, and Brier Score = 0.0589, outperforming Random Forest (Brier = 0.0625) and Logistic Regression (Brier = 0.0681). The calibration curve of XGBoost was closest to the ideal line, indicating excellent probability reliability.

However, when considering PR-AUC, Logistic Regression achieved the highest value (0.9762) according to Table 1, whereas XGBoost exhibited superior AUC and F1-score overall. Statistical tests showed no significant differences in AUC between models (DeLong $p > 0.99$), while the McNemar test indicated a significant difference in error rates between Logistic Regression and XGBoost ($p = 0.0044$). Five-fold cross-validation (F1-macro variance < 0.02) confirmed the stability and generalization of the results.

In summary, XGBoost achieved the highest accuracy and reliability, Random Forest showed comparable and well-calibrated results, while Logistic Regression, though slightly less accurate, remains highly interpretable and practical for decision-support applications in real-world logistics systems

Keywords: On-time delivery (OTD), Machine learning, Shipment delivery prediction

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ที่มีการแข่งขันรุนแรงและผันผวนสูง การส่งมอบตรงเวลา (On-Time Delivery: OTD) ถือเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลักที่สะท้อนทั้งความน่าเชื่อถือของซัพพลายเชนและคุณภาพการบริการลูกค้าอย่างเป็นรูปธรรม การติดตามและยกระดับ OTD ถูกระบุในงานทบทวนเชิงระบบด้านตัวชี้วัดซัพพลายเชนว่าเป็นแกนกลางของชุด KPI ที่องค์กรใช้เพื่อเพิ่มความสามารและความยืดหยุ่นของเครือข่ายโลจิสติกส์ โดยสัมพันธ์กับผลลัพธ์ทางธุรกิจทั้งด้านรายได้ ต้นทุน และความพึงพอใจลูกค้า [1] แนวโน้มดังกล่าวยิ่งเด่นชัดในช่วงที่มานด์แปรปรวนหรือฤดูกาลพิก ซึ่งความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในกำหนดเวลาส่งมอบอาจขยายผลกระทบตลอดห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่การวางแผนกำลังการผลิต การจัดสรรทรัพยากรขนส่ง ไปจนถึงการบริการหลังการขาย

ท่ามกลางบริบทดังกล่าว วิธีการเรียนรู้ของเครื่อง/ดีปเลิร์นนิงได้รับการพิสูจน์มากขึ้นว่าเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการคาดการณ์ความล่าช้าและ/หรือระยะเวลาส่งมอบได้อย่างแม่นยำในสถานการณ์จริง ช่วยให้องค์กรสามารถเปลี่ยนแนวปฏิบัติจาก “ตอบสนองภายหลัง” สู่ “บริหารเชิงรุก” เช่น ปรับเส้นทางหรือปรับลำดับงานก่อนเกิดเหตุขาดส่ง งานประยุกต์ล่าสุดในภาคยานยนต์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง DL ที่ผสานตัวแปรเศรษฐกิจมหภาคสามารถประเมินความเสี่ยงล่าช้าของซัพพลายเชนได้มีนัยสำคัญ [2] ขณะเดียวกัน กรณีศึกษากับโรงงานผลิตแบบสั่งทำ (job shop) รายงานว่าการใช้ ML เพื่อกำหนดเวลาส่งมอบในสภาพการผลิตที่เล็กที่หลากหลายสามารถยกระดับความแม่นยำของกำหนดการและลดการคลาดเคลื่อนเวลาได้จริง [3] หลักฐานเชิงประจักษ์เหล่านี้สนับสนุนว่าการนำ ML/DL มาประยุกต์กับปัญหา OTD ไม่เพียงเป็นไปได้เชิงเทคนิค แต่ยังสร้างคุณค่าปฏิบัติการที่วัดผลได้

อย่างไรก็ดี ความเที่ยงตรงของ “คะแนนความน่าจะเป็น” ที่แบบจำลองให้เป็นประเด็นสำคัญต่อการตัดสินใจปลายน้ำ เช่น การเลือกเครือข่ายขนส่ง การวางแผนบัฟเฟอร์เวลา หรือการสื่อสารเชิงคาดการณ์กับลูกค้า หากความน่าจะเป็นมีอคติ (เช่น มั่นใจเกินจริง) แม้แบบจำลองจะมี AUC สูง ก็อาจนำไปสู่การตัดสินใจที่ไม่เหมาะสม งานวิจัยสากลล่าสุดจึงเสนอกรอบการประเมินแบบจำแนกเชิงความน่าจะเป็นที่รัดกุมขึ้น ทั้งในมิติความสามารถจำแนกและ “ความสอดคล้องระหว่างความน่าจะเป็นที่ทำนายกับอัตราที่สังเกตจริง” ผ่านเครื่องมืออย่าง reliability diagram และตัวชี้วัด Brier score พร้อมแนวปฏิบัติในการปรับเทียบภายหลัง (post-hoc calibration) เพื่อแก้ไขอคติดังกล่าว [4], [5] การประเมินเชิงสถิติที่โปร่งใสยังจำเป็นต่อการสรุปเชิงเปรียบเทียบระหว่างโมเดล โดยเฉพาะเมื่อทำงานบนชุดทดสอบเดียวกัน วิธีการ DeLong สำหรับเปรียบเทียบพื้นที่ใต้โค้ง ROC-AUC แบบอิงสหสัมพันธ์เป็นมาตรฐานที่ใช้แพร่หลายในการทดสอบนัยสำคัญของความแตกต่างระหว่างโมเดล [6]

สำหรับข้อมูลปฏิบัติการจริงของเรา จาก “Transportation and Logistics Tracking Dataset” พบว่าสัดส่วนการจัดส่งล่าช้าอยู่ที่ 62.89% ตัวเลขดังกล่าวสะท้อนความท้าทายเชิงคลาสที่ไม่สมดุลและผลกระทบเชิงธุรกิจที่จับต้องได้ จึงเกิดความจำเป็นในการพัฒนาแบบจำลองที่ “ตีความได้และปรับเทียบได้” เพื่อคาดการณ์ความเสี่ยงล่วงหน้าอย่างน่าเชื่อถือ กรอบการวิจัยนี้จึงออกแบบให้ครอบคลุมทั้งการเตรียมข้อมูลแบบเป็นระบบ การคัดเลือก/แปลงคุณลักษณะ และการประเมินหลายมิติ (AUC/PR-AUC/F1 รวมถึง Calibration และการทดสอบนัยสำคัญ) โดยยึดแนวทางวิธีวิจัยร่วมสมัย ผลลัพธ์คาดหวังคือความสามารถในการชี้เป้าปัจจัยเสี่ยงสำคัญสนับสนุนการตัดสินใจเชิงรุก ลดต้นทุนจากความผิดพลาด และยกระดับประสบการณ์ลูกค้าในห่วงโซ่โลจิสติกส์อย่างยั่งยืน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 พัฒนาและเปรียบเทียบแบบจำลองทำนาย OTD (Logistic Regression, Random Forest, XGBoost) บนชุดข้อมูลที่บูรณาการหลายชุดด้วยกระบวนการเตรียมข้อมูลแบบ Pipeline ที่ทำซ้ำได้

1.2.2 ประเมินสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ด้วยเมตริกจำแนก (Accuracy, Precision, Recall, F1, ROC-AUC/PR-AUC) และการปรับเทียบความน่าจะเป็น (Brier score, Calibration curve) พร้อมทดสอบนัยสำคัญ (Bootstrap CI, DeLong, McNemar)

1.2.3 ตีความปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ OTD และจัดทำรายงานเชิงปฏิบัติการ ด้วย Permutation/XGBoost importance และเอ็กซ์พอร์ตผล-กราฟลงไฟล์ Excel เพื่อรองรับการใช้งานจริงในโลจิสติกส์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้ใช้ชุดข้อมูล Transportation and Logistics Tracking Dataset ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานด้านการขนส่งและโลจิสติกส์ จาก <https://www.kaggle.com/datasets/nicolemachado/transportation-and-logistics-tracking-dataset> มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และตัดสินใจเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการจัดส่งและเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้า ข้อมูลหลัก ดังนี้

1.3.1.1 ผลกระทบของการส่งมอบตรงเวลา (On-Time Delivery Impact) ข้อมูลที่จำแนกประเภทของการส่งมอบตามผลกระทบและนับจำนวนครั้งที่เกิดขึ้นในแต่ละประเภท

1.3.1.2 เส้นทางตามการให้คะแนน (Routes by Rating) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นทางและคะแนนที่ได้รับ เพื่อให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพของเส้นทาง

1.3.1.3 การให้คะแนนของลูกค้าและการส่งมอบตรงเวลา (Customer Ratings and On-Time Delivery) สำนวนความสัมพันธ์ระหว่างคะแนนของลูกค้ากับสถานะการส่งมอบตรงเวลา

1.3.1.4 เวลาในการจัดส่งที่มีและไม่มีจราจรติดขัด (Delivery Time with and Without Congestion) ข้อมูลเกี่ยวกับเวลาจัดส่งในเมืองต่าง ๆ ทั้งในสถานะที่มีและไม่มีจราจรติดขัด ช่วยให้วิเคราะห์ผลกระทบของความแออัดต่อประสิทธิภาพในการจัดส่ง

1.3.1.5 สภาพอากาศ (Weather Conditions) สรุปสภาพอากาศต่าง ๆ เช่น มีเมฆบางส่วน ฝนตกเล็กน้อยเป็นหย่อม ๆ มีฟ้าร้อง และมีแดดจัด

1.3.1.6 ความแตกต่างระหว่างเวลาจัดส่งแบบคงที่และแบบหลัก (Difference between Fixed and Main Delivery Times): เน้นความแตกต่างระหว่างเวลาจัดส่งที่กำหนดไว้กับเวลาจัดส่งหลักในภูมิภาคต่าง ๆ

1.3.2 งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการเตรียมข้อมูลแบบ Pipeline ที่ทำซ้ำได้ ครอบคลุมการจัดการค่าว่าง ค่าผิดปกติ การเข้ารหัส และการปรับสเกล โดยป้องกัน ข้อมูลรั่วไหล (data leakage) ระหว่างชุดฝึกและทดสอบ จากนั้นเปรียบเทียบแบบจำลอง Logistic Regression, Random Forest และ XGBoost โดยแบ่งข้อมูลแบบ Stratified Sampling และใช้ Cross-Validation 5-Fold (k=5) เพื่อประเมินความเสถียรของแบบจำลอง ภายใต้การควบคุมการสุ่ม (Random Seed = 42) เพื่อให้ผลลัพธ์สามารถทำซ้ำได้ งานวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมการวางแผนเส้นทางหรือระบบเพิ่มประสิทธิภาพเชิงปฏิบัติการอื่น ๆ

1.3.3 การประเมินโมเดลด้วย Accuracy, Precision, Recall, F1, ROC-AUC, PR-AUC และ Brier Score/Calibration รวมถึงการตรวจสอบความเสถียรของผลลัพธ์ด้วย Cross-Validation 5-Fold (ค่า F1-macro mean $\pm$ std) พร้อมทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Bootstrap CI, DeLong, McNemar) เพื่อยืนยันความแตกต่างระหว่างโมเดล รายงานผลในรูปแบบตารางและกราฟเพื่อการอ้างอิงเชิงปฏิบัติการ โดยไม่ครอบคลุมการนำขึ้นระบบจริงหรือการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทน

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1.4.1 H1: โมเดลที่เสนอเหนือกว่าบุคคลฐาน

$$H0: \Delta AUC_{\text{model}} - AUC_{\text{baseline}} \leq 0 \mid H1: \Delta AUC > 0$$

ตัดสินโดย: Bootstrap 95% CI ของ ΔAUC ; ปฏิเสธ $H0$ เมื่อทั้งช่วง > 0 (รายงาน F1/PR-AUC ประกอบ)

1.4.2 H2: โมเดลต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญด้าน AUC

$$H0: AUC_A = AUC_B \mid H1: AUC_A \neq AUC_B$$

ตัดสินโดย: DeLong (รายคู่: XGB-RF, XGB-LR, RF-LR) ปรับ p แบบ Holm-Bonferroni; ปฏิเสธ $H0$ เมื่อ $p_{\text{adj}} < 0.05$ และรายงาน $\Delta AUC + 95\% \text{ CI}$

1.4.3 H3: ความน่าเชื่อถือของความน่าจะเป็นดีขึ้นหลังปรับเทียบ

$$H0: \text{Brier}_{\text{post}} - \text{Brier}_{\text{pre}} \geq 0; \text{slope} / \text{Intercept} \text{ ไม่ดีขึ้น}$$

$$H1: \text{Brier} \text{ ลดลง (ค่าต่าง } < 0) \text{ และ slope } \rightarrow 1, \text{ intercept } \rightarrow 0$$

ตัดสินโดย: Bootstrap 95% CI ของ $(\text{Brier}_{\text{post}} - \text{Brier}_{\text{pre}})$ ปฏิเสธ $H0$ เมื่อทั้งช่วง > 0 (แนบ reliability diagram)

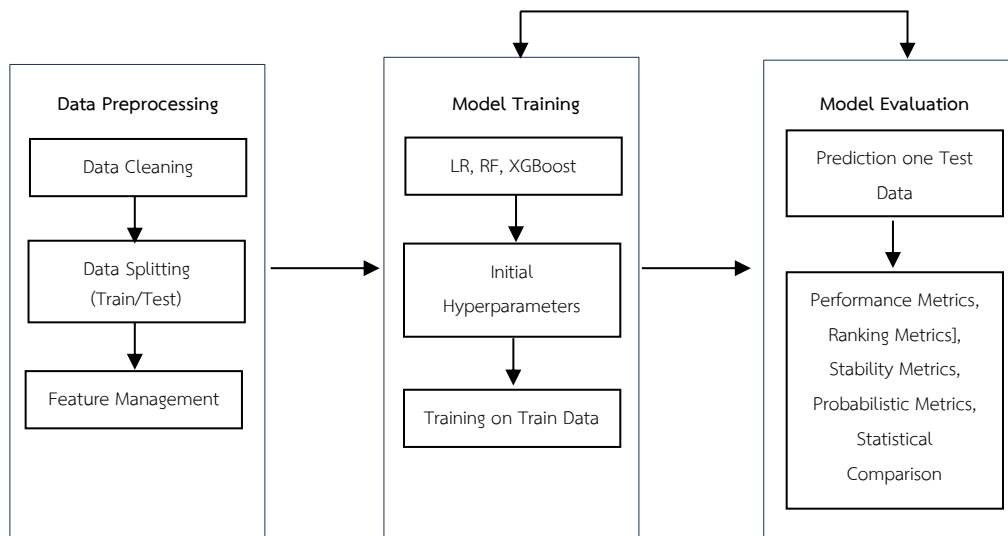
1.4.4 H4: ตัวแปรเวลา/สถานะมีอิทธิพลเด่น

$$H0: \text{Importance}_{\text{เวลา/สถานะ}} - \text{Importance}_{\text{อื่น}} \leq 0$$

$$H1: \text{ส่วนต่าง} > 0$$

ตัดสินโดย: Permutation (หรือ XGB) importance บนชุดทดสอบ + Bootstrap 95% CI ของส่วนต่าง; ปฏิเสธ $H0$ เมื่อทั้งช่วง > 0

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย



รูปภาพที่ 1 เฟรมเวิร์กการทำงานของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในการทำนายการจัดส่งสินค้าตรงเวลา

2. วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เพื่อการเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องในการทำนายการจัดส่งสินค้าตรงเวลา มีกระบวนการวิจัย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้ (รูปภาพที่ 1) [7], [8]

2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดข้อมูลเบื้องต้น

ขั้นตอนแรกของการวิจัยคือการจัดการกับข้อมูลดิบจากหลายแหล่ง ซึ่งอยู่ในรูปแบบ Excel multi-sheet กระบวนการนี้มุ่งเน้นที่การสร้างชุดข้อมูลที่สะอาดและครบถ้วนเพื่อเข้าสู่ Preprocessing Pipeline โดยเริ่มต้นจากการอ่านไฟล์ Transportation and Logistics Tracking Dataset_raw.xlsx ซึ่งประกอบด้วย 12 ชีต [9], [10]

2.1.1 กระบวนการทำความสะอาดและรวมข้อมูล ได้แก่ (1) การระบุและแปลงตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable): ตัวแปรเป้าหมายคือ On time Delivery โค้ดมีการแมปค่าจากคอลัมน์ที่มีคำว่า ontime/delay/status/delivery (เช่น ค่า "G" และ "R" ในชีต Primary data) ให้เป็นค่าตัวเลข: 0 (ส่งมอบตรงเวลา หรือ On time) และ 1 (ล่าช้า หรือ Delay) (2) การขจัดความซ้ำซ้อนและการล้างข้อมูล มีการลบแถวที่ซ้ำกัน (Drop Duplicates) ในแต่ละชีต และมีการกรองข้อมูลเพื่อให้มั่นใจว่ามีเพียงแถวที่มีค่าเป้าหมายเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ (3) การรวมชุดข้อมูล ข้อมูลที่ผ่านการทำความสะอาดจากทุกชีต (เช่น Primary data, Refined, Q1–Q10) ได้ถูกนำมารวมกันเป็นชุดข้อมูลเดียว ผลลัพธ์คือชุดข้อมูลรวมที่มีขนาด 6,866 แถว ชุดข้อมูลนี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีอัตราส่วนของตัวแปรเป้าหมาย: 1 (Delay) 4,318 แถว และ 0 (On time) 2,548 แถว

2.1.2 การแบ่งข้อมูลและการป้องกันการรั่วไหลของข้อมูล (Anti-Leakage Splitting) ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณลักษณะ (Feature Engineering) ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น ชุดฝึกฝน (Train Set) และ ชุดทดสอบ (Test Set) โดยใช้อัตราส่วน 80:20 ซึ่งเป็นหลักปฏิบัติเพื่อป้องกันการรั่วไหลของข้อมูล (Anti-leakage) สำหรับวิธีการแบ่งข้อมูลนั้นผู้วิจัยใช้วิธี Stratified Sampling เพื่อรักษาอัตราส่วนของตัวแปรเป้าหมาย (On time Delivery) ในทั้งสองชุดข้อมูล ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการจำแนกประเภท โดยได้สัดส่วนดังนี้ (1) ชุดฝึกฝน (Train Set): 5,492 แถว ($\approx 79.99\%$) และ (2) ชุดทดสอบ (Test Set): 1,374 แถว ($\approx 20.01\%$) ค่าสถิติทั้งหมดสำหรับการดำเนินการ Preprocessing (รวมถึงการลดหมวดหมู่หายาก, การเติมค่าว่าง (Impute) และการปรับสเกล (Scale)) จะถูกคำนวณจาก ชุด Train เท่านั้น และนำไปประยุกต์ใช้กับชุด Test

2.1.3 การจัดการคุณลักษณะ (Feature Management) คุณลักษณะที่ใช้ในการวิเคราะห์ถูกจัดเป็นสองประเภทหลักเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับขั้นตอน Preprocessing โดยดำเนินการตามหลักการ Anti-Leakage อย่างเคร่งครัด โดยใช้สถิติและ Mapping ที่คำนวณจาก ชุดฝึกสอน (Train Set) เท่านั้น มีดังนี้ (1) คุณลักษณะเชิงหมวดหมู่ (Categorical Features) ผู้วิจัยทำการรวมหมวดหมู่ที่พบน้อย (Rare Category Grouping) ข้อมูลจะถูกรวมหมวดหมู่ที่มีความถี่การปรากฏน้อยกว่า 20 ครั้ง ให้เป็นหมวดหมู่เดียวคือ "Other" โดยการคำนวณการรวมนี้จะทำบน ชุด Train เท่านั้นและนำไปใช้ (Apply) กับชุด Test สำหรับการเข้ารหัส (Encoding) ข้อมูลจะถูกแปลงโดยใช้เทคนิค One-Hot Encoding เพื่อเปลี่ยนหมวดหมู่ที่ไม่เป็นตัวเลขให้เป็นคุณลักษณะเชิงตัวเลข (Binary/Dummy) [12] (2) คุณลักษณะเชิงตัวเลข (Numeric Features) เริ่มจากการเติมค่าว่าง (Imputation) ข้อมูลจะผ่านขั้นตอน Impute เพื่อเติมค่าว่าง (NaN) ด้วย ค่ามัธยฐาน (Median) ที่คำนวณจากชุด Train เท่านั้น และการปรับสเกล (Scaling) ข้อมูลจะถูก

ปรับช่วงของค่าตัวเลขด้วยเทคนิค Standardization (StandardScaler) เพื่อให้คุณลักษณะเชิงตัวเลขทุกตัวมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 1 การปรับนี้ช่วยเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโมเดลเชิงเส้น เช่น Logistic Regression และ (3) การลดมิติ (Dimensionality Reduction) คุณลักษณะทั้งหมด (ที่ผ่านการเข้ารหัส ปรับสเกล และรวมถึงคุณลักษณะเชิงตัวเลข) จะถูกลดจำนวนลงโดยใช้เทคนิค SelectKBest (K-Best) ซึ่งเป็นวิธีการคัดเลือกคุณลักษณะตามเกณฑ์ทางสถิติ (F-Score) [13], [14] เพื่อเลือกเฉพาะคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์สูงสุดกับตัวแปรเป้าหมาย โดยเริ่มจากการตั้งค่าให้พยายามเลือกคุณลักษณะที่ดีที่สุดไว้สูงสุด 2,000 ตัว ($K_BEST = 2000$) หลังจากการคำนวณและคัดเลือกแล้ว ระบบได้ทำการเก็บคุณลักษณะที่มีประสิทธิภาพไว้จำนวน 465 คุณลักษณะ ซึ่งเป็นจำนวนคุณลักษณะที่ถูกคำนวณและคัดเลือกกว่าดีที่สุดที่เหลืออยู่ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อควบคุมปัญหา Overfitting ที่เกิดจากมิติข้อมูลที่สูงเกินไป และลดความซับซ้อนของโมเดลโดยไม่สูญเสียความสามารถในการทำนายที่สำคัญ

2.2 การสร้างแบบจำลองและการฝึกสอน

หลังจากที่คุณลักษณะทั้งหมดผ่านขั้นตอนการจัดการ (Feature Management) ทั้งการเข้ารหัส การปรับสเกล และการลดมิติอย่างเคร่งครัดตามหลักการ Anti-Leakage แล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการนำคุณลักษณะที่ผ่านการประมวลผลนี้มาใช้ในการสร้างและฝึกสอนแบบจำลองการจำแนกประเภท (Classification Models) งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองยอดนิยมสามประเภทเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายความตรงต่อเวลาในการจัดส่ง (On time Delivery) [15], [16], [17] คือ Logistic Regression (LR), Random Forest (RF), และ XGBoost ในขั้นตอนการฝึกสอนนี้ แบบจำลองแต่ละตัวจะถูกฝึกสอนโดยใช้ชุดข้อมูลฝึกสอน (X_train, y_train) ที่มีการกำหนด ไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้น (Initial Hyperparameters) ไว้ดังนี้

2.2.1 Logistic Regression ถูกกำหนดให้รอบการทำงานซ้ำสูงสุดที่ $max_iter=1000$ และใช้ $solver='liblinear'$

2.2.2 Random Forest กำหนดให้สร้างต้นไม้ตัดสินใจจำนวน $n_estimators=300$ ต้น และอนุญาตให้ต้นไม้เติบโตได้เต็มที่โดยไม่มีการจำกัดความลึก ($max_depth=None$)

2.2.3 XGBoost ถูกตั้งค่าด้วยจำนวนรอบการบูสต์ $n_estimators=400$, $learning_rate=0.08$, และจำกัดความลึกของต้นไม้ที่ $max_depth=6$

ในระหว่างการฝึกสอน โมเดลแต่ละตัวจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ภายใน (ค่าน้ำหนัก (Weights) สำหรับ LR หรือโครงสร้าง (Structure) สำหรับ RF และ XGBoost) ภายใต้ข้อจำกัดของไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นที่กำหนดไว้ เพื่อให้สามารถแยกแยะความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะกับตัวแปรเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด หลังจากการฝึกสอนเสร็จสิ้นโมเดลเหล่านี้จะพร้อมสำหรับการนำไปใช้ในการทำนายและประเมินผลในขั้นตอนถัดไป

2.3 การประเมินประสิทธิภาพ

หลังจากที่แบบจำลองทั้งสามได้รับการฝึกสอนอย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนที่ 2.2 แล้ว ขั้นตอนที่ 2.3 คือการนำแบบจำลองเหล่านี้มาทดสอบความสามารถในการทำนายกับ ชุดทดสอบ (X_test) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อนในระหว่างการฝึกสอน การวัดประสิทธิภาพจะดำเนินการโดยใช้ตัวชี้วัดที่หลากหลาย เพื่อให้เห็นภาพรวมของความสามารถของโมเดลในทุกมิติ โดยตัวชี้วัดหลักจะครอบคลุม ความแม่นยำและการจัดอันดับ ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall, และ F1-Score นอกจากนี้ ความสามารถในการจัดอันดับความน่าจะเป็นจะถูกวัดด้วย ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic – Area Under the Curve) และ PR-AUC (Precision-Recall – Area Under the Curve) ซึ่ง PR-AUC มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินประสิทธิภาพของการทำนายคลาสที่เป็นบวกในกรณีที่ข้อมูลมีความไม่สมดุลของคลาส จากนั้นใช้ Brier Score เป็นตัวชี้วัดเชิงความน่าจะเป็น เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างความน่าจะเป็นที่โมเดลทำนายได้กับผลลัพธ์จริง (Calibration) [18], [19], [20] เพื่อให้การประเมินผลมีความน่าเชื่อถือทางสถิติ จะมีการคำนวณช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% Confidence Interval) ของค่า ROC-AUC ด้วยวิธีการ Bootstrap รวมถึงมีการดำเนินการ Pairwise Significance Tests เช่น DeLong Test (สำหรับเปรียบเทียบ AUC) และ McNemar Test (สำหรับเปรียบเทียบ Accuracy) เพื่อพิสูจน์ว่าความแตกต่างของประสิทธิภาพระหว่างแต่ละโมเดลมีความนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ [21], [22], [23], [24]

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

3.1.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้งสาม ได้แก่ Logistic Regression (LR), Random Forest (RF) และ XGBoost (XGB) [25] ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าแบบจำลอง XGBoost แสดงประสิทธิภาพโดยรวมที่เหนือกว่าในทุกตัวชี้วัดสำคัญ โดยมีค่า Accuracy สูงสุด 0.9243 และ F1-Score สูงสุด 0.9411 ในขณะที่ Logistic Regression มี Accuracy ต่ำสุดที่ 0.9061 ในแง่ของความสามารถในการจัดอันดับ (Ranking Capability) ทุกโมเดลมีประสิทธิภาพสูงมาก โดยมีค่า ROC-AUC อยู่ในช่วง 0.9637–0.9667 (XGBoost) และมีช่วงความเชื่อมั่น (95% CI) [0.957–0.976] ซึ่งทับซ้อนกันสูง แสดงว่าความแตกต่างของ AUC ระหว่างโมเดลอาจไม่นัยสำคัญทางสถิติ

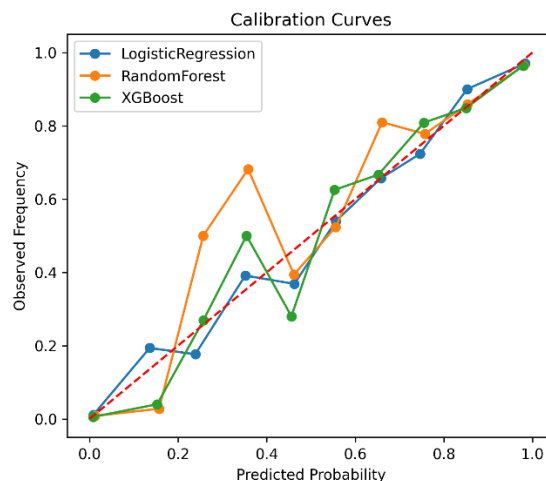
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตัวชี้วัด Precision-Recall AUC (PR-AUC) พบว่า Logistic Regression ให้ค่าที่สูงที่สุด (0.9762) ตามตารางที่ 1 ในขณะที่ XGBoost มี PR-AUC = 0.9743 ซึ่งแม้ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงมีประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุดในเชิง Accuracy และ F1-Score สะท้อนความสามารถในการจำแนกคลาสบวกได้ดีเยี่ยม

สำหรับการสอบเทียบความน่าจะเป็น (Calibration) พบว่า XGBoost มี Brier Score ต่ำที่สุด 0.0589 หมายความว่าค่าความน่าจะเป็นที่โมเดลทำนายออกมามีความคลาดเคลื่อนจากผลลัพธ์จริงน้อยที่สุด และมีการปรับเทียบความน่าจะเป็นได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับ RF และ LR โดยสรุป XGBoost มีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด ตามตัวชี้วัดหลัก แต่ Logistic Regression มี PR-AUC สูงสุด สะท้อนถึงสมดุลการแยกคลาสที่ดีในข้อมูลไม่สมดุล ส่วน Random Forest อยู่ในระดับกลาง ให้ความเสถียรและการสอบเทียบที่ดี

3.1.2 การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Significance Tests) ผลการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติแบบคู่ (Pairwise Significance Tests) ดังแสดงในตารางที่ 2 ชี้ให้เห็นว่า ในการเปรียบเทียบค่า ROC-AUC ด้วย DeLong Test ความแตกต่างระหว่างโมเดลทั้งหมดไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.99$) แสดงว่าประสิทธิภาพของโมเดลทั้งสามใกล้เคียงกันในเชิงพื้นที่ใต้กราฟ ROC

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความแม่นยำ (Accuracy) โดยใช้ McNemar Test พบว่า XGBoost มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับ Logistic Regression ($p = 0.0044$, $p < 0.05$) แสดงถึงความเหนือกว่าของ XGBoost ในการจำแนกข้อมูลอย่างถูกต้อง ส่วนคู่ RF-LR และ XGB-RF ไม่มีความแตกต่างเชิงนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับช่วง CI ของ AUC ที่ทับซ้อนกันสูง

3.1.3 กระบวนการสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) จากการพิจารณาแผนภาพ Calibration Plot (รูปที่ 2) พบว่า Random Forest และ XGBoost มีเส้นกราฟอยู่ใกล้เส้นตรงอุดมคติ (Ideal Line) มากกว่า Logistic Regression โดยเฉพาะ XGBoost ที่มีเส้นโค้งเกือบตรงกับเส้นอุดมคติ สะท้อนถึงความสามารถในการทำนายความน่าจะเป็นที่ถูกต้องและเชื่อถือได้มากกว่า ผลนี้สอดคล้องกับค่า Brier Score ที่ต่ำที่สุดของ XGBoost (0.0589) เมื่อเทียบกับ Random Forest (0.0625) และ Logistic Regression (0.0681) ยืนยันว่า XGBoost สามารถสอบเทียบค่าความน่าจะเป็นได้ดีที่สุด [26] ซึ่งมีความสำคัญต่อการประเมินความเสี่ยงและการตัดสินใจในระบบโลจิสติกส์จริง



รูปภาพที่ 2 แผนภาพ Calibration Plot เปรียบเทียบการสอบเทียบความน่าจะเป็นของแบบจำลองทั้งสามประเภท

ตารางที่ 1 แสดงผลลัพธ์ตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลักที่คำนวณจากชุดทดสอบ (Test Set) สำหรับแบบจำลองทั้งสามประเภท

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1	ROC_AUC	ROC_AUC_CI	PR_AUC	Brier
LogisticRegression	0.9061	0.8930	0.9664	0.9282	0.9637	[0.9550, 0.9720]	0.9761	0.0680
RandomForest	0.9170	0.9194	0.9513	0.9351	0.9654	[0.9570, 0.9740]	0.9749	0.0624
XGBoost	0.9243	0.9212	0.9618	0.9411	0.9667	[0.9570, 0.9760]	0.9743	0.0589

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

Comparison	DeLong p-value (AUC)	Statistical Significance (AUC)	McNemar p-value (Accuracy)	Statistical Significance (Accuracy)
LogisticRegression vs. RandomForest	0.9948	No ($p > 0.05$)	0.1422	No ($p > 0.05$)
LogisticRegression vs. XGBoost	0.9908	No ($p > 0.05$)	0.0044	Yes ($p < 0.05$)*
RandomForest vs. XGBoost	0.9959	No ($p > 0.05$)	0.1939	No ($p > 0.05$)

3.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

จากผลการทดลองเปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องทั้งสามประเภท ได้แก่ Logistic Regression (LR), Random Forest (RF) และ XGBoost (XGB) ภายใต้เงื่อนไขการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นเดียวกัน พบว่าแบบจำลอง XGBoost มีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด โดยมีค่า Accuracy = 0.9243, Precision = 0.9213, Recall = 0.9618, F1-Score = 0.9411, ROC-AUC = 0.9667 [0.957–0.976], PR-AUC = 0.9743 และ Brier Score = 0.0589 ซึ่งดีกว่า Random Forest (Brier = 0.0625) และ Logistic Regression (Brier = 0.0681) ทั้งนี้ เส้น Calibration Curve ของ XGBoost อยู่ใกล้เส้นอุดมคติ (Ideal Line) มากที่สุด สะท้อนให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของการทำนายความน่าจะเป็น (Probability Reliability) ที่ดีที่สุดในบรรดาโมเดลทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบ Precision-Recall AUC (PR-AUC) พบว่า Logistic Regression ให้ค่าที่สูงที่สุด (0.9762) ตามตารางที่ 1 ในขณะที่ XGBoost ให้ค่า PR-AUC = 0.9743 ซึ่งแม้ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย แต่ยังคงให้ผลโดยรวมดีที่สุดในด้านความแม่นยำ (Accuracy) และความสมดุลของการทำนาย (F1-Score) ผลนี้แสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของ Logistic Regression ในด้านการจำแนกคลาสบวกในชุดข้อมูลที่ไม่สมดุล แต่ XGBoost สามารถรักษาสสมดุลระหว่างการจำแนกและการสอบเทียบได้ดีกว่าโดยรวม การทดสอบทางสถิติด้วย DeLong Test สำหรับค่า ROC-AUC แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของผลลัพธ์ระหว่างโมเดลทั้งสาม ไม่นัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.99$) เนื่องจากช่วงความเชื่อมั่นของแต่ละโมเดลทับซ้อนกันสูง ขณะที่ผลการทดสอบด้วย McNemar Test พบความแตกต่างของอัตราความผิดพลาดระหว่าง Logistic Regression และ XGBoost อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.0044$, $p < 0.05$), ซึ่งยืนยันว่า XGBoost สามารถจำแนกตัวอย่างได้แม่นยำกว่า Logistic Regression ในเชิงสถิติจริง ส่วนคู่ RF-LR และ XGB-RF ไม่พบความแตกต่างเชิงนัยสำคัญ

ผลการตรวจสอบ Cross-Validation แบบ 5 เท่า (5-Fold) ยืนยันความเสถียรของแบบจำลอง โดยพบว่าโมเดลทั้งหมดมีค่า F1-macro variance < 0.02 , แสดงถึงความทั่วไป (Generalization) ที่ดี โดยเฉพาะ XGBoost ที่ให้ค่าเฉลี่ย F1-macro (CV mean = 0.9435 ± 0.0142) สูงสุด รองลงมาคือ Random Forest (0.9379 ± 0.0082) และ Logistic Regression (0.9310 ± 0.0103) ซึ่งสอดคล้องกับผลการประเมินบนชุดทดสอบ (Test set)

กล่าวโดยสรุป ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า XGBoost มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยรวม ทั้งในด้าน Accuracy, F1-Score, ROC-AUC, และ Brier Score ส่วน Logistic Regression แม้มีความแม่นยำต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ยังคงให้ค่า PR-AUC สูงสุด (0.9762) สะท้อนถึงความสามารถในการจัดการข้อมูลไม่สมดุลได้ดี ขณะที่ Random Forest มีความเสถียรสูงและผลการสอบเทียบความน่าจะเป็นที่ดี เหมาะสำหรับการใช้งานจริงที่ต้องการความเข้าใจง่ายและความสมดุลระหว่างความแม่นยำและการตีความผลลัพธ์

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินกระบวนการวิเคราะห์เชิงทำนาย (Predictive Pipeline) สำหรับการพยากรณ์การจัดส่งสินค้าตรงเวลา (On-Time Delivery: OTD) โดยอาศัยข้อมูลการขนส่งเชิงปฏิบัติการจากหลายแหล่งข้อมูล ซึ่งผ่านกระบวนการทำความสะอาดและเตรียมข้อมูลอย่างเป็นระบบ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของข้อมูล (Anti-Leakage Preprocessing) ก่อนนำเข้าสู่การเรียนรู้ของเครื่องสามรูปแบบ ได้แก่ Logistic Regression, Random Forest, และ XGBoost

ผลการทดลองชี้ว่าแบบจำลอง XGBoost มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงที่สุด โดยให้ค่า Accuracy = 0.9243, F1-Score = 0.9411, ROC-AUC = 0.9667 [0.957–0.976], PR-AUC = 0.9743, และ Brier Score = 0.0589 ซึ่งดีกว่า Random Forest (Brier = 0.0625) และ Logistic Regression (Brier = 0.0681) อย่างไรก็ตาม Logistic Regression ให้ค่า PR-AUC สูงสุด (0.9762) สะท้อนถึงความสามารถในการจำแนกคลาสบวกในชุดข้อมูลที่ไม่สมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Random Forest มีความเสถียรสูงและให้ผลการสอบเทียบความน่าจะเป็นที่ดี

การทดสอบเชิงสถิติยืนยันความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ โดย DeLong Test ระบุว่าค่าความแตกต่างของ ROC-AUC ระหว่างโมเดลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.99$) แต่ McNemar Test แสดงให้เห็นความแตกต่างของอัตราความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง Logistic Regression และ XGBoost ($p = 0.0044$, $p < 0.05$) ซึ่งยืนยันว่า XGBoost สามารถจำแนกข้อมูลได้แม่นยำกว่าในเชิงสถิติ นอกจากนี้การตรวจสอบ Cross-Validation แบบ 5 เท่า พบว่าโมเดลทั้งหมดมีค่า F1-macro variance < 0.02 , แสดงถึงความเสถียรและความทั่วไปของแบบจำลอง โดยเฉพาะ XGBoost ซึ่งให้ค่าเฉลี่ย F1-macro สูงสุด (0.9435 ± 0.0142)

โดยสรุป การวิจัยนี้พิสูจน์ให้เห็นว่า XGBoost เป็นแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสูงสุดสำหรับการพยากรณ์สถานะการจัดส่งสินค้าตรงต่อเวลา ทั้งในด้านความแม่นยำ การสอบเทียบความน่าจะเป็น และความเสถียรของผลลัพธ์ ส่วน Logistic Regression ยังคงมีจุดเด่นด้านการตีความผลลัพธ์และ PR-AUC ที่สูง เหมาะสำหรับการใช้งานในเชิงวิเคราะห์ ขณะที่ Random Forest มีความเสถียรดีและสามารถใช้เป็นทางเลือกที่สมดุลระหว่างความแม่นยำและความเข้าใจได้ง่าย

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงแนวทางที่เป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการโลจิสติกส์อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถต่อยอดสู่ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (DSS) แบบอัตโนมัติในองค์กร และเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนา ระบบพยากรณ์ความเสี่ยงด้านการขนส่งและการวางแผนเส้นทางอย่างชาญฉลาดในอนาคต

5. ข้อเสนอแนะ

โมเดล XGBoost แสดงความเหนือกว่าอย่างต่อเนื่องทั้งในแง่ของตัวชี้วัดประสิทธิภาพหลักและในแง่ของนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า XGBoost เป็นโมเดลที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้ทำนายความตรงต่อเวลาในการจัดส่งเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด ควรดำเนินการวิเคราะห์ คุณลักษณะสำคัญ (Feature Importance) ของโมเดล XGBoost ต่อไป เพื่อระบุปัจจัยขับเคลื่อนหลักจาก 465 คุณลักษณะที่ถูกคัดเลือก ซึ่งจะเป็นข้อมูลเชิงลึกที่นำไปสู่การกำหนดนโยบายการปฏิบัติงานที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการจัดส่งในโลกความเป็นจริง การประยุกต์ผลลัพธ์นี้สามารถใช้ร่วมกับระบบติดตามแบบเรียลไทม์ เพื่อสร้างโมดูลแจ้งเตือนการล่าช้าเชิงคาดการณ์ (Predictive Delay Alert) สำหรับผู้ประกอบการโลจิสติกส์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการพิจารณาบทความวิจัยทุกท่าน ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการตรวจสอบ ให้คำวิจารณ์ และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์และถูกต้องตามหลักวิชาการขอขอบพระคุณคณะผู้จัดงานประชุมวิชาการ ครั้งที่ ที่ได้กรุณาพิจารณาตอบรับผลงานวิจัยนี้เข้าร่วมนำเสนอและตีพิมพ์ ซึ่งถือเป็นเกียรติอย่างยิ่งและเป็นการยืนยันคุณภาพของงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบความดีงามและคุณประโยชน์อันเกิดจากงานวิจัยฉบับนี้แต่บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่เป็นแรงสนับสนุนทางด้านจิตใจและให้ความเข้าใจมาโดยตลอด

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Karl, A. A., Micheluzzi, J., Leite, L. R., & Pereira, C. R. (2018). *Supply chain resilience and key performance indicators: A systematic literature review*. *Production*, 28, e20180020. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180020>
- [2] Gabellini, M., Civolani, L., Calabrese, F., & Bortolini, M. (2024). *A Deep Learning Approach to Predict Supply Chain Delivery Delay Risk Based on Macroeconomic Indicators: A Case Study in the Automotive Sector*. *Applied Sciences*, 14(11), 4688. <https://doi.org/10.3390/app14114688>
- [3] Rokoss, A., Syberg, M., Tomidei, L., & Hülsing, C. (2024). *Case study on delivery time determination using a machine learning approach in small batch production companies*. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02290-2>
- [4] Dimitriadis, T., Fougner, E., Gneiting, T., & Hennig, C. (2021). *Stable reliability diagrams for probabilistic classifiers*. *PNAS*, 118(8), e2016191118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2016191118>
- [5] Dimitriadis, T., Gneiting, T., Jordan, A. I., & Vogel, P. (2024). *Evaluating probabilistic classifiers: The triptych*. *International Journal of Forecasting*, 40(3), 1101–1122. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2023.09.007>
- [6] DeLong, E. R., DeLong, D. M., & Clarke-Pearson, D. L. (1988). *Comparing the areas under two or more correlated ROC curves: A nonparametric approach*. *Biometrics*, 44(3), 837–845. <https://doi.org/10.2307/2531595>
- [7] Bruni, M. E., Iannucci, M., Berardi, P., & Beraldi, P. (2023). *A machine learning optimization approach for last-mile delivery*. *Computers & Operations Research*, 154, 106262. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106262>
- [8] Özark, S., Taşkın, Z. C., Uchoa, E., et al. (2024). *Machine learning for data-driven last-mile delivery optimization: The Amazon Last Mile Routing Research Challenge*. *Transportation Science*, 58(3), 823–846. <https://doi.org/10.1287/trsc.2022.0029>
- [9] Wang, K., Huang, Y., Chen, H., & Chen, Y. (2021). *An XGBoost-enhanced fast constructive algorithm for food-delivery route planning*. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 107029. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107029>

- [10] Salari, N., Karmarkar, U., & Van Mieghem, J. A. (2022). Real-time delivery time forecasting and promising in online retail. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24(6), 2970–2987. <https://doi.org/10.1287/msom.2022.1081>
- [11] Liu, S., Tong, Y., Wang, Y., & Zhou, Z. (2021). On-time last-mile delivery: Order assignment with travel-time prediction. *Management Science*, 67(12), 7413–7431. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2020.3741>
- [12] Steinberg, F., Brückner, M., & Kolisch, R. (2023). A novel machine learning model for predicting late supplier deliveries. *Supply Chain Analytics*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2023.100003>
- [13] Shi, R., Xu, X., Li, J., & Li, Y. (2021). Prediction and analysis of train arrival delay based on XGBoost and Bayesian optimization. *Applied Soft Computing*, 109, 107538. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107538>
- [14] Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree-boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD* (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- [15] Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [16] Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>
- [17] Brier, G. W. (1950). Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Monthly Weather Review*, 78(1), 1–3. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1950\)078](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1950)078)
- [18] Murphy, A. H. (1973). A new vector partition of the probability (Brier) score. *Journal of Applied Meteorology*, 12(4), 595–600. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1973\)012](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1973)012)
- [19] Zadrozny, B., & Elkan, C. (2002). Transforming classifier scores into accurate multiclass probability estimates. In *Proceedings of the ACM KDD 2002* (pp. 694–699). <https://doi.org/10.1145/775047.775151>
- [20] Lin, H.-T., Lin, C.-J., & Weng, R. C. (2007). A note on Platt’s probabilistic outputs for SVM classifier. *Machine Learning*, 68(3), 267–276. <https://doi.org/10.1007/s10994-007-5018-6>
- [21] Gneiting, T., & Raftery, A. E. (2007). Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 102(477), 359–378. <https://doi.org/10.1198/016214506000001437>
- [22] Davis, J., & Goadrich, M. (2006). The relationship between Precision-Recall and ROC curves. In *ICML 2006* (pp. 233–240). <https://doi.org/10.1145/1143844.1143874>
- [23] Hand, D. J. (2009). Measuring classifier performance: a coherent alternative to the AUC. *Pattern Recognition Letters*, 27(12), 1602–1612. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.04.009>
- [24] Chen, H., Lundberg, S. M., Erion, G., et al. (2022). Explaining a series of models by propagating Shapley values. *Nature Communications*, 13, 4269. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31384-3>
- [25] Reiners, R., Heidemann, J., & Ramirez, D. (2025). Lead time prediction for inventory optimization with machine learning. *Journal of Defense Modeling and Simulation* (Early Access). <https://doi.org/10.1177/10591478251328630>
- [26] Yong, T. K., Yu, H., Gopi, R., & Wu, Y. (2024). Prediction of rail transit delays with machine learning. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 31, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2024.100008>

การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของงานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่

Safety Risk Analysis of Large-Span Steel Structure Installation

สุวัจนรัตน์ จารุจารีตร¹ ทรงกฤต ตรีรัตน์พิจารณ์² วรานนท์ คงสง³ และ ชัยวัฒน์ ภู่วรกุลชัย⁴

^{1,2,3,4}สาขาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

¹E-mail: Suvajcharat.C@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของงานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ โดยมีมุ่งระบุปัจจัยเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนการติดตั้งและผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เพื่อนำไปสู่การกำหนดแนวทางลดความเสี่ยงและยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยทางวิศวกรรม โครงสร้างการวิจัยประกอบด้วย (1) การศึกษาปัจจัยทางวิศวกรรมและปัจจัยทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการติดตั้ง (2) การประเมินระดับความเสี่ยงของกิจกรรมหลัก และ (3) การสังเคราะห์เป็นคู่มือการปฏิบัติงานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีวิจัยใช้แนวทางแบบผสมผสาน (Mixed Research Methodology) เก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม การสัมภาษณ์เชิงลึก และการประเมินด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) โดยอ้างอิงแนวคิดการบริหารความเสี่ยง (Risk Management) ขั้นตอนการทำงาน (Method Statement) และลำดับการปฏิบัติงาน (Work Instruction; WI) กลุ่มตัวอย่างคือผู้เชี่ยวชาญจำนวน 12 คน ได้แก่ วิศวกรโครงสร้าง ผู้เชี่ยวชาญด้านงานก่อสร้าง และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยวิชาชีพ (จป.) ผลการวิจัยพบว่า กิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงสุดคือการติดตั้งค้ำยันชั่วคราว อยู่ในระดับ “สูงมาก” ขณะที่การผูกมัดชิ้นงาน การประกอบโครงสร้าง และการขันน็อต (ทั้ง Pre-torque และ Full-torque) อยู่ในระดับ “สูง” ส่วนการตรวจสอบแนวระดับ การตรวจคุณภาพงาน และการทำความสะอาดพื้นที่อยู่ในระดับ “ปานกลาง” การวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นว่า ระดับความเสี่ยงเชื่อมโยงอย่างมีนัยสำคัญกับความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์ ทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการปฏิบัติตามกฎหมายความปลอดภัยที่เกี่ยวข้อง จากผลดังกล่าว ผู้วิจัยได้จัดทำคู่มือการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมการวางแผนล่วงหน้า (Pre-task) การควบคุมระหว่างปฏิบัติงาน (On-task) และการตรวจสอบหลังการติดตั้ง (Post-task) เพื่อใช้เป็นแนวทางลดความเสี่ยงในโครงการก่อสร้างจริง และเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการพัฒนามาตรฐานด้านความปลอดภัยในอนาคต

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความเสี่ยง, โครงสร้างเหล็ก, การบริหารความเสี่ยง, ความปลอดภัยในงานก่อสร้าง

Abstract

This research aims to analyze safety risks in the installation of large-span steel structures by identifying critical risk factors during installation and the influence of environmental conditions. The objectives are (1) to investigate engineering and legal factors related to the installation process, (2) to evaluate the risk levels of key activities, and (3) to develop a practical installation manual for large-span steel structures. A mixed research methodology was employed, combining quantitative and qualitative approaches. Data were collected through questionnaires, in-depth interviews, and risk assessments using the Job Safety Analysis (JSA) technique, supported by concepts of risk management, method statements, and work instructions (WI). The sample consisted of 12 experts, including structural engineers, construction specialists, and professional safety officers. The findings indicate that the activity with the highest risk level is the installation of temporary bracing, classified as “very high risk.” Rigging and lifting, assembly of steel members, and bolt tightening (both pre-torque and full-torque) are categorized as “high risk,” while alignment checking, quality inspection, and site cleaning are classified as “moderate risk.” Safety risks are strongly associated with equipment readiness, worker skills and experience, and compliance with relevant safety regulations. Based on these results, a comprehensive installation manual was developed, covering pre-task planning, on-task control, and post-task inspection. The proposed framework provides practical guidance for minimizing risks in large-span steel structure projects and serves as a reference for future development of construction safety standards.

Keyword: Risk Analysis, Steel Structure, Job Safety Analysis, Construction Safety

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน การก่อสร้างอาคารและโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนมักนิยมใช้โครงสร้างเหล็กช่วงยาว (Large-Span Steel Structure) เนื่องจากมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรง รับน้ำหนักได้สูง และสามารถติดตั้งได้รวดเร็วเมื่อเทียบกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โครงสร้างประเภทนี้ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ เช่น สนามบินสุวรรณภูมิ ศูนย์ประชุมสิริกิติ์ และสถานีกกลางบางซื่อ ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มการใช้โครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้นในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม แม้โครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่จะมีข้อดีในเชิงวิศวกรรม แต่ขั้นตอนการติดตั้งกลับแฝงไว้ด้วยความเสี่ยงสูง ทั้งในด้านชีวิต ทรัพย์สิน และความล่าช้าของโครงการ ปัจจัยเสี่ยงเหล่านี้มักเกี่ยวข้องกับการยกติดตั้งชิ้นส่วนขนาดใหญ่ การทำงานในที่สูง และข้อจำกัดของเครื่องจักรยก เช่น Tower Crane หรือ Mobile Crane ซึ่งต้องมีการควบคุมความปลอดภัยอย่างเข้มงวดตามมาตรฐานของ American Society of Mechanical Engineers (ASME B30.3) [1] และแนวทางของ International Organization for Standardization (ISO 12480-1) [2] จากสถิติอุบัติเหตุในประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2559–2567 พบเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งโครงสร้างเหล็ก เช่น การล้มของปั้นจั่น การตกของชิ้นงาน หรือการพังถล่มของโครงสร้างชั่วคราว รวมแล้วกว่า 20 เหตุการณ์ (ThaiPBS, 2559; Matichon, 2559; Sanook, 2561; Thairath, 2566; Kaohoon, 2567) ซึ่งสะท้อนถึงช่องว่างของมาตรการควบคุมความเสี่ยงที่ยังไม่เป็นระบบเพียงพอ การศึกษางานวิจัยก่อนหน้า เช่น การประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างเหล็กโดยใช้วิธี Universal Matrix of Risk Analysis (UMRA) [3] และงานของ Wu et al. (2023) ที่ใช้เทคโนโลยี BIM และทฤษฎี Dempster–Shafer (DS) ในการประเมินความเสี่ยง [4] ล้วนแสดงให้เห็นความจำเป็นของการใช้ระบบวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงวิทยาศาสตร์ในงานก่อสร้าง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความเสี่ยงในขั้นตอนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ เพื่อระบุอันตราย ประเมินระดับความเสี่ยง และเสนอแนวทางจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานที่สามารถนำไปใช้จริงในโครงการก่อสร้าง เพื่อยกระดับความปลอดภัยและมาตรฐานการบริหารความเสี่ยงในอุตสาหกรรมก่อสร้างของไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- (1) เพื่อศึกษาปัจจัยทางกฎหมายและ ปัจจัยทางวิศวกรรมของกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่
- (2) เพื่อประเมินความเสี่ยงในการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่
- (3) เพื่อเสนอการจัดทำคู่มือการติดตั้งการทำงานการปฏิบัติงานการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

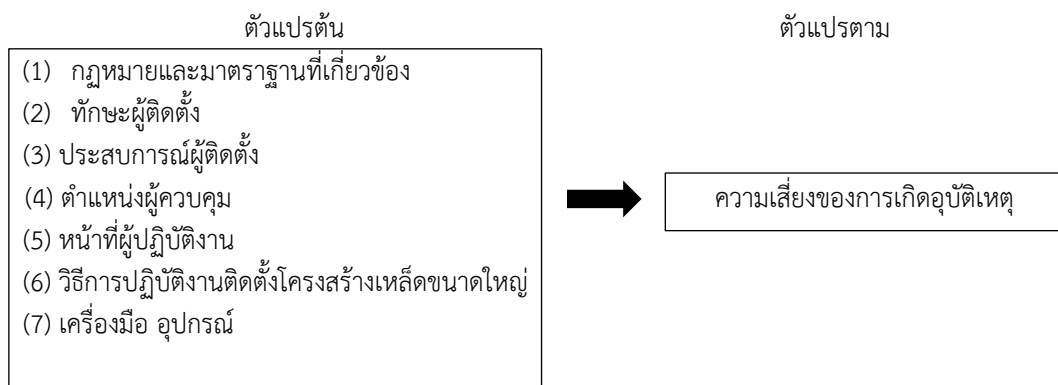
ขอบเขตของการวิจัยครอบคลุมงานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ในโครงการก่อสร้างอาคารมหรสพขนาดใหญ่ โดยพิจารณากระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กที่มีช่วงกว้างมากกว่า 50 เมตร ซึ่งตามนิยามของ IABSE และ Eurocode 2 ถือเป็นโครงสร้างช่วงยาว (Long Span Structure) [6], [7] รวมถึงกิจกรรมหลัก เช่น ค้ายันชั่วคราว การยก การผูกมัด การประกอบ การขันน็อต และการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งเป็นกิจกรรมที่มีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน

1.4 คำจำกัดความ

งานติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่มีความเสี่ยงจากการปฏิบัติงานในระดับสูงที่ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหรือล่าช้าในแผนงานก่อสร้าง

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

กรอบแนวคิดของการวิจัยนี้พัฒนาขึ้นจากหลักการบริหารความเสี่ยง (Risk Management Process) และแนวคิดการประเมินความปลอดภัยในงานก่อสร้าง โดยมุ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางกฎหมาย ทางวิศวกรรมและบุคลากรที่ส่งผลต่อระดับความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุในกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่



โดยใช้กระบวนการประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) และการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อเชื่อมโยงข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญและแบบสอบถามเชิงปริมาณเข้าด้วยกัน เพื่อระบุปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระดับความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนการติดตั้ง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Research Methodology) โดยใช้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ครอบคลุมและสะท้อนสภาพจริงของกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก

2.1 ประเภทการวิจัย การวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบผสมผสาน (Mixed Research Methodology) ประกอบด้วยการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมและสะท้อนความเป็นจริงของกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่

2.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มตัวอย่างได้แก่ ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมโครงสร้าง ผู้ควบคุมงานก่อสร้าง และเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยวิชาชีพ (จป.) รวมทั้งสิ้น 12 คน ซึ่งคัดเลือกโดยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จากโครงการก่อสร้างอาคารมหรสพขนาดใหญ่ที่มีการติดตั้งโครงสร้างเหล็กช่วงกว้างมากกว่า 50 เมตร

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย

- 1.แบบฟอร์มการประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) ร่วมกับ Method Statement
- 2.แบบประเมินความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยทางวิศวกรรมและกฎหมายที่มีผลต่อความเสี่ยงและ แบบสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) เพื่อเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพเกี่ยวกับแนวทางป้องกันอุบัติเหตุและข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ

2.4 การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการในโครงการก่อสร้างอาคารมหรสพขนาดใหญ่แห่งหนึ่งในเขตกรุงเทพมหานคร โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือน เมษายน -กันยายน พ.ศ.2568 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการติดตั้งโครงสร้างเหล็กช่วงกว้างมากกว่า 50 เมตรอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถสะท้อนสภาพการทำงานจริงในหน้างานได้อย่างครบถ้วน

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลเชิงปริมาณถูกวิเคราะห์โดยใช้ Job Safety Analysis (JSA), Engineering Risk, สถิติเชิงพรรณนา (ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและกิจกรรมเสี่ยง ขณะที่ข้อมูลเชิงคุณภาพถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อสังเคราะห์แนวทางและข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเสี่ยง และนำผลทั้งสองส่วนมาบูรณาการเพื่อจัดทำคู่มือการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่

2.6 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

(1) ศึกษาวรรณกรรมและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ศึกษาเอกสารด้านการบริหารความเสี่ยง มาตรฐานงานโครงสร้างเหล็ก และกฎหมายด้านความปลอดภัย เช่น ASME B30.3, ISO 12480-1 และกฎกระทรวงที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาจัดทำกรอบแนวคิดและโครงสร้างแบบฟอร์ม JSA

(2) กำหนดตัวแปรและจัดทำเครื่องมือวิจัย กำหนดตัวแปรทางวิศวกรรมและกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยง จากนั้นจัดทำแบบสอบถามประเมินความสำคัญของปัจจัย และแบบฟอร์ม JSA สำหรับกิจกรรมหลักในการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่

(3) คัดเลือกกลุ่มตัวอย่างและเก็บรวบรวมข้อมูล คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญด้วยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 12 คน ดำเนินการเก็บข้อมูลผ่านแบบสอบถามและการสัมภาษณ์เชิงลึก พร้อมทั้งรวบรวมเอกสารประกอบ เช่น แบบฟอร์มประเมินความเสี่ยงในโครงการจริง

(4) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) และสถิติเชิงพรรณนา (ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยและระดับความเสี่ยงของแต่ละกิจกรรม จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) เพื่อสังเคราะห์แนวทางควบคุมความเสี่ยง

(5) สังเคราะห์ผลและจัดทำคู่มือการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ นำผลการวิเคราะห์จากทั้งสองส่วนมาบูรณาการ เพื่อจัดทำคู่มือการติดตั้งที่ครอบคลุมระยะ Pre-task, On-task และ Post-task พร้อมเชื่อมโยงกับกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ผลการวิจัยครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์ความเสี่ยงของกิจกรรมในการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ โดยใช้ข้อมูลจากแบบสอบถาม การสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ และการประเมินด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) เพื่อตีความระดับความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอน และสังเคราะห์แนวทางการจัดทำคู่มือควบคุมความปลอดภัย ผลการวิเคราะห์สามารถสรุปและอภิปรายได้ดังนี้

3.1 ปัจจัยทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยง จากการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ พบว่าปัจจัยด้านกฎหมายมีอิทธิพลอย่างมากต่อระดับความเสี่ยงในกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ โดยเฉพาะการปฏิบัติตามข้อกำหนดของ พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554 รวมถึง กฎกระทรวงกำหนดมาตรฐานด้านความปลอดภัยเกี่ยวกับเครื่องจักร บันจัน และหม้อน้ำ พ.ศ. 2552 และ กฎกระทรวงความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง พ.ศ. 2564 [7-10] ผลการวิเคราะห์ แบบสอบถามแสดงให้เห็นว่า ผู้ตอบแบบสอบถามกว่า 80% เห็นว่า “การไม่ปฏิบัติตามกฎหมายความปลอดภัย และข้อกำหนดการตรวจสอบอุปกรณ์” เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุระหว่างการติดตั้ง โดยเฉพาะในส่วนของ การตรวจสอบ บันจัน (Crane Inspection) และ การอบรมผู้ควบคุมเครื่องจักรตามกฎหมายแรงงาน การขาดการบังคับใช้มาตรการตามกฎหมายดังกล่าวอาจนำไปสู่การละเลยมาตรฐานความปลอดภัย เช่น การใช้ Tower Crane ที่ไม่ได้ตรวจสอบตามระยะ การละเมิดเขตหวงห้าม หรือการอนุญาตให้บุคลากรที่ไม่มีใบรับรองปฏิบัติงานในพื้นที่เสี่ยง ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของ ASME B30.3–2019 [1] ที่ระบุให้มีระบบตรวจสอบและรับรองผู้ควบคุมเครื่องจักรอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันอุบัติเหตุจากความบกพร่องของมนุษย์และเครื่องมือ ผลการวิเคราะห์ชี้ว่า การเสริมสร้างความรู้ด้านกฎหมายให้กับผู้ควบคุมงานและผู้ปฏิบัติงานเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจาก “กฎหมาย” ไม่เพียงเป็นข้อบังคับ แต่เป็นแนวทางเชิงป้องกันที่ช่วยลดความสูญเสียได้จริงในภาคสนาม

ปัจจัยทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยง จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและการสัมภาษณ์ พบว่า เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้ง (ค่าเฉลี่ย 4.67, S.D. 0.48) ทักษะของผู้ติดตั้ง (ค่าเฉลี่ย 4.58, S.D. 0.51) ประสิทธิภาพของผู้ติดตั้งและผู้ควบคุมงาน (ค่าเฉลี่ย 4.55, S.D. 0.53) ผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่เห็นตรงกันว่า “การขาดความพร้อมของเครื่องมือ” เช่น สลิงที่ไม่ได้ตรวจสอบแรงดึง, Torque Wrench ที่ไม่ได้สอบเทียบ, หรือ Lifting Beam ที่ออกแบบไม่เหมาะสม เป็นสาเหตุหลักที่เพิ่มโอกาสการเกิดอุบัติเหตุในงานติดตั้ง นอกจากนี้ยังพบว่าทักษะของผู้ติดตั้งมีผลโดยตรงต่อความถูกต้องของกระบวนการ เช่น การผูกมัด การยก และการขันน็อต ซึ่งหากปฏิบัติไม่ถูกต้องอาจทำให้โครงสร้างบิดตัวหรือหลุดจากตำแหน่งได้ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ ประกายพล พันธวิเศษ [13] ที่ระบุว่าการขาดความพร้อมของอุปกรณ์และทักษะของแรงงานเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้กิจกรรม “การผูกมัดชิ้นงานและการติดตั้งในที่สูง” มีระดับความเสี่ยงสูงที่สุด ในเชิงเปรียบเทียบ ผลการวิจัยนี้ยังสนับสนุนแนวคิดของ Wu et al. (2023) [4] และ Chen et al. (2024) [5] ที่เสนอว่าการประเมินความเสี่ยงในงานก่อสร้างขนาดใหญ่ต้องพิจารณา “ความเชื่อมโยงระหว่างปัจจัยมนุษย์ (Human Factors)” และ “ความสมบูรณ์ของเครื่องจักรและอุปกรณ์ (Equipment Reliability)” ควบคู่กัน เพื่อให้สามารถจัดการความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 ระดับความเสี่ยงของกิจกรรมการติดตั้ง จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Job Safety Analysis (JSA) พบว่า กิจกรรมที่มีระดับความเสี่ยง “สูงมาก” ($R = 9$) ได้แก่ การติดตั้งค้ำยันชั่วคราว (Temporary Bracing Installation) ซึ่งเป็นกิจกรรมที่มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของโครงสร้าง หากดำเนินการไม่ถูกต้องอาจทำให้โครงสร้างล้ม หรือเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ กิจกรรมที่อยู่ในระดับความเสี่ยง “สูง” ($R = 4-6$) ได้แก่ การผูกมัดและยกชิ้นงาน การประกอบชิ้นส่วนโครงสร้าง และการขันน็อต (ทั้ง Pre-torque และ Full-torque) ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในที่สูง การยกวัสดุที่มีน้ำหนักมากและการใช้เครื่องมือที่ต้องควบคุมแรงบิดอย่างแม่นยำ ในขณะที่กิจกรรมที่อยู่ในระดับ “ปานกลาง” ($R = 1-3$) ได้แก่ การตรวจสอบแนวระดับ การตรวจคุณภาพงาน (QA/QC) และการทำความสะอาดพื้นที่ ซึ่งเป็นกิจกรรมช่วงท้ายของกระบวนการติดตั้งที่มีความเสี่ยงลดลงเมื่อมีการควบคุมที่เหมาะสมผลดังกล่าวสอดคล้องกับมาตรฐานของ OSHA [14] ที่ระบุว่าการยก “Lifting and Rigging” เป็นกลุ่มงานที่มีอัตราอุบัติเหตุร้ายแรงสูงสุดในอุตสาหกรรมโครงสร้างเหล็ก

ตารางที่ 1 ระดับความรุนแรง (Severity)

ระดับ	คำอธิบาย	รายละเอียด
3	รุนแรงมากที่สุด (Catastrophic)	เสียชีวิต, พิการถาวร, ความเสียหายรุนแรงมาก, หยุดโครงการทั้งหมด
2	รุนแรงมาก (Major)	บาดเจ็บรุนแรง, เข้าโรงพยาบาล, หยุดงานหลายวัน
1	ปานกลาง (Moderate)	บาดเจ็บเล็กน้อย, ต้องปฐมพยาบาล, ความเสียหายปานกลาง

ตารางที่ 2 ระดับโอกาสเกิด (Likelihood)

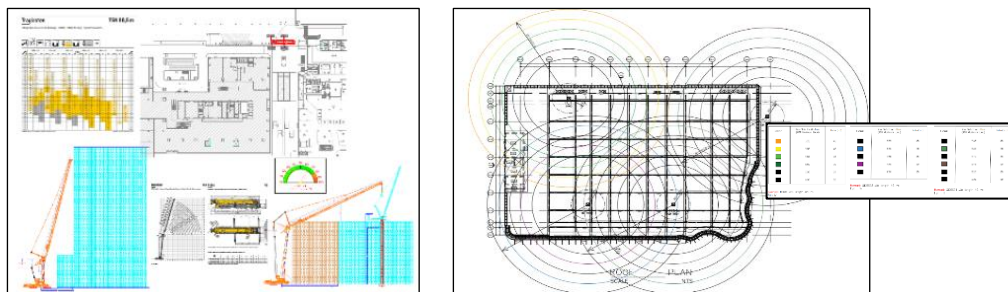
ระดับ	คำอธิบาย	โอกาสเกิด
3	เกิดขึ้นแน่นอน (Almost Certain)	เกิดขึ้นทุกวัน, เคยเกิดซ้ำในโครงการเดียวกันหลายครั้ง
2	น่าจะเกิด (Likely)	เกิดบ่อยในลักษณะงานเดียวกัน
1	อาจเกิด (Possible)	มีโอกาสเกิด, เคยเกิดในโครงการอื่น

ตารางที่ 3 รายละเอียดของระดับความรุนแรง

โอกาสLikelihood	ระดับความรุนแรงของผลกระทบจากเหตุการณ์(Severity)		
	1	2	3
3	สูง	สูงมาก	สูงมาก
2	สูง	สูง	สูงมาก
1	ปานกลาง	สูง	สูง

3.3 การสังเคราะห์แนวทางจัดทำคู่มือความปลอดภัยในการติดตั้ง จากการสัมภาษณ์เชิงลึกและการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) ผู้เชี่ยวชาญเสนอให้มี “คู่มือการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่” ที่ครอบคลุมทุกขั้นตอนของกระบวนการ โดยแบ่งเป็น 3 ระยะหลัก

Pre-task: การเตรียมการก่อนปฏิบัติงาน เช่น การจัดทำ Lifting Plan การตรวจสอบเครื่องมืออุปกรณ์ และการอบรมชี้แจงความปลอดภัย (Toolbox Meeting) ภาพ1. ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ธิดาพร บุญรักษ์ (2565) [12]



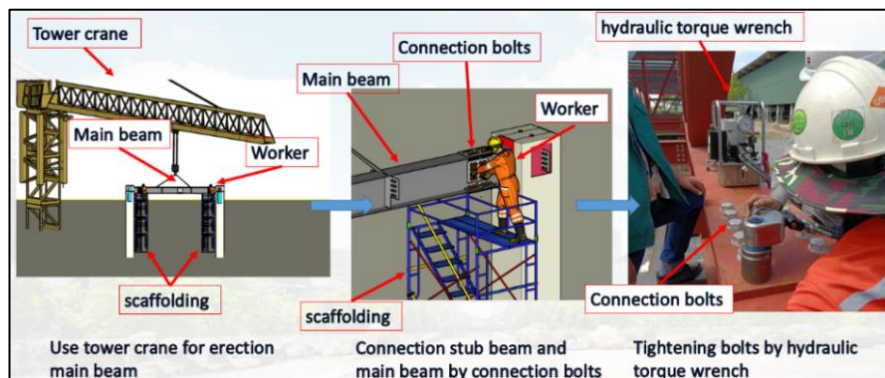
ภาพ1. Mobile Crane Capacity Chart และ Tower Crane Capacity Chart

On-task: การควบคุมระหว่างปฏิบัติงาน เช่น การใช้เครื่องมือที่ผ่านการสอบเทียบ การติดตั้งอุปกรณ์กันตก การผูกมัดชิ้นงาน ภาพ2. การตรวจสอบแรงบิด และการมาร์คจุด Bolt ที่ขันแล้ว



ภาพ2. การจำลองการติดตั้งอุปกรณ์กันตก และ การผูกมัดชิ้นงาน

Post-task: การตรวจสอบหลังการติดตั้ง เช่น การตรวจสอบ QA/QC การทดสอบแรงบิด (Torque Test) ภาพ3. และการบันทึกผลการตรวจสอบในแบบฟอร์มส่งมอบงาน



ภาพ3. การทดสอบการติดตั้ง และการทดสอบแรงบิด (Torque Test)

คู่มือดังกล่าวช่วยให้การติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ดำเนินไปอย่างปลอดภัย มีมาตรฐาน และลดความเสี่ยงของอุบัติเหตุจากความผิดพลาดของมนุษย์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการจัดการความปลอดภัยในงานก่อสร้างตามมาตรฐาน ISO 12480-1 [2] และแนวคิด Risk Management Process ของ Wu et al. [4] ที่เน้นการประเมินและควบคุมความเสี่ยงในทุกขั้นตอนของกระบวนการทำงาน

3.4 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เมื่อเปรียบเทียบผลการประเมินความเสี่ยงจากการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ในงานวิจัยฉบับนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีทั้งส่วนที่สอดคล้องและแตกต่างกัน ดังสรุปในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการประเมินความเสี่ยงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ขอบเขตโครงสร้าง / กิจกรรมหลัก	วิธีประเมินความเสี่ยง	กิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงสุด	ข้อสังเกตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้
UMRA (2015) [3]	งานโครงสร้างเหล็กทั่วไปในโครงการอาคาร	UMRA + RPN	งานยกติดตั้งและทำงานที่สูง	สอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ที่พบว่า การยกและผูกมัดชิ้นงานเป็นกิจกรรมที่มีระดับความเสี่ยง “สูง”
Wu et al. (2023) [4]	งานอุโมงค์ใต้อาคารฝัง ใช้ BIM + DS Theory	BIM-based Risk Assessment	การทำงานในพื้นที่คับแคบและใกล้โครงสร้างเดิม	แม้โครงสร้างต่างกัน แต่ยืนยันบทบาทของปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมต่อระดับความเสี่ยง
ประกายพลฯ (2566) [13]	งานติดตั้งโครงสร้างเหล็กรูปพรรณระบบสลักเกลียว	JSA	การผูกมัดชิ้นงานและทำงานในที่สูง	สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่จัดให้การผูกมัดชิ้นงานอยู่ในระดับความเสี่ยง “สูง”
งานวิจัยนี้	งานติดตั้งโครงสร้างเหล็กช่วงกว้าง > 50 ม.	JSA + RA + Content Analysis	การติดตั้งค้ำยันชั่วคราว	เพิ่มน้ำหนักให้กับบทบาทของโครงสร้างชั่วคราว (Temporary Support) ในฐานะกิจกรรมวิกฤตที่สุด

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ผลการวิจัยฉบับนี้มีความสอดคล้องกับงาน UMRA (2015) [3] และงานของประกายพล พันธ์วิเศษ (2566) [13] ในประเด็นที่ว่า กิจกรรมยก-ผูกมัดชิ้นงานและการทำงานในที่สูงเป็นกลุ่มงานที่มีระดับความเสี่ยงสูง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญเพิ่มเติมกับ “การติดตั้งค้ำยันชั่วคราว” ซึ่งถูกจัดให้อยู่ในระดับความเสี่ยงสูงที่สุด (R = 9) เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของโครงสร้างตลอดช่วงการติดตั้ง ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า ในโครงสร้างช่วงกว้างมากกว่า 50 เมตร บทบาทของโครงสร้างชั่วคราวมีความสำคัญมากกว่างานเหล็กทั่วไป และควรถูกบูรณาการเข้าไปในมาตรฐานการควบคุมความปลอดภัยอย่างชัดเจน

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยทางวิศวกรรมและกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ ประเมินระดับความเสี่ยงของกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง และสังเคราะห์แนวทางจัดทำคู่มือการปฏิบัติงานติดตั้งอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงมากที่สุด ได้แก่ ความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์ ทักษะของผู้ติดตั้ง และการปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านกฎหมายความปลอดภัย ซึ่งได้รับการประเมินให้อยู่ในระดับ “สูงมาก” สำหรับกิจกรรมในกระบวนการติดตั้ง พบว่า การติดตั้งค้ำยันชั่วคราว เป็นกิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงสุด เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ส่งผลโดยตรงต่อเสถียรภาพของโครงสร้างในระยะเริ่มต้น ขณะที่กิจกรรมอื่น เช่น การผูกมัดชิ้นงาน การประกอบ และการขันนอต จัดอยู่ในระดับความเสี่ยง “สูง” ส่วนกิจกรรมตรวจสอบและเก็บงานอยู่ในระดับ “ปานกลาง” การจัดทำคู่มือการติดตั้งควรครอบคลุมทั้ง การวางแผนล่วงหน้า (Pre-task), การควบคุมระหว่างการทำงาน (On-task), และการตรวจสอบหลังการติดตั้ง (Post-task) โดยบูรณาการมาตรการด้านเทคนิค กฎหมาย และการจัดการบุคลากรเข้าด้วยกัน เพื่อช่วยลดความเสี่ยง ป้องกันอุบัติเหตุ และยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยในงานก่อสร้างโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Kolesnichenko et al. [11] ซึ่งเสนอให้ประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างเหล็กโดยคำนึงถึงข้อบกพร่องที่ตรวจพบและยังไม่ได้ตรวจพบ (Detected and Non-Detected Imperfections) ผ่านการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Analysis) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสามารถเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม และการกำหนดแนวทางเชิงนโยบายเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทยในอนาคต สร้างวัฒนธรรมความปลอดภัยอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรมของ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในเชิงนโยบาย ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่า หน่วยงานภาครัฐและองค์กรวิชาชีพด้านวิศวกรรมควรพิจารณานำแนวทางการประเมินความเสี่ยงและคู่มือการติดตั้งที่พัฒนาขึ้นไปใช้เป็นต้นแบบในการกำหนดมาตรฐานการทำงานสำหรับโครงสร้างเหล็กช่วงกว้าง โดยเฉพาะการกำหนดให้มีการจัดทำ JSA และ Lifting Plan ที่ครอบคลุมโครงสร้างชั่วคราวทุกกรณี ตลอดจนการกำหนดให้การจัดตั้งค้ำยันชั่วคราวและการยก-ผูกมัดชิ้นงานเป็น “กิจกรรมเสี่ยงสูง” ที่ต้องได้รับการควบคุมพิเศษ การนำข้อเสนอเชิงระบบเหล่านี้ไปปรับใช้จะช่วยยกระดับวัฒนธรรมความปลอดภัยในอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย และลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงในโครงการโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ในระยะยาว

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

1. ควรนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ในการจัดทำ คู่มือความปลอดภัยสำหรับการติดตั้งโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ โดยเฉพาะในกิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูง เช่น การติดตั้งค้ำยันชั่วคราว และการยก-ผูกมัดชิ้นงาน
2. ควรมีการอบรมและจัด Toolbox Meeting ก่อนเริ่มงานทุกครั้ง เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจขั้นตอน วิธีควบคุมความเสี่ยง และมาตรการป้องกันอุบัติเหตุ
3. ผู้รับเหมาและผู้ควบคุมงานควรจัดให้มี การตรวจสอบเครื่องมือและอุปกรณ์เป็นประจำ โดยเฉพาะอุปกรณ์ยก สลิง และอุปกรณ์กันตก เพื่อให้มั่นใจว่ามีความพร้อมและได้มาตรฐาน
4. หน่วยงานรัฐและสมาคมวิชาชีพ ควรสนับสนุนให้มีการกำหนด มาตรฐานการติดตั้งโครงสร้างเหล็กช่วงกว้าง ที่ชัดเจน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์กลางในโครงการขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ควรขยายการศึกษาไปยัง กลุ่มตัวอย่างที่กว้างขึ้น เช่น เจ้าของโครงการ ผู้รับเหมา และแรงงานก่อสร้าง เพื่อสะท้อนมุมมองที่ครอบคลุมมากขึ้น
2. ควรทำการวิจัยเชิงเปรียบเทียบระหว่าง โครงสร้างเหล็กขนาดกลางและขนาดใหญ่ หรือระหว่างโครงการที่ใช้ Tower Crane กับ Mobile Crane เพื่อศึกษาความแตกต่างด้านความเสี่ยง
3. ควรพัฒนา เครื่องมือดิจิทัลสำหรับการประเมินความเสี่ยง เช่น IoT Sensor ตรวจจับแรงบิด, ระบบแจ้งเตือนอัตโนมัติ หรือแบบจำลอง 3D Simulation เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดข้อผิดพลาดจากการประเมินแบบดั้งเดิม
4. ในอนาคตควรศึกษา การบูรณาการระบบการจัดการความปลอดภัย (Safety Management System: SMS) เข้ากับงานติดตั้งโครงสร้างเหล็ก เพื่อสร้างแนวทางที่สอดคล้องทั้งระดับโครงการและระดับองค์กร

6. กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระเรื่อง "การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของงานติดตั้งโครงสร้างหลังคาเหล็กขนาดใหญ่" ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาของ อาจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ ภูวรกุลชัย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำและช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการศึกษา ทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สมบูรณ์และบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง ขอขอบพระคุณกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรานนท์ คงสง ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีขอขอบพระคุณท่านเจ้าของโครงการก่อสร้างที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลการวิจัยนอกจากนี้ขอขอบพระคุณ เพื่อนร่วมรุ่นและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษา ค้นคว้าในครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของข้าพเจ้าจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี สุดท้ายขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้เข้ามาศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมเพื่อประโยชน์ในการนำไปพัฒนาตัวเองและประเทศชาติในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society of Mechanical Engineers (ASME). (2019). *ASME B30.3—Tower Cranes (Revision of ASME B30.3–2016)*. New York: ASME.
- [2] International Organization for Standardization (ISO). (1998). *Cranes — Safe Use — Part 1: General (ISO 12480-1:1998)*. Geneva: ISO.
- [3] ResearchGate. (2015). *Risk Analysis of Steel Construction Projects Using the Universal Matrix of Risk Analysis (UMRA) and Risk Priority Number (RPN)*.
- [4] Wu, P., Yang, L., Li, W., Huang, J., & Xu, Y. (2023). *Construction Safety Risk Assessment and Early Warning of Nearshore Tunnel Based on BIM Technology*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(8), 1537.
- [5] Chen, J., Zhou, L., Liu, Y., & Wang, Y. (2024). *A Safety Risk Analysis of a Steel-Structure Building Using an Improved Controlled Interval and Memory Model*. *Applied Sciences*, 14(5).
- [6] IABSE Task Group 3.1. (1991). *Long Span Structures*. Zurich: International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [7] European Committee for Standardization (CEN). (2005). *EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels: CEN.
- [8] ราชกิจจานุเบกษา. (2554). พระราชบัญญัติความปลอดภัย อาชีวอนามัย และ สภาพแวดล้อมในการทำงาน พ.ศ. 2554. กรุงเทพฯ: สำนักนายกรัฐมนตรี.
- [9] ราชกิจจานุเบกษา. (2552). กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐาน ในการบริหาร และ การจัดการ ด้านความปลอดภัย เกี่ยวกับ เครื่องจักร บันจัน และ หม้อน้ำ พ.ศ. 2552. กรุงเทพฯ: กระทรวงแรงงาน.
- [10] ราชกิจจานุเบกษา. (2564). กฎกระทรวง กำหนดมาตรฐาน ในการบริหารจัดการ ด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และ สภาพแวดล้อม ในการทำงาน เกี่ยวกับงานก่อสร้าง พ.ศ. 2564. กรุงเทพฯ: กระทรวงแรงงาน.
- [11] Kolesnichenko, S., et al. (2019). *Risk Assessment Principles for Steel Structures with Imperfections: A Probabilistic Analysis Approach*. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, 76–88.
- [12] ธิติพร บุญรักษ์. (2565). *การศึกษาประสิทธิภาพของกิจกรรมติดตั้งโครงหลังคาเหล็ก*. วิศวกรรมศาสตร มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [13] ประกายพล พันธุ์พิเศษ เสรีย์ ตูประกาย วรานนท์ คงสง ชัยวัฒน์ ภูวรกุลชัย ธีรเดช สนองทวีพร และ มงคล รัชชะ. (2566). *การวิเคราะห์ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของงานติดตั้งโครงสร้างหลังคาเหล็กประเภทระบบสลักเกลียว*. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [14] Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2020). *29 CFR 1926 Subpart CC — Cranes and Derricks in Construction*. Washington, D.C.: U.S. Department of Labor

การพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์

Development of Management Information System for Online Optical Shop

จิรศักดิ์ ชุมวรานนท์¹ ญัฐนิชา สารณะพันธุ์² และ สาโรช ปุริสังคหะ^{3*}

^{1,2,3}สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา 13000

¹Email: jirasak@aru.ac.th; ²Email: 16532095@aru.ac.th; ³Email: ipreds@aru.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ ระบบพัฒนาขึ้นโดยใช้ภาษา PHP ร่วมกับ SQL Server และ Bootstrap เพื่อแก้ปัญหาการจัดการสินค้าคงคลัง ข้อมูลสินค้าไม่ครบถ้วน และการสั่งซื้อที่ไม่เป็นระบบ ฟังก์ชันหลักประกอบด้วย การสมัครสมาชิกและเข้าสู่ระบบ การสั่งซื้อและชำระเงินออนไลน์ การจัดการข้อมูลลูกค้า พนักงาน และสินค้าคงคลัง การจัดการโปรโมชั่น และการสร้างรายงาน ผลการประเมินพบว่า ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) เท่ากับ 4.44 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$) เท่ากับ 0.15 อยู่ในระดับมาก สะท้อนว่าระบบสามารถตอบสนองความต้องการและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของร้านขายแว่นตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : อีคอมเมิร์ซ, ร้านแว่นตา, การสั่งซื้อสินค้า

Abstract

This research aimed to develop an online eyewear shop management information system and to evaluate user satisfaction with the system. The system was implemented using PHP in conjunction with SQL Server and Bootstrap to address problems related to inventory management, incomplete product information, and unstructured ordering processes. The main functions include member registration and login, online ordering and payment, customer, staff, and inventory management, promotion management, and report generation. The evaluation showed an overall mean score ($\bar{x}$) of 4.44 and a standard deviation ($S.D.$) of 0.15, indicating user satisfaction at a very high level and confirming the system's effectiveness in enhancing shop efficiency

Keyword: E-commerce, Optical shop, Online ordering

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในยุคดิจิทัลปัจจุบัน ธุรกิจออนไลน์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของผู้บริโภค โดยเฉพาะในกลุ่มสินค้าที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพและแฟชั่น เช่น แว่นตาและเครื่องประดับสายตา ซึ่งมีทั้งแว่นสายตา แว่นกันแดดกรองรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) และแว่นกรองแสงสีฟ้าสำหรับผู้ใช้งานอุปกรณ์ดิจิทัล การแข่งขันในตลาดนี้มีการแข่งขันสูง โดยเฉพาะร้านค้าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เชิงพาณิชย์ขนาดใหญ่ เช่น ศูนย์การค้าเซ็นทรัล เวสต์เกต ที่ต้องนำเสนอสินค้าที่มีคุณภาพและตรงตามความต้องการของลูกค้า ทั้งในด้านแฟชั่นและสุขภาพสายตา อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในร้านแว่นจำนวนมาก ได้แก่ การจัดการสินค้าคงคลังที่ไม่แม่นยำ การจำแนกหมวดหมู่สินค้าที่ไม่ครบถ้วน การควบคุมสต็อกที่ขาดประสิทธิภาพ ตลอดจนการออกแบบเว็บไซต์ที่ไม่รองรับการค้นหาได้อย่างสะดวกและชัดเจน ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้ลูกค้าเข้าถึงข้อมูลได้ยาก เกิดภาวะสินค้าขาดหรือล้นสต็อก และทำให้ร้านสูญเสียโอกาสทางธุรกิจในระยะยาว

งานวิจัยที่ผ่านมาสนับสนุนความสำคัญของการพัฒนาระบบอีคอมเมิร์ซเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการข้อมูลและสร้างประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้ใช้งาน ตัวอย่างเช่น [1] ที่พัฒนาระบบอีคอมเมิร์ซสำหรับร้านกล้องถ่ายภาพ พบว่าระบบสามารถบริหารจัดการสินค้าคงคลังและกระบวนการซื้อขายได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมได้รับความพึงพอใจในระดับสูง ขณะที่ [2] ได้พัฒนาเว็บไซต์ซื้อขายอุปกรณ์คอมพิวเตอร์โดยใช้ WordPress และ PHP ช่วยเพิ่มความสะดวกและความพึงพอใจของผู้ใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้ง [3] ได้นำเสนอเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการขายวัสดุก่อสร้าง ซึ่งมีความครบถ้วน ถูกต้อง และได้รับผลประเมินความพึงพอใจในระดับมาก ในทำนองเดียวกัน [4] ได้แสดงให้เห็นว่าระบบขายสินค้าเกษตรออนไลน์สามารถตอบโจทย์ทั้งผู้ซื้อและผู้ขายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ [5] ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำหน่ายต้นไม้ประดับที่มีความพึงพอใจและประสิทธิภาพการใช้งานสูงเช่นกัน งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในธุรกิจค้าปลีกหลายประเภท

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีงานวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบอีคอมเมิร์ซ แต่ในบริบทของร้านจำหน่ายแว่นตายังคงพบข้อจำกัดหลายด้าน เช่น ระบบยังไม่รองรับการจัดการประเภทสินค้าเฉพาะทาง (เช่น วัสดุเลนส์ คุณสมบัติพิเศษ หรือการกรองแสงแต่ละรูปแบบ) ไม่สามารถกำหนดรหัสสินค้าอัตโนมัติได้อย่างครบถ้วน รวมถึงขาดระบบรายงานข้อมูลการขายแบบเรียลไทม์เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์เชิงธุรกิจ นอกจากนี้ ยังไม่มีระบบที่ช่วยเพิ่มความสะดวกแก่ลูกค้าในการค้นหาและเปรียบเทียบสินค้าได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์จึงมีความจำเป็น เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่ยังคงมีอยู่ ตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งาน และสนับสนุนให้ธุรกิจสามารถแข่งขันได้อย่างมีประสิทธิภาพในยุคดิจิทัล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์
- 2) เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดกรอบแนวคิดเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแวนตาออนไลน์ โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. ศึกษาปัญหาของระบบเดิมและความต้องการของผู้ใช้งาน พร้อมทั้งรวบรวมเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา
2. การพัฒนาระบบ โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ ออกแบบโครงสร้าง ดำเนินการพัฒนา และทดสอบการทำงานของระบบ ครอบคลุมฟังก์ชันการสั่งซื้อพร้อมคำนวณราคาอัตโนมัติ การป้องกันการสั่งซื้อซ้ำซ้อน การจัดการข้อมูลลูกค้า การสั่งซื้อตารางคำสั่งซื้อของลูกค้าที่พนักงานดูแล และการสรุปรายงานรายได้
3. การประเมินผลความพึงพอใจ โดยทดสอบการใช้งานจริงและประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้เพื่อนำข้อมูลไปปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของระบบ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยนี้มีขอบเขตการพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านแวนตาที่ครอบคลุมทั้งในส่วนของลูกค้า เจ้าของร้าน และพนักงาน โดยในส่วนของลูกค้า ระบบรองรับการลงทะเบียนเพื่อสร้างบัญชีผู้ใช้ใหม่ การเข้าสู่ระบบและการแก้ไขข้อมูลส่วนตัว รวมถึงการค้นหาสินค้าในหมวดหมู่หลักและหมวดหมู่ย่อย การค้นหาและดูบทความของร้านค้า ตลอดจนการดูข้อมูลและรายละเอียดของสินค้า ลูกค้ายังสามารถสั่งซื้อสินค้า ตรวจสอบสถานะการสั่งซื้อ และดูประวัติการสั่งซื้อที่ผ่านมาได้ อีกทั้งสามารถเรียกดูโปรโมชั่นของสินค้าและสินค้าขายดี บันทึกสินค้าที่สนใจไว้เพื่อดูในอนาคต เลือกวิธีการชำระเงิน และทำการชำระเงินออนไลน์ได้อย่างสะดวก

สำหรับ เจ้าของร้าน ระบบรองรับการเข้าสู่ระบบและการแก้ไขข้อมูลส่วนตัว รวมถึงการเพิ่ม แก้ไข และลบหมวดหมู่สินค้า ทั้งหมวดหมู่หลักและหมวดหมู่ย่อย นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่ม แก้ไข และลบข้อมูลสินค้า รวมทั้งรหัสจำแนกประเภทสินค้า (Stock Keeping Unit : SKU) ได้ อีกทั้งยังสามารถสร้างและจัดการบทความที่เกี่ยวข้องกับสินค้า จัดการโปรโมชั่น เพิ่ม แก้ไข และลบช่องทางการชำระเงิน ตลอดจนดูและปรับสถานะคำสั่งซื้อของลูกค้า เจ้าของร้านยังสามารถตรวจสอบและปรับปรุงข้อมูลสินค้าคงคลังได้อย่างเป็นระบบ รวมถึงการจัดการข้อมูลลูกค้าและพนักงานได้โดยตรง อีกทั้งระบบยังรองรับการจัดทำรายงานในหลายด้าน เช่น รายงานสินค้าคงคลัง รายงานสินค้าขายดี รายงานข้อมูลลูกค้า รายงานข้อมูลพนักงาน และรายงานรายรับ-รายจ่าย ทั้งรายเดือนและรายปี เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการเชิงกลยุทธ์

สำหรับ พนักงาน ระบบรองรับการเข้าสู่ระบบและการแก้ไขข้อมูลส่วนตัว สามารถเข้าถึงข้อมูลสินค้าได้ รวมทั้งตรวจสอบและปรับสถานะการจัดส่งสินค้าได้โดยตรง โดยระบบจะแสดงสถานะที่ชัดเจน ได้แก่ สถานะรอการชำระเงิน สถานะชำระเงินเรียบร้อยแล้ว

สถานะดำเนินการจัดส่ง สถานะจัดส่งเสร็จสิ้น และสถานะยกเลิกการจัดส่ง การออกแบบระบบในลักษณะนี้ทำให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องสามารถใช้งานและจัดการข้อมูลได้อย่างครบวงจรและมีประสิทธิภาพภายในระบบเดียว

1.3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ โดยครอบคลุมเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับ

- การจัดการข้อมูลสินค้าและสินค้าคงคลัง เช่น การบันทึก แก้ไข และตรวจสอบปริมาณสินค้า การจัดหมวดหมู่สินค้า และการแสดงข้อมูลสินค้าให้ครบถ้วน
- การจัดการข้อมูลลูกค้า พนักงาน และคำสั่งซื้อ เช่น การลงทะเบียนสมาชิก การบันทึกและติดตามคำสั่งซื้อ การปรับปรุงสถานะการสั่งซื้อ และการติดตามประวัติการสั่งซื้อ
- การจัดการโปรโมชั่นและบทความประชาสัมพันธ์ของร้านค้า เพื่อส่งเสริมการขายและเพิ่มโอกาสในการเลือกซื้อสินค้า
- การสร้างรายงานสำหรับสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารร้าน ทั้งด้านสินค้าคงคลัง ยอดขาย ลูกค้า และพนักงาน

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบต่อการใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านความสะดวกในการใช้งาน ด้านประสิทธิภาพของระบบ ด้านความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล ด้านฟังก์ชันการทำงานและความครบถ้วนของระบบ และด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการนำเสนอข้อมูล ซึ่งเป็นการประเมินความพึงพอใจที่ผู้ใช้งานมีต่อระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ที่พัฒนาขึ้น

1.3.2 ขอบเขตด้านประชากรและพื้นที่

ประชากรในการวิจัยครั้งนี้มีจำนวน 30 คน ได้แก่ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ของร้านที่เป็นกรณีศึกษา ประกอบด้วย

- เจ้าของร้านหรือผู้บริหารร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์
- พนักงานที่มีหน้าที่ด้านการขาย การจัดการคลังสินค้า และการดูแลคำสั่งซื้อผ่านระบบออนไลน์
- ลูกค้าที่สมัครสมาชิกและใช้งานระบบเพื่อค้นหาสินค้าและสั่งซื้อแว่นตาผ่านช่องทางออนไลน์ของร้าน

พื้นที่การวิจัยจำกัดอยู่ในบริบทของร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ที่เป็นกรณีศึกษาเพียงหนึ่งแห่ง และการใช้งานระบบผ่านเว็บไซต์ของร้านดังกล่าว โดยไม่ครอบคลุมถึงร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์อื่น ๆ หรือแพลตฟอร์มอีคอมเมิร์ซภายนอก ทั้งนี้ การเก็บรวบรวมข้อมูลจะดำเนินการกับกลุ่มผู้ใช้ระบบที่อยู่ในขอบเขตดังกล่าวเท่านั้น เพื่อใช้ในการประเมินความพึงพอใจและยืนยันประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

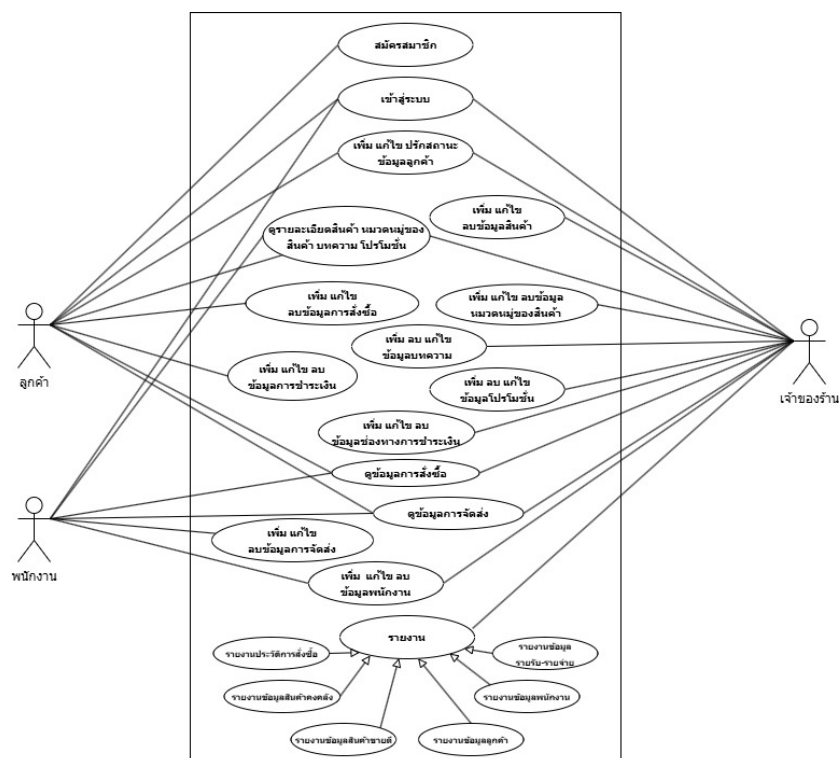
2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบบริหารจัดการข้อมูลบริการ การสั่งซื้อผ่านระบบออนไลน์ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีกรณีศึกษาจากร้านขายแวนตาที่ประสบปัญหาในการจัดการคำสั่งซื้อและการให้บริการลูกค้าด้วยวิธีดั้งเดิม คณะผู้วิจัยจึงดำเนินการพัฒนาระบบเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว พร้อมทั้งศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

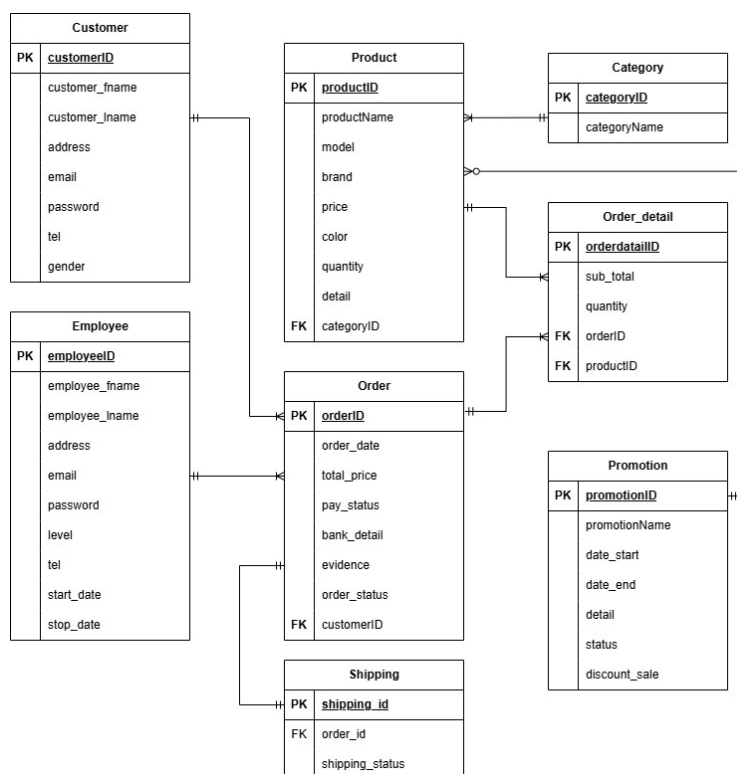
ในการพัฒนาระบบครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ใช้หลักการพัฒนาระบบตามวงจร System Development Life Cycle (SDLC) ซึ่งประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาและการกำหนดปัญหา การวิเคราะห์ระบบ การออกแบบระบบ การพัฒนาระบบ การติดตั้งและทดสอบระบบ และ การประเมินผลระบบ ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เครื่องมือพัฒนา เช่น Visual Studio Code, PHP และ SQL Server เมื่อระบบเสร็จสิ้นจึงนำไปใช้งานจริงกับกลุ่มผู้ใช้ และประเมินความพึงพอใจในด้านต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

2.1 การศึกษาและออกแบบเครื่องมือวิจัย

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสาร แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบสารสนเทศ ระบบร้านค้าออนไลน์ การจัดการคำสั่งซื้อและสินค้าคงคลัง ตลอดจนแนวทางการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เพื่อนำมาประกอบการกำหนดกรอบแนวคิดของงานวิจัย จากนั้นได้ศึกษาสภาพการทำงานและปัญหาของระบบเดิมของร้านแวนตากรณีศึกษา เช่น ปัญหาความซ้ำซ้อนในการบันทึกข้อมูล ความล่าช้าในการตรวจสอบคลังสินค้า (Stock) และการแสดงข้อมูลสินค้าไม่ครบถ้วน แล้วสังเคราะห์เป็นข้อกำหนดและขอบเขตของระบบใหม่ ต่อจากนั้นได้ออกแบบระบบในเชิงโครงสร้าง โดยจัดทำแผนภาพการทำงานของระบบ (Use Case Diagram) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับระบบ และแผนภาพความสัมพันธ์ของข้อมูล (Entity Relationship Diagram) เพื่อกำหนดโครงสร้างฐานข้อมูลให้เหมาะสมกับการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลของร้านแวนตา รวมถึงกำหนดโครงสร้างของเครื่องมือวิจัยทั้งในส่วนของการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันและแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบภาพที่ 2 แผนภาพ Use Case Diagram



ภาพที่ 2 แผนภาพ Use Case Diagram



ภาพที่ 3 แผนภาพ Entity Relationship Diagram (ER Diagram)

2.2 การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

จากการออกแบบในขั้นตอนก่อนหน้า ผู้วิจัยได้พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านขายแวนตาในรูปแบบ Web-based Application โดยใช้โปรแกรม Visual Studio Code เป็นเครื่องมือพัฒนา ใช้ภาษา PHP เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล SQL Server และใช้ Bootstrap ในการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ ระบบที่พัฒนาขึ้นรองรับการทำงานสำคัญของร้าน ได้แก่ การสมัครสมาชิกและเข้าสู่ระบบ การค้นหาและเลือกดูสินค้า การจัดการตระกร้าสินค้าและคำสั่งซื้อ การจัดการข้อมูลสินค้า ลูกค้า พนักงาน โปรโมชั่น และการจัดส่ง ตลอดจนการสร้างรายงานด้านสินค้าคงคลังและยอดขายเพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการของร้าน นอกจากนี้ยังได้พัฒนาแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบในรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่า ครอบคลุมด้านความสะดวกในการใช้งาน ด้านประสิทธิภาพของระบบ ด้านความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล ด้านฟังก์ชันการทำงานและความครบถ้วนของระบบ และด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการนำเสนอข้อมูล พร้อมทั้งเปิดโอกาสให้เสนอแนะเพิ่มเติมเพื่อใช้ปรับปรุงระบบ

2.3 การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล

เมื่อการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันและแบบประเมินความพึงพอใจเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยได้นำระบบเว็บแอปพลิเคชันไปติดตั้งและใช้งานในบริบทของร้านแวนตากรณีศึกษาตามขอบเขตด้านประชากรและพื้นที่ที่กำหนดไว้ จากนั้นได้แนะนำขั้นตอนการใช้งานระบบให้ผู้เกี่ยวข้องตามบทบาทจริง ได้แก่ ลูกค้า เจ้าของร้าน และพนักงาน เพื่อให้ทดลองใช้งานระบบในกระบวนการสั่งซื้อและการบริหารจัดการหลังร้านตามขั้นตอนปกติ เมื่อผู้ใช้งานมีประสบการณ์ใช้งานระบบเพียงพอแล้ว ผู้วิจัยจึงให้ผู้ใช้งานระบบประเมินความพึงพอใจผ่านแบบสอบถาม เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลความคิดเห็นที่มีต่อระบบในด้านต่าง ๆ ตามตัวชี้วัดที่กำหนด

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย

ข้อมูลที่ได้จากแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบนำมาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แยกตามแต่ละด้านของความพึงพอใจและภาพรวมของระบบ เพื่อนำมาแปลผลระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ข้อเสนอแนะเชิงคุณภาพจากผู้ใช้งานในเชิงพรรณนา เพื่อระบุประเด็นที่ควรปรับปรุงและจุดเด่นของระบบ จากนั้นจึงสังเคราะห์และอภิปรายผลโดยเชื่อมโยงกับกรอบแนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสรุปข้อจำกัดของการวิจัยรวมถึงแนวทางการพัฒนาต่อยอดในอนาคต คณะผู้วิจัยเลือกการประเมินความพึงพอใจโดยใช้แบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า (Rating Scale) 5 ระดับใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยของคะแนนจากแบบประเมินความพึงพอใจ [6] จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ คือ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

คะแนนเฉลี่ย 4.51 –5.00 หมายถึง ระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

คะแนนเฉลี่ย 3.51 –4.50 หมายถึง ระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

คะแนนเฉลี่ย 2.51 –3.50 หมายถึง ระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับปานกลาง

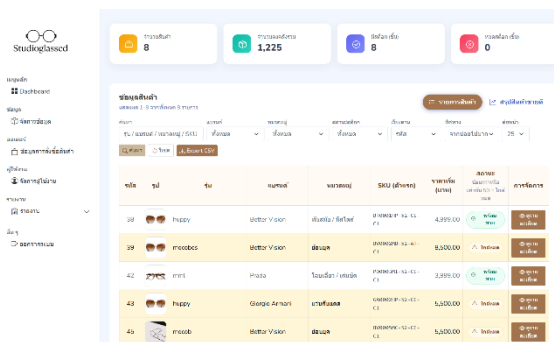
คะแนนเฉลี่ย 1.51 –2.50 หมายถึง ระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อย

คะแนนเฉลี่ย 1.00 –1.50 หมายถึง ระบบมีความพึงพอใจอยู่ในระดับน้อยที่สุด

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

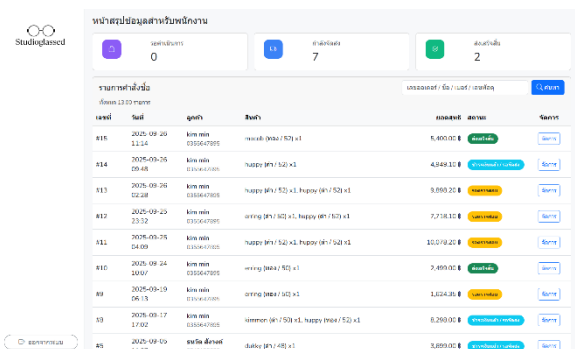
3.1 ผลการพัฒนาระบบ

จากการพัฒนาระบบจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน ระบบได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้ในหลายมิติ ดังนี้



ชื่อ	รูป	ชื่อ	หมวดหมู่	SKU (สินค้า)	ราคา	สถานะ	การจัดการ
28	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	4,999.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
29	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
42	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	3,999.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
43	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
44	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด

(ก)



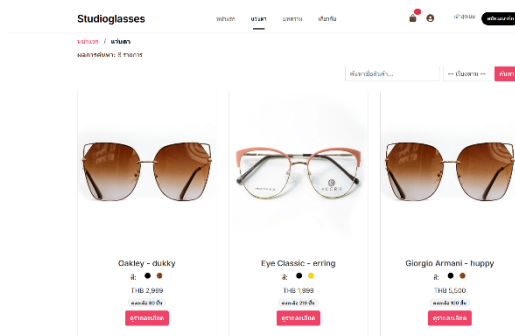
ชื่อ	รูป	ชื่อ	หมวดหมู่	SKU (สินค้า)	ราคา	สถานะ	การจัดการ
116	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
114	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	4,999.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
113	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
112	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	7,718.32	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
111	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	10,019.20	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
110	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	2,889.92	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
109	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	1,824.36	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
108	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	8,260.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด
107	happy	แว่นตา Vision	แว่นตา / สีเทา	แว่นตา 10-11-12	5,500.00	มีสต็อก	ดูรายละเอียด

(ข)

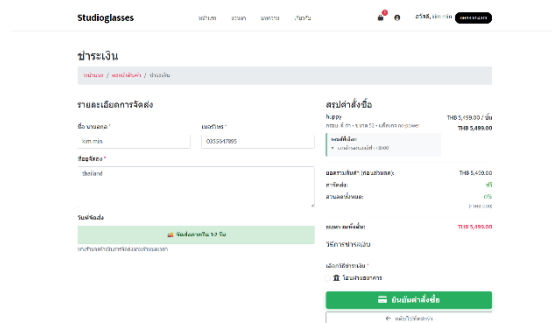
ภาพที่ 4 ส่วนติดต่อสำหรับผู้ดูแลระบบ

จากภาพที่ 4 (ก) แสดงหน้ารายงานข้อมูลสินค้า (Product Report) สำหรับผู้ดูแลระบบ ใช้ติดตามสต็อกและสถานะสินค้าของร้านแว่นตาอย่างเป็นระบบ โดยแสดงรายละเอียดครบถ้วน เช่น ภาพสินค้า รุ่น แบรนต์ หมวดหมู่ รหัส SKU ราคา/ชิ้น และสถานะสินค้า พร้อมตัวชี้วัดสต็อกแบบแถบสีเพื่อแจ้งเตือนกรณีปริมาณใกล้หมด ช่วยให้ผู้ดูแลสามารถวางแผนเติมสินค้าได้ทันทั่วทั้งที่ ลดความเสี่ยงสินค้าขาดชั้นวาง และยกระดับความถูกต้องในการบริหารคลังสินค้า

จากภาพที่ 4 (ข) เป็นหน้าสรุปข้อมูลสำหรับพนักงานและศูนย์กลางการจัดการคำสั่งซื้อ เมื่อมีคำสั่งซื้อเข้ามา ระบบจะแสดงสถานะที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รอตรวจสอบ ชำระเงินแล้ว รอจัดส่ง และจัดส่งเสร็จสิ้น พร้อมสรุปจำนวนในแต่ละสถานะอย่างชัดเจนบริเวณด้านบนของหน้า พนักงานสามารถอัปเดตสถานะ ติดตามความคืบหน้า ตรวจสอบหลักฐานการชำระเงิน และจัดการการส่งมอบได้จากจุดเดียว ช่วยลดขั้นตอนซ้ำซ้อน เพิ่มความรวดเร็วในการให้บริการ และทำให้การดำเนินงานมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 ส่วนติดต่อสำหรับลูกค้า

ภาพที่ 5 (ก) หน้ารายการสินค้าแว่นตา แสดงรายการสินค้าโดยจัดตามหมวดหมู่ พร้อมช่องค้นหาเพื่อเจาะจงสินค้าได้รวดเร็ว รายละเอียดที่แสดงประกอบด้วย รุ่นและแบรนด์ สี ราคา จำนวนคงเหลือ และปุ่ม “ดูรายละเอียด” ช่วยให้ผู้ใช้เปรียบเทียบทางเลือกได้อย่างชัดเจนก่อนตัดสินใจ

ภาพที่ 5 (ข) หน้าการชำระเงินและสรุปคำสั่งซื้อ ระบบดึงข้อมูลที่อยู่และข้อมูลส่วนตัวที่ใช้ให้ไว้ตั้งแต่สมัครสมาชิกมาเดิม อัตโนมัติ เพื่อลดขั้นตอนกรอกข้อมูล ขณะเดียวกันมีสรุปรายการสั่งซื้ออย่างครบถ้วน ได้แก่ ชื่อสินค้า สี ขนาด รายละเอียดเลนส์/กรอบ และราคา หากมีโปรโมชั่น ระบบจะแสดงส่วนลด ราคาเต็ม และราคารวมหลังหักส่วนลดอย่างโปร่งใส จากนั้นผู้ใช้เลือกธนาคารและแอปพลิเคชันชำระเงินเพื่อยืนยันการโอน ทำให้ขั้นตอนชำระเงินรวดเร็วและตรวจสอบได้ง่าย

3.2 ผลการประเมินความพึงพอใจ

ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์ กลุ่มตัวอย่างได้ทำการตอบแบบสอบถามโดยใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ เพื่อวัดความคิดเห็นเกี่ยวกับการใช้งานระบบในแต่ละด้าน โดยมีระดับคะแนนได้แก่ ระดับคะแนน 5 คือ พึงพอใจมากที่สุด ระดับคะแนน 4 คือ พึงพอใจมาก ระดับคะแนน 3 คือ ปานกลาง ระดับคะแนน 2 คือ พึงพอใจน้อย และระดับคะแนน 1 คือ พึงพอใจน้อยที่สุด แบบประเมินถูกออกแบบให้ครอบคลุม 5 ด้านหลัก ได้แก่ ด้านความสะดวกในการใช้งาน (Usability) ด้านประสิทธิภาพของระบบ (System Efficiency) ด้านความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล (Accuracy & Security) ด้านฟังก์ชันการทำงานและความครบถ้วนของระบบ (Functionality & Completeness) และด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการนำเสนอข้อมูล (User Interface & Information Presentation) ภายในแต่ละด้านประกอบด้วยรายการประเมินย่อยที่สะท้อนถึงประสบการณ์การใช้งานจริง เช่น การเลือกสินค้า และออกแบบเสริมทำได้ง่ายและไม่สับสน ระบบตอบสนองต่อการใช้งานอย่างรวดเร็วและทันเวลา และ การชำระเงินหรือการคำนวณค่าใช้จ่ายมีความถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้ ข้อมูลจากแบบสอบถามได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$) เพื่อสรุประดับความพึงพอใจของผู้ใช้ในแต่ละด้าน และแปลผลในเชิงเปรียบเทียบเพื่อสะท้อนคุณภาพและประสิทธิภาพโดยรวมของระบบจัดการข้อมูลร้านจำหน่ายแว่นตาออนไลน์

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$)	แปลผล
1) ด้านความสะดวกในการใช้งาน (Usability)	4.51	0.53	มากที่สุด
2) ด้านประสิทธิภาพของระบบ (System Efficiency)	4.57	0.53	มากที่สุด
3) ด้านความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูล (Accuracy & Security)	4.56	0.52	มาก
4) ด้านฟังก์ชันการทำงานและความครบถ้วนของระบบ (Functionality & Completeness)	4.26	0.71	มากที่สุด
5) ด้านการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้และการนำเสนอข้อมูล (User Interface & Information Presentation)	4.28	0.65	มาก
รวม	4.44	0.15	มาก

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบบริหารจัดการข้อมูลร้านขายแว่นตา พบว่าค่าเฉลี่ยภาพรวมทั้ง 5 ด้านมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) เท่ากับ 4.44 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$) เท่ากับ 0.15 อยู่ในระดับมาก แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวมอยู่ในระดับมาก โดยเฉพาะด้านด้านประสิทธิภาพของระบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด สะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตอบสนองต่อการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้านความถูกต้องและความปลอดภัยของข้อมูลและด้านความสะดวกในการใช้งาน รองลงมาตามลำดับ

5. ข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาระบบในอนาคต ควรเพิ่มเติมฟังก์ชันที่ช่วยเสริมสร้างประสิทธิภาพและความสมบูรณ์ของระบบให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น อาทิ การพัฒนาระบบแจ้งเตือนสถานะคำสั่งซื้อเพื่อสร้างความสะดวกและความมั่นใจแก่ผู้ใช้งาน การจัดทำระบบให้คะแนนและรีวิวสินค้าเพื่อสะท้อนความคิดเห็นของลูกค้าและเพิ่มความน่าเชื่อถือของร้านค้า การพัฒนาระบบกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงที่มีความละเอียดรอบคอบมากขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับบทบาทของผู้ใช้งานแต่ละกลุ่ม การจัดทำระบบวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหาร และการจัดให้มีระบบสำรองและกู้คืนข้อมูลเพื่อรองรับกรณีฉุกเฉินและลดความเสี่ยงจากการสูญหายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อต่อยอดการพัฒนาระบบให้มีความมั่นคง ปลอดภัย และสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] โยชิตา เจริญศิริ, เฉลิมพล แก้วเทพ, รัชฎาพร ตรีสุวรรณ, ชาญยุทธ อุปายโกศล (2567). พัฒนาระบบอีคอมเมิร์ซสำหรับซื้อ-ขายกล้องถ่ายภาพ. *วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.)*, 13(1).
- [2] กชพร บุตรสิน, พิทยา บุญอินทร์, ธัญญ์นภัส พิพิธธนบรรชัย (2566). พัฒนาเว็บไซต์ซื้อขายอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ออนไลน์สำหรับร้านรับซ่อม. *วารสารวิชาการเฉลิมกาญจนา*, 10(2).
- [3] ธนกฤต พรณรัตน์, นงเยาว์ ไนอรุณ (2566). เว็บแอปพลิเคชันส่งเสริมการขายสินค้า วัสดุก่อสร้างร้านค้ารายวัน. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*, 13(3).
- [4] ณัฏฐ์ธิดา คำอ่อง, บุญทา จัตุรงค์ (2567). ระบบขายสินค้าเกษตรกรรมออนไลน์ ร้านณัฏฐ์ธิดาฟาร์ม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีชุมชน*, 2(3).
- [5] อติสร โกษาจันทร์, เกษสุภัค เนตรสุวรรณ, อธิธิชัย อินทุเพท, จิตราภา คนฉลาด (2566). การพัฒนาระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับจำหน่ายต้นไม้ประดับ. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*, 13(3).
- [6] บุญชม ศรีสะอาด (2556). การวิจัยเบื้องต้น พิมพ์ครั้งที่ 9 กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น.

วงจรถ่ายทอดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ โหมดกระแส ที่ปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ CCCCTAs

An Electronically Tunable Current-Mode Quadrature Sinusoidal Oscillator with Using CCCCTAs

สุทธิพงษ์ ฟุ้งเดช^{1*}

^{1*}สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

^{1*}Email: suttipong.fu@rmuti.ac.th

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรถ่ายทอดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ในโหมดกระแส โดยใช้อุปกรณ์ CCCCTA (current-controlled current conveyor transconductance amplifiers) เป็นอุปกรณ์แอคทีฟจำนวน 2 ตัวและตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์จำนวน 2 ตัว โดยไม่มีอุปกรณ์ตัวต้านทานภายนอก วงจรสามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (CO) และการปรับค่าความถี่ (FO) ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านการควบคุมกระแสไบอัสภายในอุปกรณ์ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE แสดงให้เห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตทั้งสองเฟสมีค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก (THD) ต่ำกว่า 1% และมีการบริโภคพลังงานของวงจรอยู่ในระดับต่ำ สอดคล้องกับโครงสร้างที่ไม่มีตัวต้านทานภายนอกและวงจรมีความต้านทานเอาต์พุตสูง ทำให้วงจรที่นำเสนอมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารและวงจรรวม ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

คำสำคัญ : CCCCTA กำเนิดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์ โหมดกระแส

Abstract

This article presents a current-mode quadrature sinusoidal oscillator with high output impedance implemented using two current-controlled current conveyor transconductance amplifiers (CCCCTAs) and two grounded capacitors, without employing any external resistors. The proposed oscillator provides electronically tunable condition of oscillation (CO) and frequency of oscillation (FO) through independent adjustment of the bias currents of the CCCCTAs. Simulation results obtained using PSPICE confirm the validity of the theoretical analysis. The generated output currents exhibit low total harmonic distortion (THD), remaining below 1% for both output phases, and the overall power consumption of the circuit is low due to its resistorless structure and efficient current-mode operation and high output impedance, making it suitable for communication systems and integrated circuit applications. The simulation results agree with the theoretical analysis.

Keyword: CCCCTAs, quadrature oscillator, current-mode

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

วงจรถ่ายทอดสัญญาณแบบควอดเรเจอร์เป็นวงจรพื้นฐานที่มีความสำคัญในงานประมวลผลสัญญาณและระบบสื่อสาร เนื่องจากสามารถสร้างสัญญาณที่มีเฟสต่างกัน 90 องศาได้อย่างแม่นยำ [1-3] งานวิจัยจำนวนมากได้เสนอวงจรรูปแบบไม่ใช้ตัวต้านทานภายนอก (resistorless oscillator) เพื่อลดความซับซ้อนของวงจรและทำให้เหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม [6,13] อย่างไรก็ตาม วงจรส่วนใหญ่ยังมีข้อจำกัด เช่น การปรับ CO และ FO ไม่เป็นอิสระต่อกัน [10,11] และมีความไวต่อพารามิเตอร์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่อุดมคติ [12]

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาวรรณกรรมและสำรวจการประยุกต์ใช้งานวงจรถ่ายทอดสัญญาณที่พัฒนาขึ้น จากอุปกรณ์แอคทีฟสมรรถนะสูง เช่น operational transconductance amplifier (OTA) [4], four terminal floating nullor (FTFN) [5], differential voltage current conveyors (DVCCs) current-controlled current differencing transconductance amplifiers (CCCDTAs)

7,10], current-controlled current conveyor transconductance amplifiers (CCCCTAs) [6,9,11], multiple-output current controlled current differencing transconductance amplifier (MO-CCCDTA) และ current differencing transconductance amplifier (CDTA) [3] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีคุณสมบัติด้านการควบคุมด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์และมีความต้านทานเอาต์พุตสูง ที่เหมาะสมในการใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณแอนะล็อกสมัยใหม่

อย่างไรก็ตาม วงจรกำเนิดสัญญาณที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้มักประสบปัญหาหลักหลายประการ ได้แก่ การใช้องค์ประกอบพาสซีฟจำนวนมากโดยเฉพาะตัวต้านทานภายนอก [13,15-16] การใช้ตัวเก็บประจุลอยซึ่งไม่เหมาะต่อการสร้างวงจรรวม [8,14] ไม่สามารถปรับค่าความถี่หรือเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ [12,14] บางวงจรมีความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกส์ (THD) สูง และค่าความต้านทานเอาต์พุตอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งต้องใช้วงจรบัฟเฟอร์เพิ่มในการต่อกับวงจรอื่น ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้ การเลือกใช้อุปกรณ์ CCCCTA จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนางานกำเนิดสัญญาณ เนื่องจากมีข้อดีสำคัญ ได้แก่ ควบคุมค่าความต้านทานแฝง R_x และค่าความนำถ่ายโอน g_m ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ผ่านการไบอัสทางกระแสจากภายนอก [6,9,11] ให้ค่าความต้านทานอินพุตเอาต์พุตสูง [11] มีโครงสร้างที่เรียบง่ายรองรับฟังก์ชันขั้นสูง จึงเหมาะต่อการพัฒนางานกำเนิดสัญญาณแบบใหม่

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอ วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ โหมดกระแส โดยใช้อุปกรณ์ CCCCTA เป็นอุปกรณ์หลัก วงจรประกอบด้วย CCCCTA จำนวน 2 ตัวและตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว โดยไม่มีตัวต้านทานภายนอก วงจรสามารถปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ ค่าความไวของความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์แอกทีฟและพาสซีฟของวงจรที่นำเสนอมีค่าต่ำ และผลการจำลองด้วยโปรแกรม Pspice ให้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีอย่างชัดเจน

2. วงจรและหลักการทำงานของวงจร

2.1 หลักการทำงานของ CCCCTA

วงจรได้นำเสนอ CCCCTA (current-controlled current conveyor transconductance amplifier) อุปกรณ์นี้น่าสนใจเนื่องจากสามารถใช้งานได้ทั้งในวงจรโหมดแรงดันและวงจรโหมดกระแส [6,9,11] โดยที่ CCCCTA จะมีความต้านทาน R_x ซึ่งสามารถปรับค่าด้วยกระแสไบอัสได้ รูปสัญลักษณ์วงจรและวงจรสมมูลของ CCCCTA แสดงในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ CCCCTA แสดงด้วยสมการเชิงเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_o \\ V_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

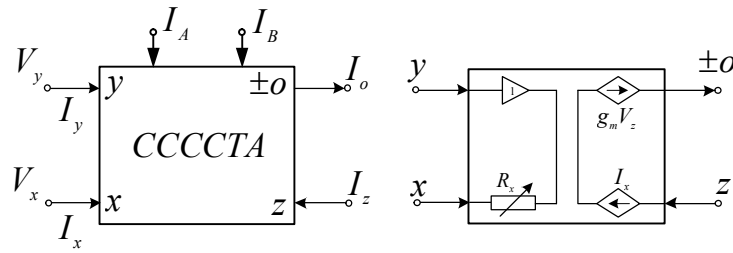
วงจรที่นำเสนอใช้การสร้างอุปกรณ์ CCCCTA โดยใช้เทคโนโลยีทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar Technology) [6,8,9] โดยมีค่าความต้านทานแฝงที่ขาอินพุต R_x และค่าความนำถ่ายโอน (Transconductance Gain) แสดงได้ดังนี้

$$R_x = \frac{V_T}{2I_A} \quad (2)$$

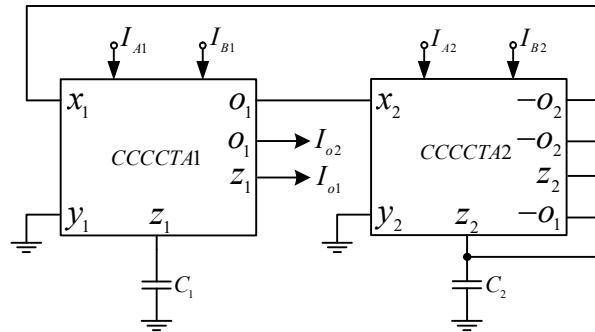
$$g_m = \frac{I_B}{2V_T} \quad (3)$$

เมื่อ g_m คือความนำถ่ายโอนของ CCCCTA และ V_T คือค่าศักย์ความร้อน (Thermal Voltage) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 26mV ที่อุณหภูมิห้อง และ I_A คือกระแสไบอัสค่าความต้านทานแฝง R_x ส่วนค่าความนำถ่ายโอน g_m สามารถควบคุมที่กระแสไบอัส

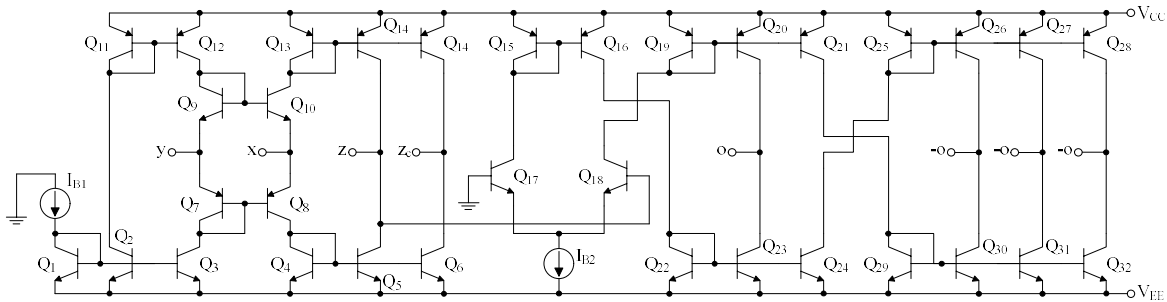
I_B



รูปที่ 1 วงจร CCCCTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรสมมูล [9]



รูปที่ 2 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่นำเสนอ



รูปที่ 3 โครงสร้างภายในของ CCCCTA [9]

2.2 จงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ที่นำเสนอ

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ โหมดกระแส ในรูปที่ 2 ในการออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ CCCCTA จำนวน 2 ตัว และตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว สัญญาณไซน์ที่สร้างขึ้นในการทำงานโหมดกระแสไฟฟ้าและชั่วเอตพุตมีความต้านทานสูง ซึ่งสามารถเชื่อมต่อกับวงจรอื่นๆ ได้อย่างง่าย [11,13] สามารถแสดงสมการคุณลักษณะของวงจรได้ดังนี้

$$s^2 + \frac{s}{C_1 C_2} (C_2 g_{m1} - C_1 g_{m2}) + \frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} = 0 \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) วงจรจะสามารถกำเนิดสัญญาณไซน์ได้โดยการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition) สามารถทำได้โดยการกำหนดค่าดังต่อไปนี้

$$C_2 g_{m1} \cong C_1 g_{m2} \quad (5)$$

ค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ แสดงดังสมการที่ (6)

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } g_{m1} = \frac{I_{B1}}{2V_T}, g_{m2} = \frac{I_{B2}}{2V_T}, \text{ และ } C_1 = C_2 = C \text{ เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณและค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ}$$

แสดงดังสมการที่ (7) และ (8)

$$OC: I_{B1} \cong I_{B2} \quad (7)$$

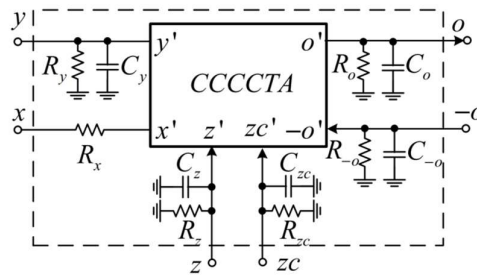
$$f_{osc} = \frac{1}{4\pi CV_T} \sqrt{I_{B1} I_{B2}} \quad (8)$$

จากการพิจารณาสมการที่ (7) และ (8) พบว่า เงื่อนไขของการกำเนิดสัญญาณ (Oscillation Condition) และค่าความถี่ของสัญญาณ (Oscillation Frequency) มีความสัมพันธ์ที่ไม่อิสระต่อกัน [10-11] อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยดำเนินการควบคุมกระแสไบอัส I_{B1} และ I_{B2} ให้มีค่าเท่ากัน ด้วยการประยุกต์ใช้วงจรสะท้อนกระแส (Current Mirror Circuit) [8-9]

2.3 การวิเคราะห์วงจรกรณีไม่เป็นอุดมคติ

ในกรณีที่ CCCCTA ที่ใช้ในวงจรเกิดความไม่เป็นอุดมคติสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ [9,12] เมื่อพิจารณาการสังเคราะห์วงจรในกรณีไม่เป็นอุดมคติจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณดังนี้ กำหนดให้ γ คือค่าความผิดพลาดผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของพอร์ต y ไปยังพอร์ต x กำหนดให้ α คือค่าความผิดพลาดผันผวนของกระแสไฟฟ้าของพอร์ต x ไปยังพอร์ต z และกำหนดให้ β คือค่าความผิดพลาดผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของพอร์ต z ไปยังพอร์ต o ดังนั้นจะได้สมการเมตริกซ์ของ CCCCTA ที่รวมค่าพารามิเตอร์ในกรณีไม่เป็นอุดมคติดังสมการที่ (9)

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \\ I_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma & R_x & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm\beta g_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_o \\ V_z \end{bmatrix} \quad (9)$$



รูปที่ 4 วงจรเทียบเคียงค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงของ CCCCTA ในกรณีไม่เป็นอุดมคติ

จากสมการที่ (9) สมการคุณลักษณะของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดเรเจอร์ที่รวมค่าความต้านทานและค่าความจุแฝงในกรณีไม่เป็นอุดมคติ ดังสมการที่ (10)

$$s^2 + \frac{s}{C_1 C_2} (C_2 \beta_1 g_{m1} - C_1 \beta_2 \gamma g_{m2}) + \frac{\beta_1 \beta_2 \gamma g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} = 0 \quad (10)$$

เงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ แสดงดังสมการที่ (11)

$$C_2 \beta_1 g_{m1} \cong C_1 \beta_2 \gamma g_{m2} \quad (11)$$

ค่าความถี่ของการกำเนิดสัญญาณ แสดงดังสมการที่ (12)

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta_1 \beta_2 \gamma g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \quad (12)$$

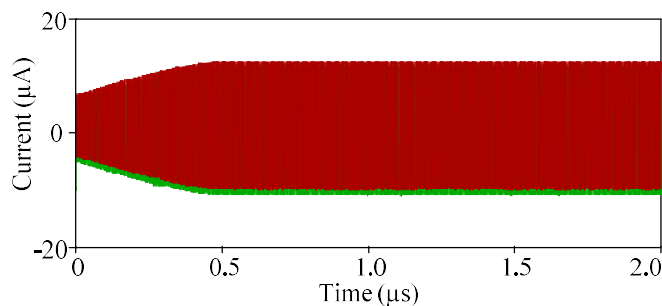
2.4 การวิเคราะห์ค่าความไว

ค่าความไวของความถี่ในการกำเนิดสัญญาณ (ω_0) ต่อพารามิเตอร์ของอุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟของวงจรในรูปที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13) พบว่าวงจรที่นำเสนอมีค่าความไวของอุปกรณ์พาสซีฟและแอคทีฟมีค่าค่อนข้างต่ำ

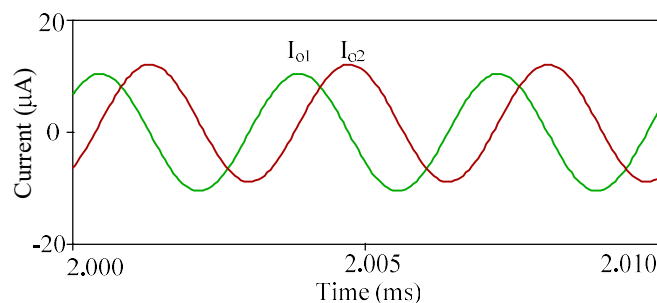
$$S_{g_{m1}}^{\omega_0} = S_{g_{m2}}^{\omega_0} = -S_{R_X}^{\omega_0} = -S_{C_1}^{\omega_0} = -S_{C_2}^{\omega_0} = \frac{1}{2} \quad (13)$$

3. ผลการจำลองการทำงาน

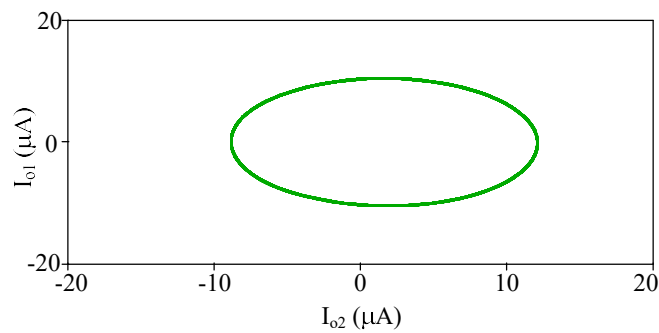
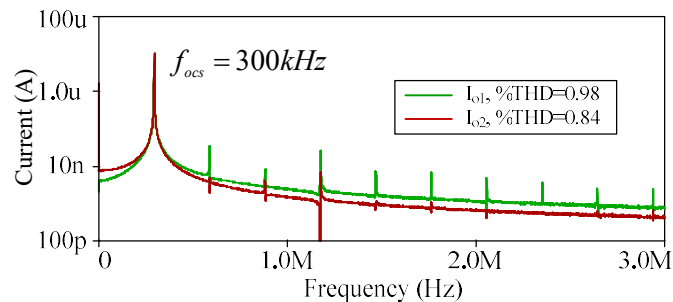
เพื่อยืนยันคุณสมบัติของวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดร่าเจอร์ โหมดกระแส ที่นำเสนอในรูปที่ 2 จะใช้โปรแกรม PSPICE ในการจำลองการทำงาน โดยวงจร CCCCTA ที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ (BJT) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ NR200N และ PR200N จาก AT&T [3] เพื่อจำลองวงจรทรานซิสเตอร์ชนิด PNP และ NPN ที่ใช้ในวงจรที่นำเสนอ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรมีขนาดแรงดัน ± 2.5 V สำหรับกระแสไบอัส I_{A1} และ I_{A2} มีค่าเท่ากับ $75 \mu A$ ส่วนกระแสไบอัส I_{B1} มีค่าเท่ากับ $105 \mu A$ และ I_{B2} มีค่าเท่ากับ $97 \mu A$ ดังสมการที่ (5) เพื่อควบคุม g_{m1} และ g_{m2} อุปกรณ์พาสซีฟคือค่าความจุโดยเลือกใช้ค่ามาตรฐานมีค่าเท่ากับ $C_1 = C_2 = 1 nF$ รูปที่ 4 ได้แสดงผลการจำลองสัญญาณในสถานะเริ่มต้นของการกำเนิดสัญญาณ รูปที่ 5 แสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของวงจรที่นำเสนอ รูปที่ 6 แสดงสัญญาณสี่เหลี่ยม ของกระแสเอาต์พุต I_{O1} สเปกตรัมความถี่สัญญาณทางเอาต์พุตของวงจรแสดงในรูปที่ 7 โดยมีความถี่เอาต์พุตประมาณ 300.0 kHz ซึ่งเบี่ยงเบนเล็กน้อยจากค่าที่คำนวณได้ 308.83 kHz ตามสมการ (6) และมีความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (THD) ประมาณ 0.98% และ 0.84% สำหรับ I_{O1} และ I_{O2} ตามลำดับ



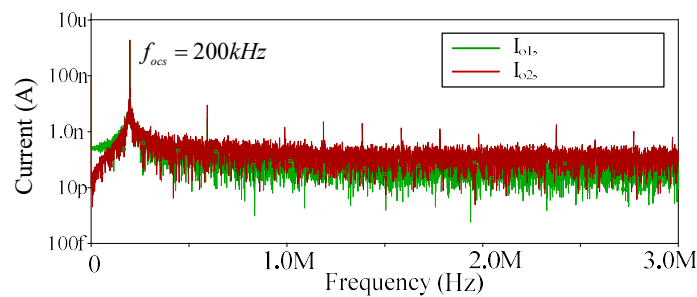
รูปที่ 4 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณ



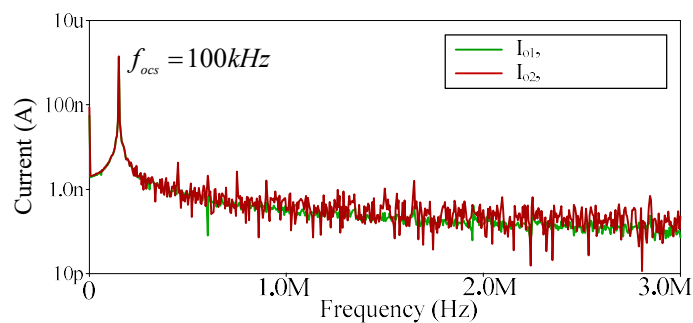
รูปที่ 5 สัญญาณเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัวของวงจรกำเนิดสัญญาณ

รูปที่ 6 สัญญาณลีสซางู ของกระแสเอาต์พุต I_{o1} 

รูปที่ 7 สเปกตรัมความถี่สัญญาณทางเอาต์พุตของวงจร ที่ค่าความจุ 1nF



รูปที่ 8 สเปกตรัมความถี่สัญญาณทางเอาต์พุตของวงจร ที่ค่าความจุ 1.5nF



รูปที่ 9 สเปกตรัมความถี่สัญญาณทางเอาต์พุตของวงจร ที่ค่าความจุ 2nF

เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการปรับความถี่ของวงจร ได้ทำการทดสอบโดยเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุเป็น 1nF, 1.5nF และ 2nF ตามลำดับ [11,12] ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 7-9 พบว่าสามารถปรับความถี่โดยการปรับค่าตัวเก็บประจุได้ ส่งผลให้ความถี่การกำเนิดสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความจุที่กำหนด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับสมการที่ (8) ที่วิเคราะห์ไว้ นอกจากนี้ ความถี่ยัง

สามารถปรับได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไบอัส IB1 และ IB2 ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของวงจรที่นำเสนอ [6,11]

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความถี่ทฤษฎีและผลจำลอง

ค่าความจุ (nF)	ความถี่ทฤษฎี (kHz)	ความถี่จำลอง (kHz)	ความคลาดเคลื่อน (%)	THD (%)
1.0	308.83	300.0	2.86	0.98, 0.84
1.5	205.89	~200.0	~2.86	-
2.0	154.42	~150.0	~2.86	-

จากผลการจำลองพบว่าวงจรที่นำเสนอมีความถี่เอาต์พุตที่ใกล้เคียงกับค่าทฤษฎี มีค่า THD ต่ำ และสามารถปรับความถี่ได้ด้วยวิธีพาสซีฟ (ปรับค่าความจุ) และวิธีแอคทีฟ (ปรับกระแสไบอัส) ซึ่งยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี [11,12,15]

4. สรุปผลการวิจัย

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์แบบควอดราเจอร์ในโหมดกระแส โดยใช้อุปกรณ์แอคทีฟ CCCCTA จำนวน 2 ตัว ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุต่อลงกราวด์ จำนวน 2 ตัว โดยวงจรสามารถให้กำเนิดสัญญาณไซน์ในรูปของเอาต์พุตกระแสที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ค่าความถี่สามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยการใช้กระแสไบอัสจากภายนอกซึ่งไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ จากการใช้อุปกรณ์พาสซีฟเฉพาะตัวเก็บประจุแบบต่อกราวด์ทำให้วงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม นอกจากนี้เอาต์พุตของวงจรยังมีค่าความต้านทานสูงเหมาะต่อการต่อใช้งานโดยไม่ต้องมีวงจรบัฟเฟอร์ มีค่าความไวต่ำทำให้วงจรมีความเสถียรสูง ผลการจำลอง การทำงานด้วยโปรแกรม PSICE จะเห็นได้ว่าค่าความเพี้ยนรวมทางฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตมีค่าสูงสุดเป็น 0.98% และ 0.84% ตามลำดับ อัตราการบริโภคพลังงานมีค่าเท่ากับ 6.23mW ทำให้วงจรที่นำเสนอมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารได้

5. ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าวงจรที่นำเสนอจะมีคุณสมบัติที่ดี แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ควรได้รับการปรับปรุง สำหรับแนวทางการพัฒนางจรในอนาคต สามารถดำเนินการได้ดังนี้

1. พัฒนาวีธีลดความไวของสัญญาณต่อความคลาดเคลื่อนของ gm เพื่อปรับปรุง THD ให้ต่ำกว่า 0.5%
2. ออกแบบวงจรรุ่นใหม่ที่สามารถควบคุม CO และ FO ได้แบบ non-interactive เพื่อลดการรบกวนระหว่างตัวแปร
3. ปรับปรุงโครงสร้างภายในของ CCCCTA เพื่อลด power consumption เพิ่มเติม
4. ขยายการใช้งานไปยังความถี่สูง (high-frequency operation) โดยปรับปรุงการตอบสนองของอุปกรณ์และลด parasitic effect
5. การทดสอบเฉพาะ Simulation งานวิจัยนี้นำเสนอผลการจำลองเท่านั้น ยังไม่มีการสร้างต้นแบบวงจรเพื่อยืนยันสมรรถนะในสภาพการใช้งานจริง

ผลลัพธ์ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าวงจรที่เสนอนั้นมีสมรรถนะดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบประมวลผลสัญญาณอนาล็อกสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งมีศักยภาพสำหรับการพัฒนาต่อยอดในอนาคตให้มีความสามารถสูงขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ทุนในการดำเนินการวิจัย และสาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ในการอนุเคราะห์สถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jaikla, W., Adhan, S., Suwanjan, P., Kumngern, M. (2020). Current/Voltage Controlled Quadrature Sinusoidal Oscillators for Phase Sensitive Detection Using Commercially Available IC. *Sensors*, 20 (5), 1319. doi: <https://doi.org/10.3390/s20051319>
- [2] Arora, T. S., Singh, A. K. (2022). A new voltage mode sinusoidal quadrature oscillator employing second generation voltage conveyor. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, 154, 154304. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2022.154304>
- [3] Prommee, P. (2017). Integrable CMOS-Based Current-Mode Sinusoidal Frequency and Peak Detector. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 36 (12), 4937–4962. doi: <https://doi.org/10.1007/s00034-017-0604-8>
- [4] M. Siripruchyanun and W. Jaikla, “Electronically controllable current-mode and voltage-mode OTA-based quadrature sinusoidal oscillators,” *AEÜ - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 61, no. 1, pp. 64–72, 2007.
- [5] R. Senani, D. R. Bhaskar, and A. K. Singh, *Sinusoidal Oscillators and Waveform Generators using Modern Electronic Circuit Building Blocks*, Springer, 2016.
- [6] M. T. Abuelma’atti, “A new current-mode quadrature oscillator using single current controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA),” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 55, no. 6, pp. 150–156, 2008.
- [7] W. Jaikla, M. Siripruchyanun, and S. Lawanwisut, “Current-mode quadrature oscillator using two CCCDTAs and grounded capacitors,” *AEÜ - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 64, no. 9, pp. 781–786, 2010.
- [8] A. Fabre, O. Saaid, and F. Wiest, “High frequency applications based on a new current controlled conveyor,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 82–91, 1996.
- [9] M. Siripruchyanun and W. Jaikla, “Current controlled current conveyor transconductance amplifier (CCCCTA): a building block for analog signal processing,” *Electrical Engineering*, Vol. 90, No. 6, 2008, pp. 443–453.
- [10] Jantakun, A., & Jaikla, W. Current-mode quadrature oscillator based on CCCDTAs with noninteractive dual-current control for both condition of oscillation and frequency of oscillation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 21(1), 81–89. <https://doi.org/10.3906/elk-1206-22>, (2013).
- [11] Jantakun, A. Current-mode Quadrature Oscillator using CCCCTAs with Non-interactive Current Control for CO, FO and Amplitude. *Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials* Vol. 45, No. 1, pp 47 – 56, 2015.
- [12] N. Herencsar, J. Koton, and K. Vrba, “Design of electronically tunable current-mode oscillators using modern active elements,” *Electronics*, vol. 9, no. 10, pp. 1–15, 2020.
- [13] A. Kumar and R. Senani, “New resistorless sinusoidal oscillators using current-mode building blocks,” *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*, vol. 131, 153607, 2021.
- [14] P. Kumhom and W. Jaikla, “Quadrature sinusoidal oscillator using two DDCCs with electronic tunability,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 7001–7010, 2022.
- [15] M. Kumngern and N. Thuathong, “Electronically controllable quadrature oscillator based on modern current-mode devices,” *IETE Technical Review*, vol. 40, no. 3, pp. 567–575, 2023.
- [16] A. Tangsrirat, “High-performance current-mode quadrature oscillator using modified active building blocks,” *Microelectronics Journal*, vol. 136, 105794, 2024.

การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว

Development of Remote Monitoring and Control System for Smart Home using Embedded Technology

ปิยะ มัชฌิมิต¹ อภัสรา ยอดนุ่ม² จิรเมธ ปัตตะเวส³ อาศิรา สนธิธรรม^{4*}
กฤษณะ ยอดนิล⁵ อำนาจ ประจง⁶ อนุสรณ์ สิ้นสะอาด⁷ และ นัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์⁸

^{1,2,3,4,6,7,8}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

⁵สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

¹Email: xbpt007@gmail.com; ²Email: arpatsaraphuengsuk@gmail.com; ³Email: Maungthong1656@gmail.com; ^{4*}Email: patthayawat.s@nsru.ac.th;

⁵Email: krisana.y@nsru.ac.th; ⁶Email: amnaj.p@nsru.ac.th; ⁷Email: anusorn.s@nsru.ac.th; ⁸Email: nutthapan.p@nsru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว เพื่อเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน โดยระบบถูกออกแบบให้สามารถควบคุมและตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ตโฟน ซึ่งเชื่อมต่อกับบอร์ด ESP32 ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ระบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนฮาร์ดแวร์ที่เชื่อมต่อบอร์ด ESP32 กับโมดูลควบคุมไฟฟ้าและเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุไวไฟ และส่วนซอฟต์แวร์ที่พัฒนาให้รองรับการสั่งงานและแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ ผลการทดสอบระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) การทดสอบการควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าระบบสามารถรับและส่งคำสั่งได้รวดเร็ว โดยมีอัตราการตอบสนองเฉลี่ย 1 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้สัญญาณ Home Wi-Fi และ 2 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้สัญญาณ Sim Net และ (2) การทดสอบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควันด้วยเซ็นเซอร์ MQ2 พบว่าระบบสามารถตรวจจับและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีเวลาเฉลี่ยในการตอบสนอง 1.4 วินาทีต่อครั้งสำหรับสัญญาณ Home Wi-Fi และ 2.4 วินาทีต่อครั้งสำหรับสัญญาณ Sim Net จากผลการดำเนินการทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ระบบจำลองบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและการแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน ช่วยเพิ่มความสะดวก ปลอดภัย และประสิทธิภาพในการจัดการพลังงานภายในบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : บ้านอัจฉริยะ ระบบควบคุมระยะไกล อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง แอปพลิเคชัน Blynk

Abstract

This research aims to develop an experimental set of remote monitoring and control smart home using embedded technology to enhance convenience and safety in managing household electrical devices. The system is designed to allow users to control and monitor electrical appliances through the Blynk application on a smartphone, connected to the ESP32 board via an Internet network. The system consists of two main components: (1) a hardware section, which connects the ESP32 board to electrical control modules and flammable gas detection sensors, and (2) a software section, which enables real-time control and alert functions. The system was tested in two parts: (1) Remote control testing via the Blynk application, where the system demonstrated fast and stable performance, with an average response time of 1 second per operation using a Home Wi-Fi connection and 2 seconds per operation using a Sim Net connection; and (2) Flammable gas and smoke detection testing using an

MQ2 sensor, where the system successfully detected and transmitted alerts through the application, with an average response time of 1.4 seconds per operation for Home Wi-Fi and 2.4 seconds per operation for Sim Net. Overall, the results indicate that the developed smart home simulation system performs with high stability and efficiency in both remote electrical device control and emergency alert notifications. The system enhances convenience, safety, and energy management efficiency within a smart home environment.

Keyword: Internet of Things (IoT), Remote Monitoring, Smart Home, Blynk Application,

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ท่ามกลางการเปลี่ยนแปลงทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยีอันเนื่องมาจากโลกาภิวัตน์และกระบวนการบูรณาการ กำลังเผชิญกับความท้าทายในการผสมรวมความสามารถในการแข่งขัน และการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนไปพร้อมๆ กัน เห็นได้ชัดว่าความท้าทายนี้จะส่งผลกระทบต่อประเด็นด้านคุณภาพของเมือง เช่น ที่อยู่อาศัย เศรษฐกิจ วัฒนธรรม สังคม และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ไม่ว่าจะเป็นเมืองขนาดใหญ่ และเมืองขนาดกลาง ล้วนแต่มีมุมมองด้านการพัฒนาเมืองให้มีความทันสมัยด้วยการใช้เทคโนโลยีที่ล้ำสมัยสำหรับการยกระดับคุณภาพชีวิต ปัจจุบันเทคโนโลยีดิจิทัล และระบบอินเทอร์เน็ตมีบทบาทสำคัญในการอำนวยความสะดวกให้กับมนุษย์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในยุคดิจิทัล ที่เทคโนโลยีเป็นปัจจัยหลักในการดำเนินกิจกรรมประจำวัน รวมถึงการใช้ควบคุมดูแลสิ่งต่าง ๆ รอบตัว เช่น บ้านพักอาศัย สัตว์เลี้ยง เป็นต้น โดยในปัจจุบันมีอุปกรณ์อำนวยความสะดวกมากมายภายในบ้าน เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้พักอาศัย อีกทั้งเป็นยุคคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ต และอุปกรณ์พกพา เริ่มมีความนิยมในวงกว้าง การติดต่อสื่อสารหรือควบคุมไร้สายช่วยเพิ่มความสะดวกสบาย [1] ลักษณะของระบบบ้านอัจฉริยะ (Smart Home) ที่สามารถใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในบ้าน เช่น กล้องวงจรปิด เพื่อที่พ่อแม่จะสามารถเฝ้าดูหรือติดตามพฤติกรรมของลูก พฤติกรรมของพี่เลี้ยงเด็ก คนดูแลผู้สูงอายุที่ช่วยให้พ่อแม่ ลูกหลานรู้สึกอุ่นใจมากขึ้นในขณะที่ตนเองต้องออกมาทำงาน การเชื่อมต่อกับระบบส่องสว่างที่สามารถสั่งให้เปิด-ปิดหลอดไฟ การเปิด-ปิดเครื่องปรับอากาศได้ก่อนที่จะเดินทางกลับถึงบ้าน เครื่องซักผ้า ที่ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องได้ในขณะที่ไม่ได้อยู่ที่บ้าน [2] “บ้านอัจฉริยะ” หรือ Smart home จึงได้กลายมาเป็นหัวข้อสำคัญที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง บ้านอัจฉริยะเป็นตัวอย่างที่แสดงได้ดีถึงการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร (Information and Communications Technology: ICT) และอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of things: IoT) รวมถึงอุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensor) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีพื้นฐานในยุคของข้อมูลและเทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการด้านต่าง ๆ [3] และทำให้การใช้ชีวิตประจำวันมีความสะดวกสบายมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความปลอดภัย และช่วยในการจัดการการใช้พลังงานให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งไม่เพียงแต่เพิ่มคุณภาพชีวิตให้กับผู้อยู่อาศัยเท่านั้น แต่ยังเป็นการสนับสนุนแนวคิดการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืนให้สอดคล้องกับวิถีชีวิตในยุคดิจิทัล [4]

จากข้อมูลในข้างต้นการเลือกใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จึงเป็นแนวคิดที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมระยะไกล ซึ่งช่วยให้การเชื่อมต่อ และการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ภายในบ้านพักอาศัยเป็นไปอย่างอัตโนมัติ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว ที่สามารถควบคุมได้ทั้งระบบควบคุมไฟฟ้า ระบบควบคุมปรับอากาศ และระบบตรวจสอบควันไฟและแก๊ส ซึ่งระบบควบคุมระยะไกลที่พัฒนาขึ้น คณะผู้วิจัยได้เลือกบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 มาทำงานร่วมกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต และโมดูลสื่อสารไร้สายสำหรับรับคำสั่งจากแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน และนำระบบที่พัฒนาขึ้นติดตั้งลงในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานอุปกรณ์สามารถควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ ภายในบ้านพักอาศัยของตนเองได้อย่างสะดวกสบาย และสามารถควบคุมการใช้พลังงานภายในที่พักอาศัยได้ การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวนี้เป็นการวางแนวคิดสำหรับนักพัฒนาในการออกแบบและพัฒนาระบบเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานของผู้คน ส่งเสริมคุณภาพชีวิต และความยั่งยืนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว
- 1.2.2 เพื่อทดสอบระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว สามารถทำงานผ่านระบบควบคุมหลักด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล และควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ ซึ่งระบบควบคุมชุดจำลองสามารถควบคุมในรูปแบบควบคุมระยะไกลผ่านแพลตฟอร์มแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS ระบบควบคุมสามารถทำงานในส่วนของการระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ และระบบตรวจสอบควันไฟและแก๊ส

1.4 สมมติฐานการวิจัย

ระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวที่พัฒนาขึ้น สามารถทำงานตามเงื่อนไขที่ทดสอบได้

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว คณะผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย 1) ตัวแปรนำเข้า (Input) 2) กระบวนการพัฒนาระบบ (Process) 3) ผลลัพธ์ (Output) และ ผลลัพธ์เชิงคาดหวัง (Outcome) ดังรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัยการพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว

1.5.1 ตัวแปรนำเข้า (Input) ระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกล ทำงานผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว รุ่น ESP32 ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมหลักของระบบที่จะควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า เช่น โมดูลรีเลย์ เซ็นเซอร์ต่างๆ ฯลฯ เป็นต้น โดยบอร์ดสมองกลฝังตัวจะทำงานและเชื่อมต่อสัญญาณอินเทอร์เน็ตด้วยเครือข่ายการสื่อสารทั้งแบบ Wi-Fi และ Cellular และควบคุมในระยะไกลได้ด้วยแพลตฟอร์ม เช่น แอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS

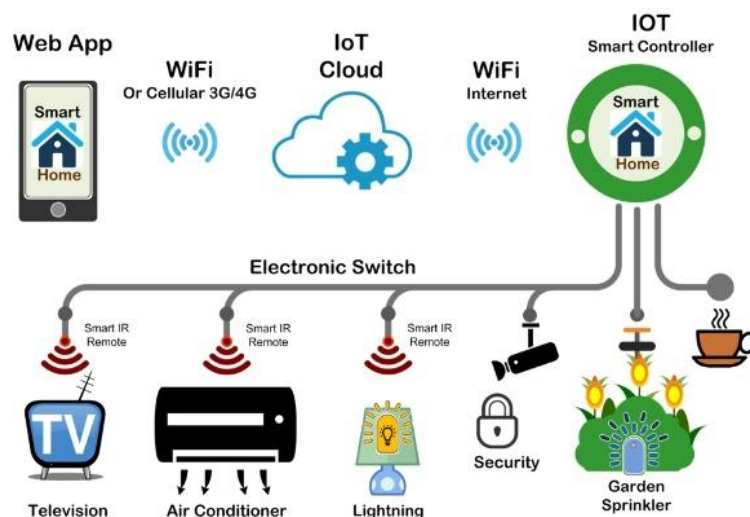
1.5.2 กระบวนการพัฒนาระบบ (Process) ประกอบด้วย 1) การออกแบบระบบจำลองบ้านอัจฉริยะ 2) การพัฒนาและติดตั้งวงจรสมองกลฝังตัว 3) การเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าและเซ็นเซอร์ 4) การเชื่อมต่อกับแอปพลิเคชันควบคุมระยะไกล และ 5) การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพระบบที่มีการทดสอบความถูกต้อง ความเสถียร และความรวดเร็วของระบบรับ-ส่งข้อมูล

1.5.3 ผลลัพธ์ (Output) ของระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวที่พัฒนาขึ้น สามารถควบคุมและตรวจสอบการทำงานของบ้านอัจฉริยะทั้งภายใน และภายนอกบ้านได้แบบเรียลไทม์ ผ่านอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS หรือคอมพิวเตอร์ได้ อีกทั้งสามารถสร้างข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ วางแผนการใช้ทรัพยากรไฟฟ้าของบ้านได้

1.5.4 ผลลัพธ์เชิงคาดหวัง (Outcome) ของระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวที่พัฒนาขึ้น สามารถสร้างองค์ความรู้ด้าน IoT และสมองกลฝังตัวสำหรับนักวิจัย นักศึกษา หรือผู้ที่สนใจ เพื่อนำไปเป็นต้นแบบระบบบ้านอัจฉริยะที่ใช้งานได้จริง ลดต้นทุนการพัฒนาระบบบ้านอัจฉริยะในเชิงการศึกษา/วิจัย และรองรับการต่อยอดไปสู่การพัฒนาบ้านอัจฉริยะเชิงพาณิชย์ที่สามารถควบคุมต้นทุนการพัฒนาระบบได้

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

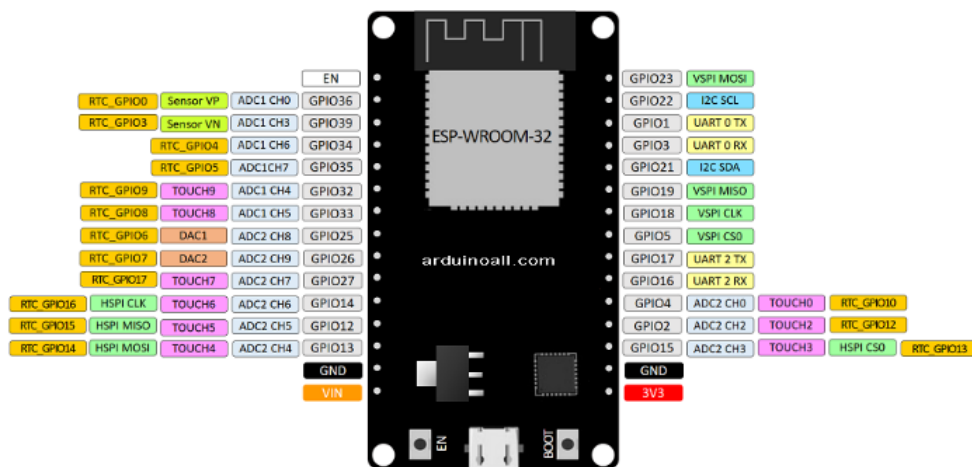
2.1 บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) เป็นหัวข้อสำคัญที่ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในยุคของข้อมูลและเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และอุปกรณ์เซ็นเซอร์ อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัย โดยเฉพาะความสะดวกสบาย ความปลอดภัย และการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ [5] การยกระดับคุณภาพที่อยู่อาศัยอันนำมาซึ่งคุณภาพชีวิตของประชาชนในเมืองอัจฉริยะ โดยการดำรงชีวิตอัจฉริยะ (Smart Living) หมายถึง แนวคิดในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในทุก ๆ แง่มุมดังต่อไปนี้ 1) สิ่งอำนวยความสะดวกทางวัฒนธรรม (Cultural Facilities) 2) เงื่อนไขด้านสุขภาพ (Health Conditions) 3) ความปลอดภัยส่วนบุคคล (Individual safety) 4) คุณภาพที่อยู่อาศัย (Housing Quality) 5) สิ่งอำนวยความสะดวกทางการศึกษา (Education Facilities) 6) ความน่าดึงดูดด้านการท่องเที่ยว (Touristic Attractivity) และ 7) การอยู่ร่วมกันในสังคม (Social Cohesion) [6] ดังรูปที่ 2 ดังนั้น ความสะดวกสบายและความปลอดภัยเป็นสิ่งที่มนุษย์ต้องการให้กับปัจจัยในเรื่องของการอยู่อาศัย เทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะ [7]



รูปที่ 2 ระบบบ้านอัจฉริยะ หรือ สมาร์ทโฮม [11]

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มาพร้อม Wi-Fi มาตรฐาน 802.11 b/g/n และบลูทูธรุ่น 4.2 ซึ่งเป็นรุ่นต่อความสำเร็จของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 โดยในรุ่นนี้ได้ออกมาแก้ไขข้อเสียของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทั้งหมด โดย CPU ใช้สถาปัตยกรรม Tensilica LX6 จำนวน 2 คอร์ สัญญาณนาฬิกา 240MHz สามารถแยกการทำงานระหว่างโปรแกรมจัดการ Wi-Fi และแอปพลิเคชันออกจากกันได้ ทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นมาก สามารถใช้งานด้วยการเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอล UDP ที่จะสามารถรับ – ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 135Mbps ใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3V ในโหมด Sleep ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 2.5 μ A ด้วยเหตุนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้งาน [8] ดังรูปที่ 3

ESP32 DEVKIT V1 – DOIT version with 30 GPIOs



รูปที่ 3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 [12]

2.3 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) หรือ IoT หมายถึง ระบบ IoT คือ ระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลและทำงานร่วมกันได้อย่างอัตโนมัติ ระบบ IoT นี้มีความสำคัญในการเชื่อมโยงอุปกรณ์ในโลกดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิต ทำให้เกิดการควบคุมและการจัดการที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่ง IoT มีจุดประสงค์ในการช่วยให้ผู้บริโภคใช้ชีวิตได้ง่ายขึ้น สะดวกสบาย และเพื่อสุขภาพที่ดีขึ้น การประยุกต์ใช้ IoT ในชีวิตประจำวัน เมื่อระบบที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ตแล้ว เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบระบบการทำงานได้แบบเรียลไทม์ ไม่ว่าจะเป็นอยู่ที่ไหน เวลาใดก็ตาม ยกตัวอย่างเช่น Smart Home หรือ ระบบบ้านอัจฉริยะ เป็นการนำ ระบบ IoT ที่สามารถส่งสัญญาณผ่านอินเทอร์เน็ตได้ มาทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์บนโทรศัพท์มือถือ ทำให้สามารถควบคุมระบบไฟฟ้า อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือ ระบบรักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ภายในบ้านด้วยการกดปุ่มสั่งการผ่านสมาร์ตโฟน (Smartphone) หรือใช้เสียงพูด (Voice Command) ช่วยในการเปิดปิดหรือควบคุมการทำงานของสิ่งของในบ้าน นอกจากจะช่วยให้การอยู่อาศัย และการดูแลบ้านมีความสะดวกสบาย ทนสม้ยมากขึ้น ยังช่วยเรื่องความปลอดภัย และช่วยประหยัดทั้งเวลา และค่าไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น [9]

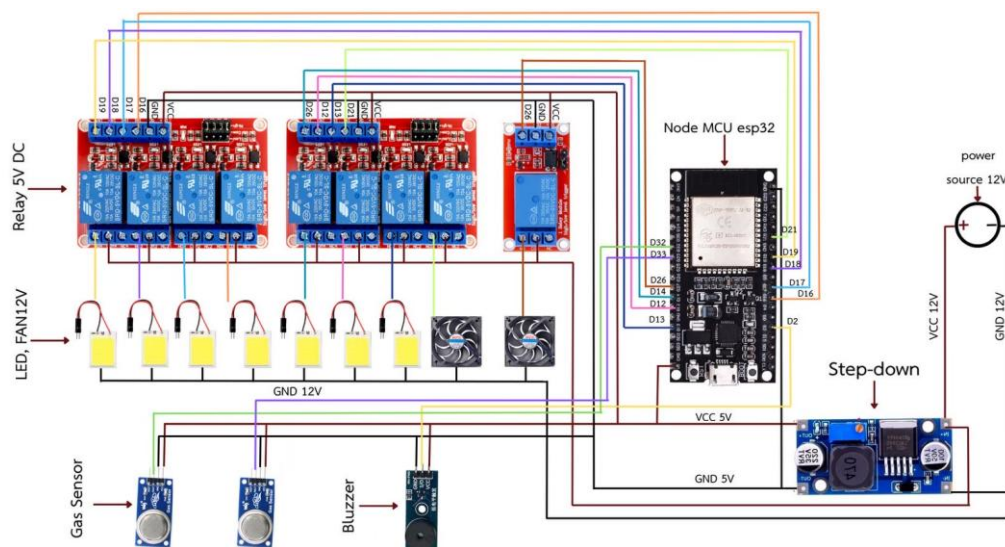
2.4 แอปพลิเคชัน Blynk เป็นชื่อโดยรวมของการบริการให้ผู้ใช้งานได้ใช้งานเครื่องแม่ข่าย คือ Blynk Server ที่เป็น IoT Cloud ซึ่งถูกพัฒนามาจากภาษา Java ทำให้สามารถทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการที่หลากหลาย เช่น Windows, Mac หรือ Linux โดยเครื่องแม่ข่าย (Blynk Server) พัฒนาเป็นรูปแบบเปิด (Open-Source) ภายใต้ลิขสิทธิ์แบบ GNU ทำให้สามารถนำ Blynk ไปใช้งานประกอบการสร้างนวัตกรรมเพื่อการค้า แก้ไข ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแจกจ่ายได้ ซึ่งสามารถดูภาพรวมของระบบได้ [10] Blynk App คือ แอปพลิเคชันสำเร็จรูปที่ใช้สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) ที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ตในลักษณะการเชื่อมต่อเครื่องแม่ข่าย (Server) ไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย (Client) เช่น Arduino, ESP-8266, ESP-32, NodeMCU และ Raspberry Pi ซึ่งแอปพลิเคชัน Blynk สามารถใช้งานได้ฟรี และใช้งานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ IOS และ Android โดยเริ่มต้นหลังจากสมัครเข้าใช้งาน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว คณะผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยได้ทำการแบ่งรูปแบบการดำเนินงานไว้ 3 ส่วน คือ 1) ส่วนระบบควบคุม 2) ส่วนระบบซอฟต์แวร์ และ 3) ส่วนชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 ส่วนระบบควบคุม

การออกแบบและพัฒนาระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล และควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยการทำงานจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การควบคุมเปิด-ปิดระบบแสงสว่างภายในบ้านบริเวณชั้นล่าง จำนวน 3 ห้อง และบริเวณชั้นบน จำนวน 4 ห้อง ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โดยเมื่อผู้ใช้งานสั่งการทำงานผ่านโทรศัพท์มือถือ บอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 จะทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งการทำงานไปยังรีเลย์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุม ระบบไฟแสงสว่างก็จะติดสว่างตามการสั่งงาน ส่วนที่ 2 การตรวจสอบควันไฟและแก๊ส เมื่อเซ็นเซอร์ MQ-2 ตรวจจับควันไฟในอากาศได้ตามระดับความเข้มข้นของแก๊สที่ช่วง 10-10,000 ppm ได้นั้น จะส่งผลการตรวจวัดไปยัง บอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 ที่จะประมวลผลแล้วสั่งให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณเสียงดังขึ้น แล้วแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และส่วนที่ 3 การควบคุมเปิด-ปิดระบบปรับอากาศภายในบ้านบริเวณชั้นล่าง จำนวน 1 ตัว และบริเวณชั้นบน จำนวน 1 ตัว ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โดยเมื่อผู้ใช้งานสั่งการทำงานผ่านโทรศัพท์มือถือ บอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 จะทำหน้าที่ประมวลผลและสั่งการทำงานไปยังรีเลย์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุม ระบบปรับอากาศก็จะทำงานตามการสั่งงาน ซึ่งส่วนระบบควบคุมได้ออกแบบระบบไว้ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบควบคุมระยะไกลสำหรับบ้านอัจฉริยะ

3.2 ส่วนระบบซอฟต์แวร์

การพัฒนาส่วนระบบซอฟต์แวร์สำหรับระบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวนั้น การเขียนโปรแกรมคำสั่ง และการเชื่อมต่อชุดคำสั่งต่าง ๆ จะสามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมคำสั่งผ่านโปรแกรม Arduino IDE ลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ดังรูปที่ 5 โดยกำหนดคำสั่งให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่สามารถประมวลผล และควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อออกภายนอก และรับสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อผ่านสัญญาณแบบ Wi-Fi ได้ เพื่อรับและส่งข้อมูลในระยะไกลได้ด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านทางสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ

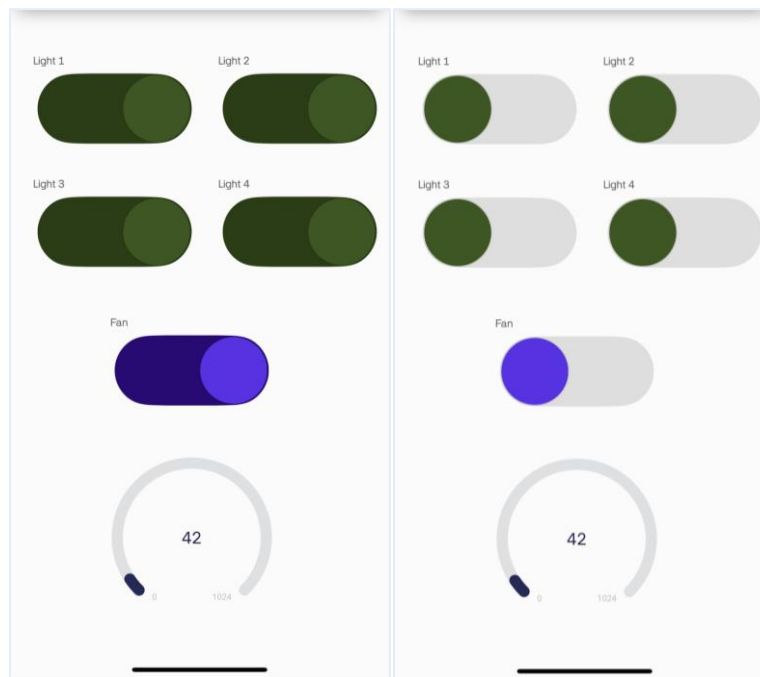
iOS ดังรูปที่ 6 หรือแดชบอร์ดของเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 7 เพื่อให้เห็นถึงสถานะการแจ้งเตือนของระบบ และสามารถควบคุมการปิด-เปิดระบบต่าง ๆ ภายในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะได้

```

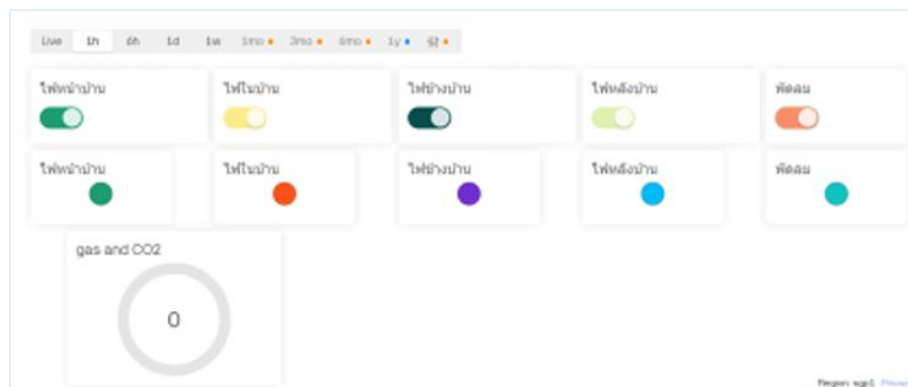
1  #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6xZ8drJbR"
2  #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Smart Home Controller"
3  #define BLYNK_AUTH_TOKEN "J1cVdWIBhzhUxr2YKMBR1B3Gq_6JTadW"
4
5  #include <WiFi.h>
6  #include <BlynkSimpleEsp32.h>
7  BlynkTimer timer;
8
9  // Wi-Fi
10 char ssid[] = "pee";
11 char pass[] = "0987654321";
12
13 // กำหนดขารีเลย์
14 #define RELAY1 2 // ไฟโซน 1
15 #define RELAY2 4 // ไฟโซน 2
16 #define RELAY3 5 // ไฟโซน 3
17 #define RELAY4 18 // ไฟโซน 4
18 #define RELAY5 19 // ไฟโซน 5
19 #define RELAY6 21 // ไฟโซน 6
20 #define RELAY7 22 // ไฟโซน 7
21 #define RELAY8 23 // พัดลมโซน 1
22 #define RELAY9 15 // พัดลมโซน 2
23
24 int relayState[9] = {0}; // เก็บสถานะรีเลย์
25
26 // BLYNK Virtual Pins (V0-V6 = ไฟ, V7 & V10 = พัดลม)
27 BLYNK_WRITE(V0) { relayState[0] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY1, relayState[0]); }
28 BLYNK_WRITE(V1) { relayState[1] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY2, relayState[1]); }
29 BLYNK_WRITE(V2) { relayState[2] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY3, relayState[2]); }
30 BLYNK_WRITE(V3) { relayState[3] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY4, relayState[3]); }
31 BLYNK_WRITE(V4) { relayState[4] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY5, relayState[4]); }
32 BLYNK_WRITE(V5) { relayState[5] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY6, relayState[5]); }
33 BLYNK_WRITE(V6) { relayState[6] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY7, relayState[6]); }
34 BLYNK_WRITE(V7) { relayState[7] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY8, relayState[7]); }
35 BLYNK_WRITE(V10) { relayState[8] = param.asInt(); digitalWrite(RELAY9, relayState[8]); }
36
37 void setup() {
38   Serial.begin(115200);
39   Blynk.begin(BLYNK_AUTH_TOKEN, ssid, pass);
40
41   // ตั้งขารีเลย์เป็น OUTPUT และปิดไว้ก่อน
42   int pins[] = {RELAY1, RELAY2, RELAY3, RELAY4, RELAY5, RELAY6, RELAY7, RELAY8, RELAY9};
43   for (int i = 0; i < 9; i++) {
44     pinMode(pins[i], OUTPUT);
45     digitalWrite(pins[i], LOW); // เริ่มต้นให้รีเลย์ปิด
46   }
47 }
48
49 void loop() {
50   Blynk.run();
51   timer.run();
52 }

```

รูปที่ 5 ชุดโปรแกรมคำสั่งด้วยโปรแกรม Arduino IDE



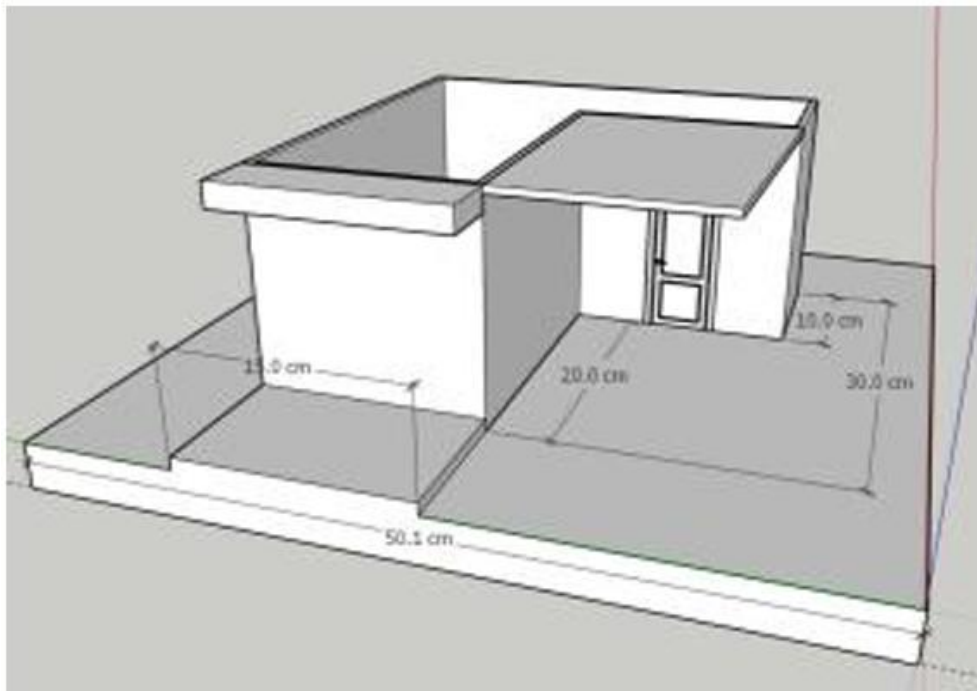
รูปที่ 6 หน้าจอแสดงผลของแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านทางสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต



รูปที่ 7 หน้าจอแสดงผลของแดชบอร์ดบนเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังผู้ใช้งาน

3.3 ส่วนชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ

การพัฒนาแบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยใช้โปรแกรม Sketch Up ในการออกแบบโครงสร้างให้เป็นแบบสามมิติ ที่มีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร จัดวางรูปแบบให้มีบ้านพักแบบ 2 ชั้น และมีสวนกลางแจ้ง ดังรูปที่ 8 เมื่อสร้างชุดจำลองบ้านอัจฉริยะเรียบร้อยแล้ว จึงนำส่วนระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น ติดตั้งลงบนที่ส่วนของชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยส่วนระบบควบคุมประกอบไปด้วย 1) ชุดโมดูล ESP32 สำหรับควบคุมระบบที่ใช้ในการสั่งการและเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน 2) ชุดโมดูลรีเลย์ 4 ช่อง จำนวน 2 ชุด สำหรับเป็นอุปกรณ์ควบคุมการเปิด - ปิดระบบต่าง ๆ ของบ้าน โดยแบ่งเป็นโมดูลรีเลย์ควบคุมชั้น 1 และโมดูลรีเลย์ควบคุมชั้น 2 เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบรดน้ำ ระบบให้อาหารสัตว์เลี้ยง และระบบตรวจสอบแก๊สรั่วไหล 2 จุดพร้อมโมดูลส่งเสียงสัญญาณแจ้งเตือน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 รูปแบบสามมิติของชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ



รูปที่ 9 ชุดจำลองบ้านอัจฉริยะที่สร้างตามแบบ และติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

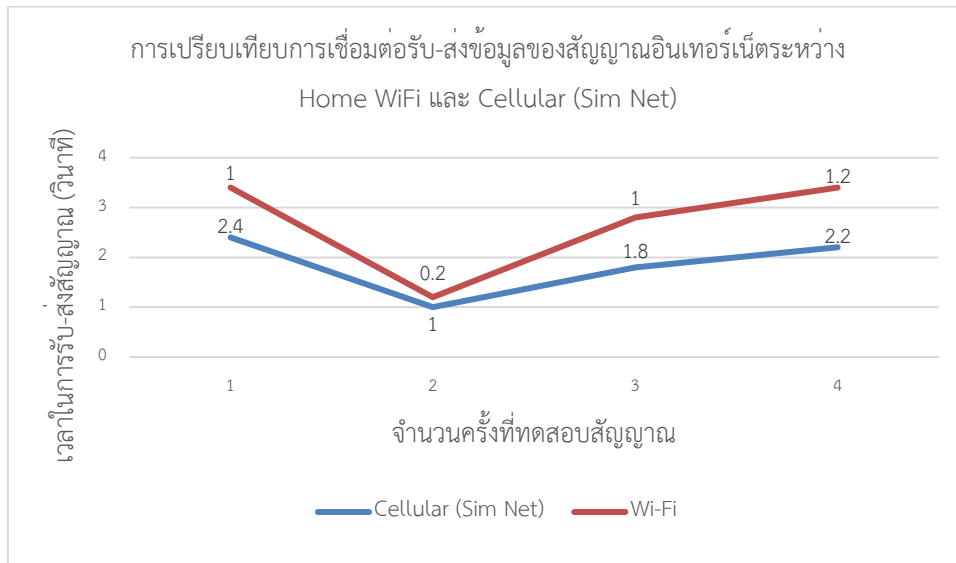
จากรูปที่ 9 เมื่อดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ระบบควบคุมการทำงานแบบระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว ซึ่งสำหรับใช้กับชุดจำลองบ้านอัจฉริยะเรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบระบบการทำงานของชุดควบคุมอุปกรณ์ภายในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะแต่ละส่วน รวมถึงการทดสอบควบคุมในระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS เพื่อเป็นทดสอบส่วนต่าง ๆ และการแสดงผลในรูปแบบเรียลไทม์ของค่าที่ได้รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ รวมถึงทดสอบระบบแจ้งเตือน และการควบคุม (Control System) สามารถสั่งการได้ทั้งแบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้งในรูปแบบ Wi-Fi และ Cellular ซึ่งการทดสอบและผลการทดสอบแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การพัฒนาบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว คณะผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยได้กำหนดการทดสอบระบบต่าง ๆ ไว้จำนวน 2 การทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk

การทดสอบระบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนอุปกรณ์สมาร์ตโฟน คณะผู้วิจัยได้เลือกสั่งการเปิด – ปิดระบบไฟฟ้าภายในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยกำหนดการควบคุมในระยะไกลไว้จำนวน 4 ครั้ง เพื่อทดสอบการรับและส่งสัญญาณของบอร์ดสมองกลฝังตัว และสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่เลือกใช้ทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบ Home Wi-Fi และแบบ Cellular (Sim Net) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟผลการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลของสัญญาณอินเทอร์เน็ตระหว่าง Wi-Fi และ Cellular (Sim Net)

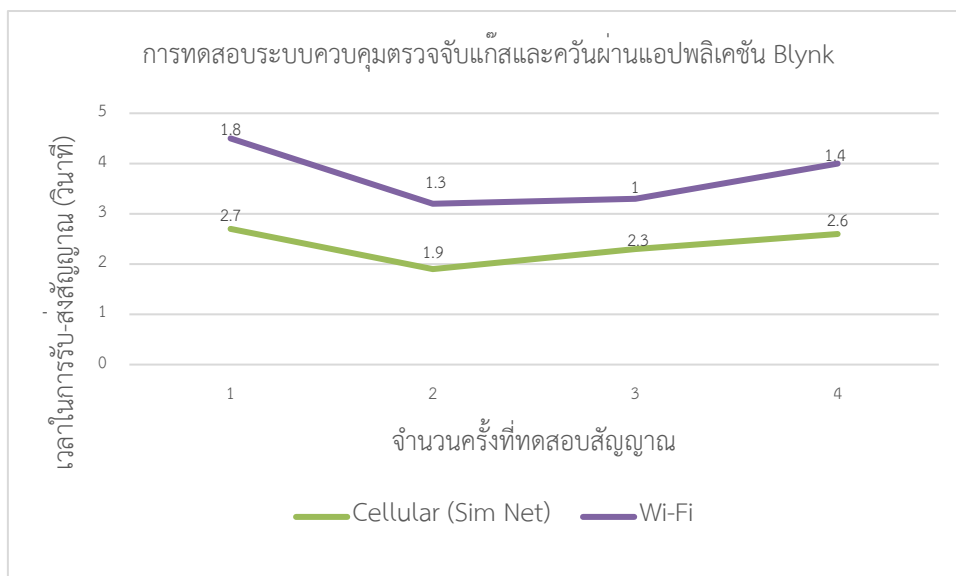
จากรูปที่ 10 ผลการทดสอบระบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัวที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนอุปกรณ์สมาร์ตโฟน คณะผู้วิจัยได้เลือกสั่งการเปิด – ปิดระบบไฟฟ้าภายในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ โดยกำหนดการควบคุมในระยะไกลไว้จำนวน 4 ครั้ง เพื่อทดสอบการรับและส่งสัญญาณของบอร์ดสมองกลฝังตัว และสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่เลือกใช้ทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบ Home Wi-Fi และแบบ Cellular (Sim Net) พบว่า ระบบควบคุมการทำงานที่พัฒนาขึ้นสามารถรับ และส่งข้อมูลคำสั่งระหว่างผู้ใช้งานและอุปกรณ์ควบคุมได้อย่างรวดเร็ว โดยจากการทดสอบสั่งการทำงาน 4 ครั้ง ระบบสามารถสั่งการทำงานได้ในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 1 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Home Wi-Fi และอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 2 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Sim Net

4.2 การทดสอบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควัน

เมื่อติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุไวไฟและควันแล้วเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับบอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 ให้ทำหน้าที่ส่งการแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ดังนั้น การทดสอบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควัน คณะผู้วิจัยจะทำการทดสอบโดยการนำความร้อนจากอุปกรณ์จุดไฟจากแก๊ส เพื่อให้เกิดประกายไฟ และควันขึ้นภายในชุดจำลองบ้านอัจฉริยะ ดังรูปที่ 11 โดยทำการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง เพื่อทดสอบการรับและส่งสัญญาณของบอร์ดสมองกลฝังตัวไปยังอุปกรณ์สมาร์ตโฟน และส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยเสียงร่วมด้วย โดยการทดสอบนี้เลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบ Home Wi-Fi และแบบ Cellular (Sim Net) ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 การทดสอบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควันจากอุปกรณ์จุดไฟจากแก๊ส



รูปที่ 12 กราฟผลการตอบสนองการแจ้งเตือนระบบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควันจากอุปกรณ์จุดไฟจากแก๊สไปยังผู้ใช้งาน

จากรูปที่ 12 ผลการตอบสนองการแจ้งเตือนระบบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควันจากอุปกรณ์จุดไฟจากแก๊สไปยังผู้ใช้งาน เมื่อตรวจจับแล้วจะส่งค่าข้อมูลมายังบอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 ให้ทำหน้าที่ส่งการแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่า การทดสอบสั่งการทำงาน 4 ครั้ง ชุดโมดูล MQ2 สามารถตรวจจับวัตถุไวไฟและควันได้ และส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน Blynk ในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 1.4 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Home Wi-Fi และอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 2.4 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Sim Net ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้สถานการณ์ได้อย่างทันที และสามารถดำเนินการแก้ไข หรือป้องกันเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้

4. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองบ้านอัจฉริยะแบบควบคุมระยะไกลผ่านบอร์ดสมองกลฝังตัว มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบต้นแบบบ้านอัจฉริยะที่สามารถควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านได้จากระยะไกลผ่านสมาร์ทโฟน โดยใช้แอปพลิเคชัน Blynk เป็นแพลตฟอร์มในการสั่งการ ซึ่งเชื่อมต่อกับบอร์ดสมองกลฝังตัว ESP32 ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ระบบดังกล่าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนฮาร์ดแวร์ ซึ่งใช้บอร์ด ESP32 เชื่อมต่อกับโมดูลสื่อสารไร้สายและอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้า รวมถึงเซ็นเซอร์สำหรับ

ตรวจจับวัตถุไวไฟ และส่วนซอฟต์แวร์ ที่พัฒนาให้สามารถสั่งการเปิด-ปิดระบบไฟฟ้า และแจ้งเตือนเมื่อมีการตรวจพบวัตถุไวไฟหรือควัน หลังจากสร้างและติดตั้งชุดจำลองระบบบ้านอัจฉริยะเรียบร้อยแล้ว ได้มีการทดสอบระบบ 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การทดสอบระบบควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ทำการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง โดยใช้การเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ต 2 รูปแบบ คือ Home Wi-Fi และ Cellular (Sim Net) ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถรับ-ส่งคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและเสถียร โดยมีอัตราการตอบสนองเฉลี่ย 1 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้ Home Wi-Fi และ 2 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้สัญญาณแบบ Sim Net และ 2) การทดสอบระบบตรวจจับวัตถุไวไฟและควัน โดยใช้เซ็นเซอร์ MQ2 ทำการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง โดยเมื่อมีการตรวจพบควันหรือวัตถุไวไฟ ระบบจะส่งสัญญาณไปยังบอร์ด ESP32 เพื่อแจ้งเตือนผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถตรวจจับและสั่งการแจ้งเตือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เวลาเฉลี่ย 1.4 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้ Home Wi-Fi และ 2.4 วินาทีต่อครั้งเมื่อใช้ Sim Net จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่า ระบบจำลองบ้านอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตและการแจ้งเตือนเหตุฉุกเฉิน ผู้ใช้งานสามารถรับข้อมูลสถานการณ์ได้แบบเรียลไทม์ ช่วยเพิ่มความสะดวกสบาย ความปลอดภัย และประสิทธิภาพในการบริหารจัดการพลังงานภายในบ้านอัจฉริยะได้อย่างเหมาะสม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพล หลวงศรี และคณะ. (2559). ระบบควบคุมบ้านอัจฉริยะบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 7 (น.261-268). นครราชสีมา.
- [2] กันทิมา คงสถิตสุวรรณ. (2561). ก้าวเข้าสู่ยุคดิจิทัลกับอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่ง. วารสารเซนตจอร์น, 222-235.
- [3] Ajayi, O., Bagula, A., & Maluleke, H. The fourth industrial revolution: “A technological wave of change.” In M. Gordan, K. Ghaedi & V. Saleh (Eds.), Industry 4.0. IntechOpen. 2022.
- [4] Adrian, M. M., Purnomo, E. P., Enrici, A., & Khairunnisa, T. “Energy transition towards renewable energy in Indonesia.” Heritage and Sustainable Development, Vol. 5, No. 1, pp. 107–118. 2023.
- [5] ปฏิพล บุญสุขโชติ, “การศึกษาการนำเทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะมาใช้ในประเทศไทยเพื่อเพิ่มคุณภาพในการอยู่อาศัยตามกรอบความคิดการดำรงชีวิตอัจฉริยะ,” สารศาสตร์, ฉบับที่ 1, หน้า 147-159, 2568.
- [6] Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanović, N., & Meijers, E. (23 สิงหาคม 2568) Smart cities: Ranking of European medium-sized cities (Final report). Centre of Regional Science (SRF), Vienna University of Technology. 2007. สืบค้นจาก : <https://www.smart-cities.eu>
- [7] พีรพัฒน์ สัตยภูเขตต์. (23 สิงหาคม 2568). เทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะ (Smart Home). สืบค้นจาก : <https://www.researchgate.net/publication/355110094>
- [8] โรบอทสยาม. (23 สิงหาคม 2568). ESP32 #1 รู้จัก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32. สืบค้นจาก : <https://robotsiam.blogspot.com/2017/11/esp32.html>
- [9] บริษัท ดิทโต (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน). (23 สิงหาคม 2568). IoT คืออะไร ตัวอย่างในชีวิตประจำวัน และการปรับใช้กับองค์กร. สืบค้นจาก : <https://www.dittothailand.com/th/ditto/news/what-is-iot/>
- [10] สุวิทย์ กิระวิทยา. (23 สิงหาคม 2568). การสร้างแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมสิ่งประดิษฐ์ด้วย Blynk ในการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ในการสร้างนวัตกรรม. สืบค้นจาก : <http://suwitkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/blynkapp1.html>
- [11] อาทร มนูญพร. (23 สิงหาคม 2568). บ้านอัจฉริยะ. สืบค้นจาก : <http://www.muinno.com/article/1>
- [12] Tech Talk 2 Apply. (12 พฤศจิกายน 2568). ESP32 คืออะไร ดีกว่า ESP8266 อย่างไร. สืบค้นจาก: <https://techtalk2apply.com/what-is-esp32/>

การพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Development of Demonstration Control System for Smart Farm via Internet of Things Technology

ณัฐภัตสร พูลสวัสดิ์¹ เพลิง เปียทงค์² ภูริพัฒน์ อินทรีใจดี³ อาศิรา สนธิธรรม^{4*}
ภฤณณะ ยอดนิล⁵ อำนาจ ประจง⁶ อนุสรณ์ สิ้นสะอาด⁷ และ นัฐพันธ์ พูนวิวัฒน์⁸

^{1,2,3,4,6,7,8}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

⁵สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

¹Email: Natphatsorn.toon@gmail.com; ²Email: hoot2546@gmail.com; ³Email: Phuriphat2033@gmail.com; ^{4*}Email: patthayawat.s@nsru.ac.th;

⁵Email: krisana.y@nsru.ac.th; ⁶Email: amnaj.p@nsru.ac.th; ⁷Email: anusorn.s@nsru.ac.th; ⁸Email: nutthapan.p@nsru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) โดยออกแบบระบบให้ประกอบด้วยส่วนฮาร์ดแวร์ ได้แก่ เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ควบคู่กับส่วนซอฟต์แวร์ที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมการทำงานร่วมกับแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk บนสมาร์ตโฟนทั้งในระบบปฏิบัติการ Android และ iOS กระบวนการทำงานของระบบประกอบด้วย การเก็บข้อมูล (Data Acquisition) การประมวลผล (Processing & Analytics) การแสดงผล (Visualization) และการควบคุม (Control System) ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้งแบบอัตโนมัติและควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่าย WiFi และ Cellular ผลการทดสอบระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การทดสอบการควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk พบว่าสามารถสั่งการได้สำเร็จในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อวินาทีเมื่อใช้สัญญาณ WiFi และ 1 ครั้งต่อ 2 วินาทีเมื่อใช้สัญญาณ Cellular 2) การทดสอบระบบเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ พบว่าสามารถส่งข้อมูลแจ้งเตือนมายังผู้ใช้และสั่งการระบบรดน้ำอัตโนมัติเพื่อรักษาระดับความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับพืช เช่น 60–75 %RH สำหรับพืชปลูกด้วยดิน และ 70–85 %RH สำหรับเห็ดในโรงเรือน และ 3) การทดสอบการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงทั้งในห้องปฏิบัติการและพื้นที่โล่ง พบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามระยะการควบคุมที่กำหนด สรุปได้ว่าระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยเกษตรกรการควบคุมการให้น้ำและปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชได้สะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบในการเรียนการสอนด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาสู่เกษตรอัจฉริยะที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกพืชชนิดอื่นในอนาคต

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ระบบควบคุมระยะไกล เกษตรอัจฉริยะ แอปพลิเคชัน Blynk

Abstract

This research aims to develop a demonstration control system for smart farms via Internet of Things technology. The system was designed with two core components: hardware, which includes sensors for monitoring soil moisture, temperature, and relative humidity; and software, which employs an ESP32 microcontroller to process and control operations in conjunction with the Blynk mobile application platform on both Android and iOS devices. The system workflow consists of four stages: data acquisition, processing and analytics, visualization, and control. It supports both automatic operation and remote control via Wi-Fi and cellular networks. The system was tested in three main aspects: (1) remote control via the Blynk application, which achieved successful command

execution at an average rate of one command per second over Wi-Fi and one command every two seconds over cellular networks; (2) sensor performance for soil moisture, temperature, and relative humidity, which successfully transmitted notifications to users and activated the automatic irrigation system to maintain optimal humidity levels, such as 60–75% RH for soil-based crops and 70–85% RH for mushroom cultivation in greenhouses; and (3) real-world operation in both laboratory and open-field environments, where the system demonstrated stable performance within the specified control range. In conclusion, the developed smart farming simulation system enhances farmers' ability to conveniently, rapidly, and efficiently manage irrigation and other environmental factors essential for plant growth. Furthermore, the system can serve as a prototype for teaching and learning in electrical engineering and related fields, as well as a guideline for future development of smart farming applications suitable for various crops.

Keyword: Internet of Things (IoT), Remote Control System, Smart Farming, Blynk Application,

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

อาชีพเกษตรกรรมเป็นอาชีพที่อยู่คู่กับคนไทย และมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตของคนไทยมาช้านาน แม้ยุคสมัยจะเปลี่ยนแปลงไปเพียงใด การเกษตรยังคงอยู่คู่กับคนไทยตลอดมา แต่รูปแบบของการประกอบอาชีพเกษตรกรรมยังคงเป็นแบบดั้งเดิม ในปัจจุบันประเทศไทยได้เข้าสู่ยุคของประเทศไทย 4.0 ที่เป็นยุคของการพัฒนาด้านเทคโนโลยีดิจิทัลในทุกกลุ่มอาชีพ รวมไปถึงอาชีพเกษตรกรรมนี้ด้วย แต่ปัญหาสำคัญของการทำเกษตรกรรมในประเทศไทยมีหลายด้าน โดยเฉพาะในเรื่องผลผลิต และการควบคุมสภาพแวดล้อมในพื้นที่แปลงเกษตรกรรม ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ รวมถึงความแตกต่างทางด้านภูมิประเทศ จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทั้งเรื่องของการใช้ระบบเซ็นเซอร์ในอุปกรณ์เครื่องจักรเครื่องใช้ต่าง ๆ รวมถึงเทคโนโลยีสารสนเทศต่าง ๆ ด้วย เกษตรกรรมในปัจจุบันใช้เทคโนโลยีที่ซับซ้อน เช่น หุ่นยนต์เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น การถ่ายภาพทางอากาศและเทคโนโลยี GPS อุปกรณ์เหล่านี้และการทำเกษตรแม่นยำช่วยให้เกษตรกรสามารถทำอะไรได้มากขึ้นกระบวนการทำการเกษตรมีประสิทธิภาพ ปลอดภัยและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อหาแนวทางแก้ปัญหาที่ดีที่สุด เพื่อให้เทคโนโลยีเกษตรสามารถตอบสนองความต้องการของเกษตรกรรายย่อยปรับปรุงการผลิตอย่างยั่งยืน มีความยืดหยุ่นของระบบการผลิต และลดการปล่อยมลพิษ เพื่อรับมือกับสภาพภูมิอากาศและความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เทคโนโลยีการเกษตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้เปิดมุมมองใหม่ของเกษตรกรนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของผลผลิตในพื้นที่เกษตรกรรม และที่สำคัญคือการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด [1]

เทคโนโลยี IoT คือ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ โทรทัศน์ และอื่นๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดยสามารถเชื่อมโยง และสื่อสารกันได้โดยผ่านระบบอินเทอร์เน็ต [2] ทำให้สามารถควบคุมสิ่งของต่างๆ ได้จากทุกสถานที่ในแบบระยะไกลได้ แต่การส่งเสริมการใช้งานเทคโนโลยี IoT ให้แก่ผู้ที่สนใจนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในด้านการให้ข้อมูลขั้นพื้นฐาน ที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจ อีกทั้งมีความสามารถในการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานเทคโนโลยี IoT ดังกล่าว โดยเฉพาะการนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมระบบการเกษตร หรือเรียกว่า ระบบสมาร์ทฟาร์ม (Smart Farm) ที่มีความซับซ้อนในการควบคุมส่วนต่างๆ เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบชลประทาน ระบบให้อาหารทั้งพืชและสัตว์ ฯลฯ เป็นต้น เพราะขั้นตอนของการออกแบบระบบควบคุมการเกษตรนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ ต้นทุน การบำรุงรักษา รวมไปถึงการเข้าใจด้านการใช้งานของระบบที่ต้องออกแบบแล้วสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำเทคโนโลยี IoT มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อส่งเสริมเรียนรู้ และความเข้าใจพื้นฐานให้ผู้เรียนในยุคประเทศไทย 4.0 นี้ ตั้งแต่ระดับชั้นมัธยมศึกษา จนถึงระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า หรือสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้ โดยที่ผู้เรียนนั้นจะได้ศึกษาควบคู่กับการลงมือฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง ซึ่งจะทำให้ผู้เรียนได้เข้าใจด้านเทคโนโลยีต่าง ๆ และเข้าใจขั้นตอนของการประกอบอาชีพเกษตรกรรมแต่ละประเภทได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต

ของสรรพสิ่งนี้ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการประยุกต์ใช้ความรู้ ความเข้าใจ และทักษะอย่างเป็นลำดับ ในการจำลองระบบเกษตรอัจฉริยะด้วยการเขียนโปรแกรมภาษาซีสำหรับควบคุมชุดสมองกลฝังตัวแบบควบคุมระยะไกลด้วยบอร์ด ESP32 ที่บอร์ดควบคุมสามารถใช้งานร่วมกับแอปพลิเคชัน Blynk บนโทรศัพท์มือถือ หรือ แท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS ได้ อีกทั้งการพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะในงานวิจัยนี้ เป็นการจำลองระบบควบคุมขั้นพื้นฐานภายในระบบเกษตรอัจฉริยะ เช่น เซ็นเซอร์อุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน และแอคชูเอเตอร์ต่างๆ เป็นต้น ดังนั้น เมื่อผู้เรียนได้เรียนรู้เกี่ยวกับพื้นฐานการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีแล้วนั้น ผู้เรียนจะสามารถนำความรู้ ความเข้าใจ และทักษะที่เกิดจากการเรียนรู้ขั้นพื้นฐาน มาเขียนโปรแกรมคำสั่งให้กับระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาไว้ได้ โดยที่ผู้เรียนจะสามารถเข้าใจหลักการของระบบเกษตรอัจฉริยะและนำไปใช้เป็นแนวคิดเพื่อพัฒนาระบบสำหรับการใช้งานในอนาคตได้ อีกทั้งระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้น ยังเป็นชุดส่งเสริมกิจกรรมการเรียนรู้ให้กับผู้เรียน หรือเป็นสื่อช่วยสอนให้กับครู อาจารย์ ที่ขาดเครื่องมือในการจัดการเรียนรู้ให้กับผู้เรียน ซึ่งจะช่วยให้การสร้างบรรยากาศการเรียนรู้ภายในห้องเรียนมีความสนใจ และเป็นชุดสาธิตด้านเกษตรอัจฉริยะที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางให้กับกลุ่มเกษตรกรรุ่นใหม่ที่มีความสนใจด้านเกษตรอัจฉริยะ เพื่อส่งเสริมความรู้ และการประยุกต์ใช้งานเพื่อการประกอบอาชีพเกษตรกรรมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
- 1.2.2 เพื่อทดสอบระบบควบคุมสำหรับเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถทำงานผ่านระบบควบคุมหลักด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล และควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ ซึ่งระบบควบคุมชุดจำลองจะสามารถควบคุมได้ 2 แบบ คือ แบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ตโฟน

1.4 สมมติฐานการวิจัย

ระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้น สามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขที่ทดสอบได้

1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

1.5.1 ระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนฮาร์ดแวร์ที่มีอุปกรณ์ติดตั้งอยู่ในระบบ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น และ 2) ส่วนซอฟต์แวร์ เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบสมองกลฝังตัวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่สามารถประมวลผล และควบคุมในระยะไกลได้ด้วยแพลตฟอร์ม เช่น แอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ตโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS

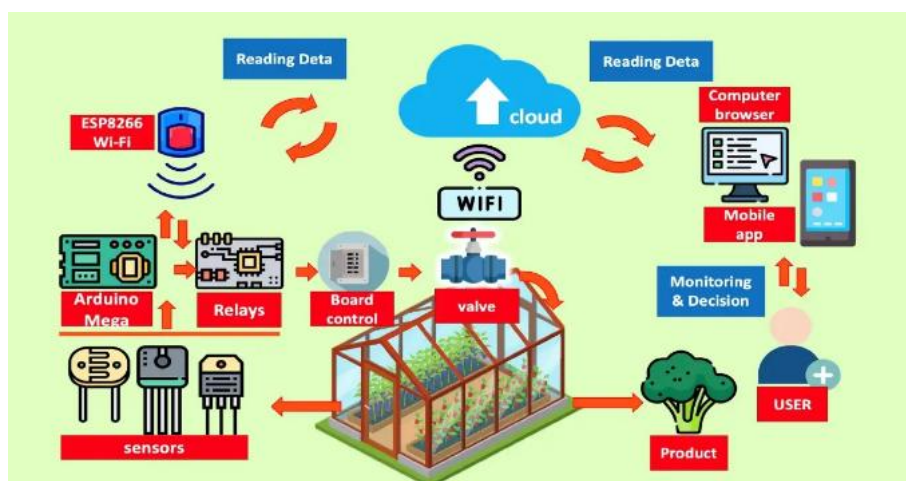
1.5.2 กระบวนการของระบบ ประกอบด้วย การเก็บข้อมูล ซึ่งทำหน้าที่รับข้อมูลสภาพแวดล้อมแบบ Real-time ผ่านเซ็นเซอร์ต่างๆ โดยมีการประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และ Cloud Computing โดยมีการแสดงผลผ่านทางแดชบอร์ดแอปพลิเคชันโทรศัพท์มือถือ และระบบแจ้งเตือน อีกทั้งการควบคุม (Control System) สามารถสั่งการได้ทั้งแบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้งในรูปแบบ Wi-Fi และ Cellular โดยการควบคุมสามารถสั่งการได้ตามการวางระบบ เช่น การให้น้ำ การควบคุมความชื้นในโรงเรือนได้ ซึ่งในส่วนกระบวนการนี้เป็นการเรียนรู้ด้านระบบควบคุม ภายใต้การจำลองสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการเติบโตของพืชตามข้อมูลที่บันทึก เช่น ความต้องการน้ำ สารอาหารต่าง ๆ อุณหภูมิและความชื้น เป็นต้น

1.5.3 ระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถติดตามสภาพแวดล้อมได้แบบ Real-time ควบคุม และจัดการทรัพยากรเกษตรได้ อีกทั้งสามารถสร้างข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ วางแผนการเกษตร และปรับใช้ในฟาร์มจริง

2. ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกษตรอัจฉริยะ (Smart Farm) หรือฟาร์มที่มีความแม่นยำ (Precision Farm) คือการทำฟาร์มโดยนำวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้เป็นเครื่องมือ เพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการจัดการ โดยสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ มีการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่าเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลผลิต ช่วยลดต้นทุนการผลิต มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสิ่งแวดล้อมนำไปสู่การแข่งขันในระดับสากลได้ การทำฟาร์มอัจฉริยะเป็นการทำการเกษตรแบบควบคุมกับนวัตกรรม [3] ซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย ในปัจจุบันเริ่มแพร่หลายไปยังประเทศแถบทวีปยุโรป ญี่ปุ่น มาเลเซีย และอินเดีย เป็นต้น โดยมีการนำเอาเทคโนโลยีสารสนเทศมาปรับใช้กับการทำการเกษตร เพื่อให้มีประสิทธิภาพการผลิตที่สูงขึ้นมีการนำเอาเทคโนโลยีในรูปแบบต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการจัดการมากขึ้น ทำให้สามารถลดแรงงานด้านการเกษตร เนื่องจากปัจจุบันแรงงานในส่วนของการเกษตรก็จะยิ่งลดลงไปเรื่อย ๆ โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีแรงงานภาคการเกษตรที่ลดลง ขณะเดียวกันประเทศดังกล่าวก็ได้ให้ความสนใจภาคการเกษตรมากขึ้น โดยการนำเอาเทคโนโลยีด้านต่าง ๆ มาช่วยในการจัดการ ส่งผลให้เกิดการผลิตสินค้าเกษตรที่มีคุณภาพและปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด [4] เกษตรอัจฉริยะมีการใช้ทรัพยากรอย่างถูกต้องแม่นยำ ตรงต่อความต้องการของพืช ช่วยลดการสูญเสียทรัพยากรและยังช่วยลดต้นทุนการผลิตรวมถึงลดการให้ปุ๋ยและสารกำจัดศัตรูพืชในระดับที่เกินความต้องการของพืชหรือการให้ไม่ตรงกับการเกิด โรคและแมลง ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะยังส่งผลให้เกิดการตกค้างในดินและเกิดอาการดื้อยา ทำให้เกิดการแก้ปัญหาที่ไม่มีประสิทธิภาพนำไปสู่การเกษตรที่ไม่ยั่งยืนและยังส่งผลให้เกิดการทำลายสิ่งแวดล้อมอีกด้วย [5]

สำหรับการทำงานของระบบฟาร์มอัจฉริยะจะมีการกำหนดรูปแบบการทำงานออกเป็นขั้นตอน เพื่อทำหน้าที่ในการจัดการฟาร์ม ทำให้ผู้ใช้งานสามารถดำเนินการและตรวจสอบได้ทุกขั้นตอนของระบบฟาร์มอัจฉริยะ ดังรูปที่ 1 โดยการทำงานของฟาร์มอัจฉริยะแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ 1) การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) คือ การเก็บข้อมูลของดิน น้ำ แสง ภูมิอากาศ ผลผลิต เป็นต้น ด้วยวิธีการและเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น เครือข่ายเซ็นเซอร์ สถานีตรวจวัดอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม เครื่องสแกนสภาพดิน เป็นต้น 2) การวินิจฉัยข้อมูล (Diagnostics) คือ การสร้าง กรอง และเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์เข้าสู่ฐานข้อมูลซึ่งมักจะใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) 3) การวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis) คือ การวิเคราะห์ข้อมูล การทำนายผลผลิตเชิงพื้นที่ รวมไปถึงการวางแผนจัดการ เช่น เทคโนโลยี Crop Modelling ซึ่งจะนำข้อมูลต่าง ๆ มาทำโมเดลเพื่อหาความสัมพันธ์กับผลผลิตที่เก็บเกี่ยวได้ 4) การดำเนินการตามแผนปฏิบัติงาน (Precision Field Operations) คือ การปฏิบัติการตามแผนที่วางไว้ เช่น การหยอดปุ๋ยด้วยรถขับเคลื่อนด้วย GPS การติดตั้งโปรแกรมการให้น้ำ การให้ปุ๋ยหรือยาฆ่าแมลงด้วยแคปซูลนาโน ซึ่งสามารถควบคุมการปลดปล่อยตามเงื่อนไขที่กำหนด เป็นต้น และ 5) การประเมินผล (Evaluation) คือ การประเมินผลการปฏิบัติงานว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด คุ้มค่าแก่การลงทุนหรือไม่ โดยใช้เทคโนโลยีด้านการเงินและเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรมการทำฟาร์มอัจฉริยะ [6]

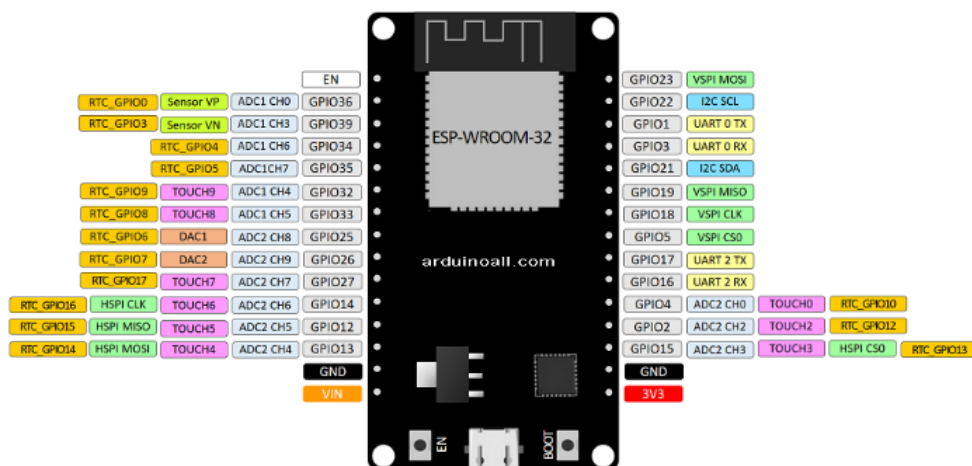


รูปที่ 1 ระบบฟาร์มอัจฉริยะ หรือ สมาร์ทฟาร์ม [10]

2.2 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ IoT หมายถึง เครือข่ายรวมของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อถึงกันและเทคโนโลยีที่อำนวยความสะดวกในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับระบบคลาวด์ ตลอดจนระหว่างอุปกรณ์ด้วยกันเอง จากการเกิดขึ้นของชิปคอมพิวเตอร์ราคาไม่แพงและการสื่อสารโทรคมนาคมที่มีแบนด์วิดท์สูง จึงทำให้ตอนนี้เรามีอุปกรณ์หลายพันล้านเครื่องที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต ซึ่งหมายความว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น แปร่งสีพื้น เครื่องดูดฝุ่น รถยนต์ และเครื่องจักรสามารถใช้เซ็นเซอร์เพื่อรวบรวมข้อมูลและตอบสนองต่อผู้ใช้ได้อย่างชาญฉลาด ระบบ IoT โดยทั่วไปทำงานด้วยการรวบรวมและแลกเปลี่ยนข้อมูลแบบเรียลไทม์ โดยระบบ IoT มีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ 1) ส่วนอุปกรณ์อัจฉริยะ เช่น โทรศัพท์ กล้องรักษาความปลอดภัย หรืออุปกรณ์ออกกำลังกายที่มีความสามารถในการประมวลผล ซึ่งรวบรวมข้อมูลจากสภาพแวดล้อม ข้อมูลที่ได้รับจากผู้ใช้งาน หรือรูปแบบการใช้งาน และสื่อสารข้อมูลดังกล่าวผ่านอินเทอร์เน็ตไปยังและจากแอปพลิเคชัน IoT 2) ส่วนแอปพลิเคชัน IoT คือชุดของบริการและซอฟต์แวร์ที่ผสมรวมข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์ IoT ต่างๆ โดยใช้เทคโนโลยีแมชชีนเลิร์นนิง หรือ ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลนี้และตัดสินใจอย่างชาญฉลาด จากนั้นจะสื่อสารการตัดสินใจเหล่านั้นกลับไปยังอุปกรณ์ IoT และอุปกรณ์ IoT จะตอบสนองต่อข้อมูลที่ได้รับอย่างชาญฉลาด และ 3) ส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิก ที่สามารถจัดการอุปกรณ์ IoT ผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิก เช่น แอปพลิเคชันมือถือหรือเว็บไซต์ที่สามารถใช้เพื่อลงทะเบียนและควบคุมอุปกรณ์อัจฉริยะได้ เป็นต้น [7]

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มาพร้อม Wi-Fi มาตรฐาน 802.11 b/g/n และบลูทูธรุ่น 4.2 ซึ่งเป็นรุ่นต่อ ยอดความสำเร็จของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 โดยในรุ่นนี้ได้ออกมาแก้ไขข้อเสียของไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทั้งหมด โดย CPU ใช้สถาปัตยกรรม Tensilica LX6 จำนวน 2 คอร์ สัญญาณนาฬิกา 240MHz สามารถแยกการทำงานระหว่างโปรแกรมจัดการ Wi-Fi และแอปพลิเคชันออกจากกันได้ ทำให้มีเสถียรภาพเพิ่มขึ้นมาก สามารถใช้งานด้วยการเชื่อมต่อผ่านโปรโตคอล UDP ที่จะสามารถรับ - ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็ว 135Mbps ใช้แรงดันไฟฟ้า 3.3V ในโหมด Sleep ใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 2.5 μ A ด้วยเหตุนี้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้งาน [8] ดังรูปที่ 2

ESP32 DEVKIT V1 – DOIT version with 30 GPIOs



รูปที่ 2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 [11]

2.4 แอปพลิเคชัน Blynk เป็นชื่อโดยรวมของการบริการให้ผู้ใช้งานได้ใช้งานเครื่องแม่ข่าย คือ Blynk Server ที่เป็น IoT Cloud ซึ่งถูกพัฒนามาจากภาษา Java ทำให้สามารถทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการที่หลากหลาย เช่น Windows, Mac หรือ Linux โดยเครื่องแม่ข่าย (Blynk Server) พัฒนาเป็นรูปแบบเปิด (open-source) ภายใต้ลิขสิทธิ์แบบ GNU ทำให้เราสามารถนำ Blynk ไปใช้งานประกอบการสร้างนวัตกรรมเพื่อการค้า แก้ไข ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแจกจ่ายได้ ซึ่งสามารถดูภาพรวมของระบบได้ [9] Blynk App คือ แอปพลิเคชันสำเร็จรูปที่ใช้สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ตในลักษณะการเชื่อมต่อเครื่องแม่ข่าย (Server) ไปยังอุปกรณ์ลูกข่าย (Client) เช่น Arduino, ESP-8266, ESP-32,

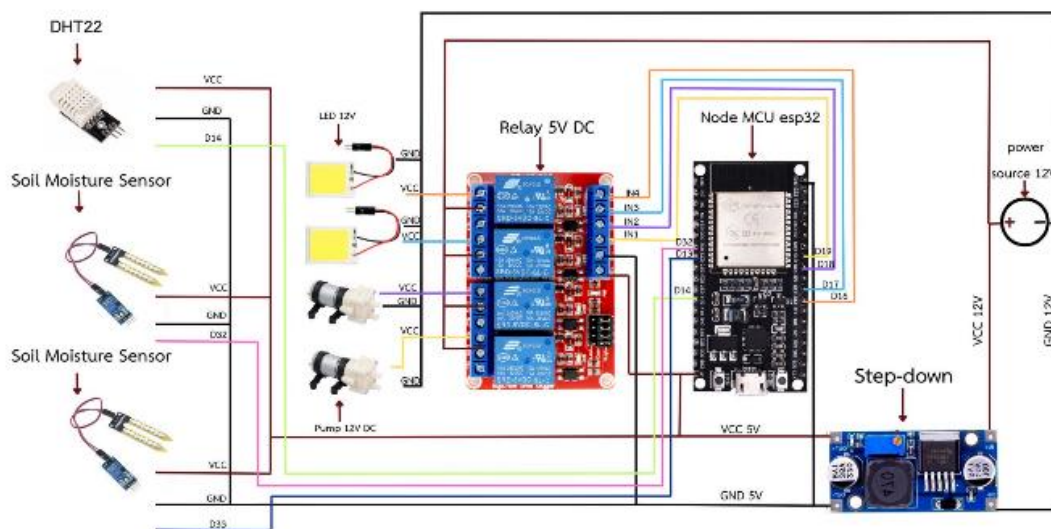
NodeMCU และ Raspberry Pi ซึ่งแอปพลิเคชัน Blynk สามารถใช้งานได้ฟรี และใช้งานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และ iOS โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถเชื่อมต่อ แสดงผล และ/หรือ ควบคุมด้วย Blynk App ได้ โดยเริ่มต้นหลังจากสมัครเข้าใช้งาน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง คณะผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยได้ทำการแบ่งรูปแบบการดำเนินงานไว้ 3 ส่วน คือ 1) ส่วนระบบควบคุม 2) ส่วนระบบซอฟต์แวร์ และ 3) ส่วนชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 ส่วนระบบควบคุม

การออกแบบและพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล และควบคุมการทำงานของส่วนต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ ซึ่งระบบควบคุมชุดจำลองจะสามารถควบคุมได้ 2 แบบ คือ แบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านแอปพลิเคชันสมาร์ทโฟน โดยมีชุดโมดูลควบคุมอุปกรณ์สำหรับการเปิด - ปิด ระบบไฟฟ้าภายในฟาร์ม ระบบรดน้ำต้นไม้ มีชุดเซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศภายในโรงเรือน และวัดความชื้นในดิน ซึ่งระบบควบคุมที่พัฒนาเป็นระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบควบคุมระยะไกลสำหรับฟาร์มเกษตรกรรมฯ

จากรูปที่ 3 ระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ทำหน้าที่ประมวลผลจากการรับ-ส่งข้อมูลจากระยะไกลผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เมื่อเริ่มการทำงานของระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะ โดยการต่อวงจรดังรูปที่ 3 ซึ่งนำสายไฟมาเชื่อมต่อจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาด 12 โวลต์ ให้จ่ายไฟฟ้าไปยังโมดูล Step Down ขนาด 5 โวลต์ เพื่อลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับอุปกรณ์อื่นๆ ในวงจร เช่น เซ็นเซอร์อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น จากนั้นทำการเชื่อมต่อสายไฟจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ไปยังโมดูลรีเลย์ ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่ออุปกรณ์ภายนอก เช่น ปั๊มน้ำ ขนาด 12 โวลต์ จำนวน 2 ตัว และโมดูล LED ขนาด 12 โวลต์ จำนวน 2 ตัว เป็นต้น เพื่อควบคุมการจ่ายน้ำ และควบคุมแสงสว่างในชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ เมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 3 เรียบร้อยแล้ว จึงทำการตรวจสอบความถูกต้องของการต่อวงจร และทำการเขียนโปรแกรมคำสั่งในขั้นตอนต่อไป

3.2 ส่วนระบบซอฟต์แวร์

การพัฒนาส่วนระบบซอฟต์แวร์สำหรับระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งนั้น การเขียนโปรแกรมภาษา C/C++ และการเชื่อมต่อชุดคำสั่งต่าง ๆ จะสามารถทำได้โดยการเขียนโปรแกรมคำสั่งผ่านโปรแกรม Arduino IDE ลงบนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ดังรูปที่ 4

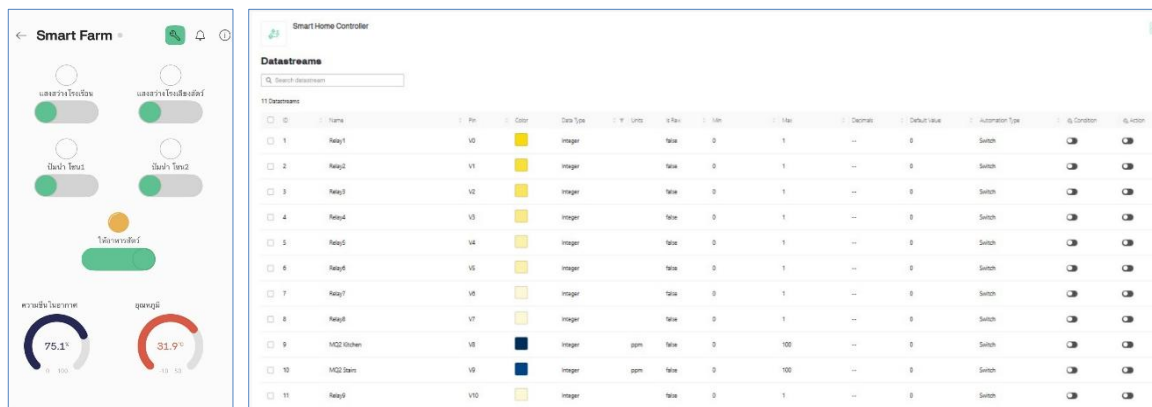
```

1 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6fXxw0LIV"
2 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Smart Farm"
3 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "mv2U87LLAPRmwmSjuyvV9g2BcJue-28"
4
5 #include <WiFi.h>
6 #include <BlynkSimpleEsp32.h>
7 #include <ESP32Servo.h>
8 #include <DHT.h>
9
10 // ===== WiFi =====
11 char ssid[] = "pee";
12 char pass[] = "0987654321";
13
14 // ===== Servo =====
15 int servoPin = 13;
16 Servo myServo;
17
18 // ===== Relay =====
19 #define RELAY_LIGHT1 16
20 #define RELAY_LIGHT2 17
21 #define RELAY_PUMP1 18
22 #define RELAY_PUMP2 19
23
24 // ===== DHT22 =====
25 #define DHTPIN 4
26 #define DHTTYPE DHT22
27 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
28
29 // ===== Soil Moisture Sensor =====
30 // ตัวที่ 1
31 #define SOIL_PIN1 34
32 int soilValue1 = 0;
33
34 int soilPercent1 = 0;
35
36 // ตัวที่ 2
37 #define SOIL_PIN2 35
38 int soilValue2 = 0;
39 int soilPercent2 = 0;
40
41 BlynkTimer timer;
42
43 // ===== ฟังก์ชันอ่านค่าจากเซนเซอร์ =====
44 void sendSensor() {
45   // --- อ่านค่า DHT22 ---
46   float h = dht.readHumidity(); // ความชื้นอากาศ
47   float t = dht.readTemperature(); // อุณหภูมิ
48
49   if (isnan(h) || isnan(t)) {
50     Serial.printf("Temp: %.1f °C Humidity: %.1f %%\n", t, h);
51     Blynk.virtualWrite(V5, t); // อุณหภูมิ
52     Blynk.virtualWrite(V6, h); // ความชื้นอากาศ
53   } else {
54     Serial.println("อ่านค่า DHT22 ไม่สำเร็จ");
55   }
56
57   // --- Soil Sensor 1 ---
58   soilValue1 = analogRead(SOIL_PIN1);
59   soilPercent1 = map(soilValue1, 4095, 0, 0, 100);
60   soilPercent1 = constrain(soilPercent1, 0, 100);
61   Serial.printf("Soil1 Moisture: %d %%\n", soilPercent1);
62   Blynk.virtualWrite(V7, soilPercent1);
63
64   // --- Soil Sensor 2 ---
65   soilValue2 = analogRead(SOIL_PIN2);

```

รูปที่ 4 ชุดโปรแกรมคำสั่งด้วยโปรแกรม Arduino IDE

จากรูปที่ 4 เมื่อทำการต่อวงจร และตรวจสอบความถูกต้องแล้วนั้น คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการเขียนโปรแกรมคำสั่งด้วยภาษา C/C++ ผ่านโปรแกรม Arduino IDE โดยขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุม คือ กำหนดโครงสร้างหลัก ที่ประกอบด้วย 1) การตั้งค่าคงที่ (Template/Token) 2) การเชื่อมต่อเครือข่าย 3) การกำหนดขาริเลย์ 4) ตัวแปรสถานะ 5) ฟังก์ชันรับคำสั่งจาก Blynk (Virtual Pins) 6) ขั้นตอนเริ่มต้น (setup()) และ 7) ลูปทำงานหลัก (loop()) จากนั้น เมื่อดำเนินการเขียนโปรแกรมคำสั่งเรียบร้อยแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโปรแกรมคำสั่งโดยให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่ทำหน้าที่ประมวลผล และควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อออกภายนอก และรับ-ส่งข้อมูลผ่านสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่เชื่อมต่อผ่านสัญญาณแบบ Wi-Fi ได้ ซึ่งเป็นการรับ-ส่งข้อมูลในระยะไกลได้ด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านทางสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS ซึ่งมีลักษณะของหน้าจอแสดงผล ดังรูปที่ 5



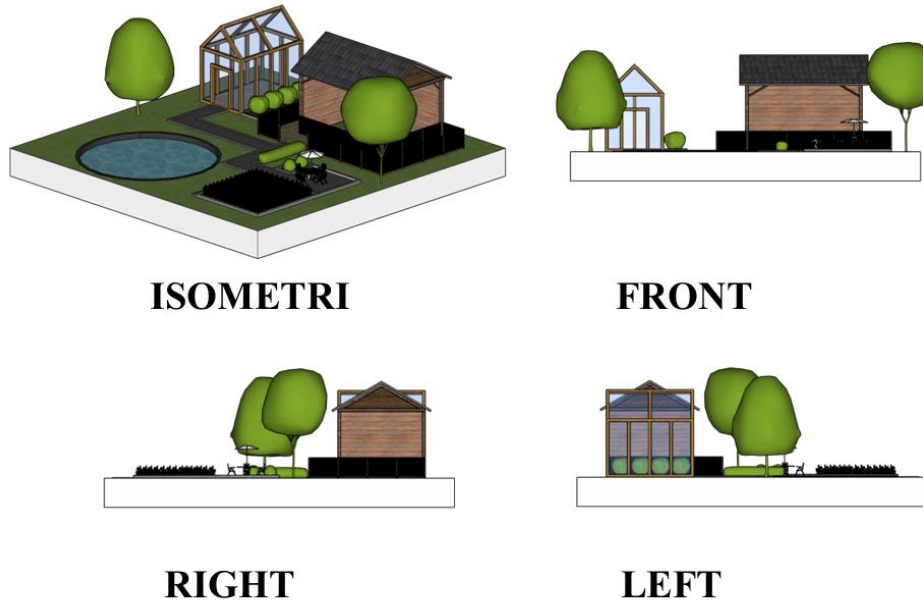
รูปที่ 5 หน้าจอแสดงผลของแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านทางสมาร์ทโฟน และแดชบอร์ด

จากรูปที่ 5 เมื่อดำเนินการเขียนโปรแกรมคำสั่งด้วยภาษา C/C++ ผ่านโปรแกรม Arduino IDE เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนการออกแบบหน้าจอแสดงผลของแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ผ่านทางสมาร์ทโฟน และกำหนดฟังก์ชันการควบคุมระบบผ่านทางแดชบอร์ด เพื่อให้ผู้ใช้งานเห็นถึงสถานะการแจ้งเตือนของระบบ และสามารถควบคุมการเปิด-ปิดระบบต่าง ๆ ภายในชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะได้ ซึ่งคณะผู้วิจัยให้ความสำคัญถึงการออกแบบหน้าจอแสดงผลที่ต้องคำนึงถึงใช้งานที่เข้าใจง่าย และสามารถปรับแก้ไขฟังก์ชันการทำงานไม่ซับซ้อน รวมถึงได้เลือกใช้ภาษาไทยสำหรับกำหนดชื่อฟังก์ชันในแต่ละส่วน เพื่อให้ผู้ใช้งานอื่นๆ เข้าใจ และปรับแก้ไขเพิ่มเติมได้ด้วยตนเอง โดยสามารถศึกษาจากคู่มือการใช้งานอุปกรณ์ของชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะได้ เมื่อออกแบบและกำหนด

ฟังก์ชันการทำงานแล้ว คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบการเชื่อมต่อ และทดสอบควบคุมการทำงานในระยะไกลตามเงื่อนไขต่างๆ โดยผลการทดสอบแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.3 ส่วนชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ

การพัฒนาแบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ โดยใช้โปรแกรม Sketch Up ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบสามมิติของชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ

จากรูปที่ 6 คณะผู้วิจัยดำเนินการออกแบบโครงสร้างให้เป็นแบบสามมิติ ที่มีขนาดความกว้าง 60 เซนติเมตร ความยาว 60 เซนติเมตร จัดวางรูปแบบให้มีโรงเลี้ยงสัตว์ โรงเรือนปลูกผัก สระน้ำ และสวนกลางแจ้ง เพื่อต้องการให้ผู้ใช้งานได้เข้าใจรูปแบบของอาชีพเกษตรกรรมที่ต้องใช้เงื่อนไขในการควบคุมในแปลงเกษตรกรรมที่มีความแตกต่างกัน โดยเมื่อออกแบบเรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการสร้างชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะที่สร้างตามแบบ และติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

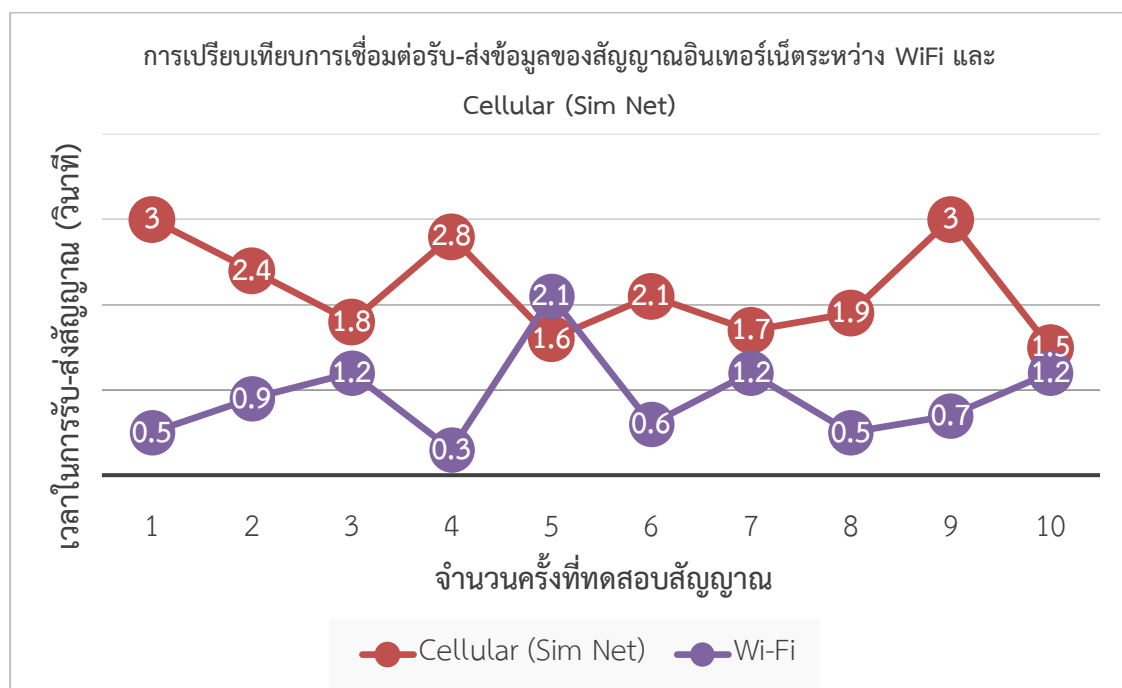
จากรูปที่ 7 เมื่อดำเนินการติดตั้งชุดอุปกรณ์ของระบบควบคุมสำหรับใช้กับชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเรียบร้อยแล้ว โดยในส่วนระบบควบคุมประกอบไปด้วย 1) ชุดโมดูล ESP32 สำหรับควบคุมระบบที่ใช้ในการสั่งการและเชื่อมต่อแอปพลิเคชัน 2) ชุดโมดูลรีเลย์ 4 ช่อง สำหรับเป็นอุปกรณ์ควบคุมการเปิด - ปิดระบบต่าง ๆ เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบรดน้ำ และระบบให้อาหารสัตว์ เป็นต้น และ 3) ชุดเซ็นเซอร์วัดความชื้นในอากาศ และเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน เป็นต้น คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบระบบการทำงานต่าง ๆ ของชุดควบคุมอุปกรณ์ภายในชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะแต่ละส่วน รวมถึงการทดสอบควบคุมในระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือแบบสมาร์ตโฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS เพื่อเป็นทดสอบส่วนต่าง ๆ และการแสดงผลในรูปแบบ Real-time ของค่าที่ได้รับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ รวมถึงทดสอบระบบแจ้งเตือน และการควบคุม ที่สามารถสั่งการได้ทั้งแบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้งในรูปแบบ Wi-Fi และ Cellular เพื่อให้เกิดความเข้าใจขั้นตอนการทำงานของระบบเกษตรอัจฉริยะ สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในแปลงเกษตรกรรมสำหรับประกอบอาชีพในอนาคตได้

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง คณะผู้วิจัยมีวิธีการดำเนินงานวิจัยได้กำหนดการทดสอบระบบต่าง ๆ ไว้จำนวน 3 การทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk

หลังจากที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเรียบร้อยแล้ว นั้น คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk บนอุปกรณ์สมาร์ตโฟน เพื่อสั่งการเปิด - ปิดระบบไฟฟ้าภายในชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะที่ประกอบไปด้วย ระบบแสงสว่าง และปั้มน้ำ โดยการทดสอบจะเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการควบคุมระบบในระยะไกล ซึ่งเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) ซึ่งคณะผู้วิจัยทดสอบการทำงานของระบบควบคุมด้วยสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้ง 2 รูปแบบ จำนวนรูปแบบละ 10 ครั้ง โดยทดสอบทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และทดสอบในพื้นที่โล่งนอกห้องปฏิบัติการ ระยะการควบคุมระหว่างชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะกับอุปกรณ์สมาร์ตโฟน เริ่มต้นที่ระยะ 10 เมตรขึ้นไปตามลำดับจนกระทั่งครบจำนวนการทดสอบที่กำหนดไว้ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังกราฟการทดสอบการทำงาน ดังรูปที่ 8

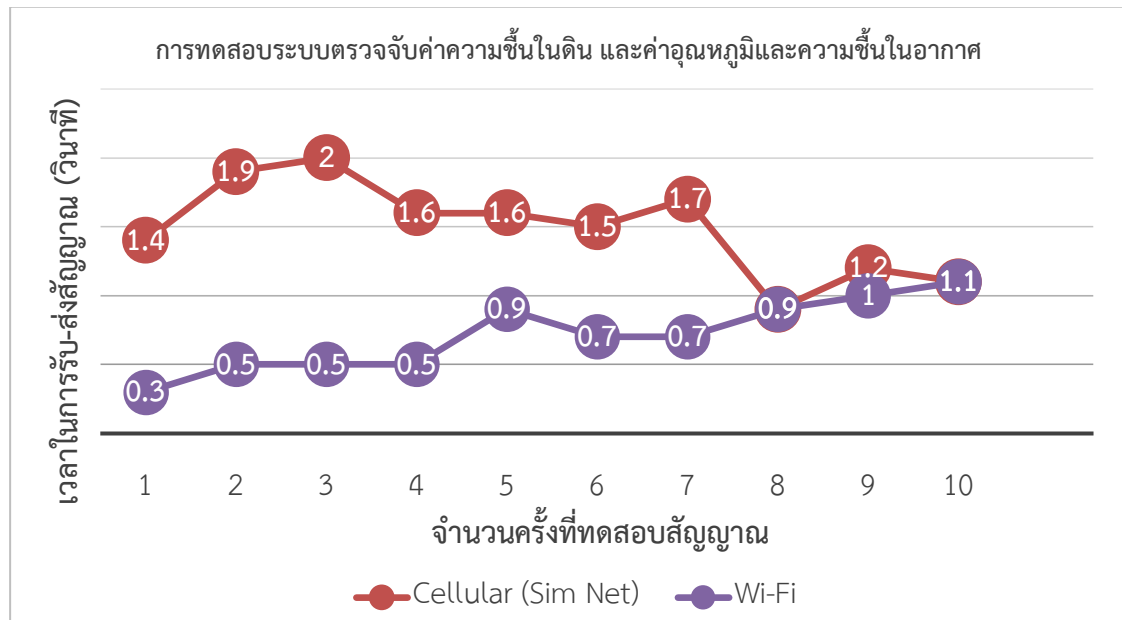


รูปที่ 8 กราฟผลการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลของสัญญาณอินเทอร์เน็ตระหว่าง Wi-Fi และ Cellular (Sim Net)

จากรูปที่ 8 กราฟผลการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลของสัญญาณอินเทอร์เน็ตระหว่าง Wi-Fi และ Cellular (Sim Net) ซึ่งผลการทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ที่ได้ พบว่า ระบบควบคุมการทำงานที่พัฒนาขึ้น สำหรับระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถรับ และส่งข้อมูลคำสั่งระหว่างผู้ใช้งาน และ อุปกรณ์ควบคุมได้อย่างรวดเร็ว โดยผลจากการทดสอบสั่งการทำงาน 10 ครั้ง ที่ทำการทดสอบทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และทดสอบในพื้นที่โล่งนอกห้องปฏิบัติการ มีระยะการควบคุมระหว่างชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะกับอุปกรณ์สมาร์ตโฟน เริ่มต้นที่ระยะ 10 เมตรขึ้นไป ตามลำดับนั้น ระบบสามารถสั่งการทำงานได้ในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 1 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 2 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) สรุปได้ว่า ผลการทดสอบระบบ ควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk สามารถใช้งานสำหรับการควบคุมระบบเกษตรอัจฉริยะได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งานตามรูปแบบของแปลงเกษตรอัจฉริยะเมื่อนำไปใช้ในสถานการณ์จริง หรือเป็นต้นแบบของการพัฒนาระบบควบคุม ระยะไกลสำหรับแปลงเกษตรอัจฉริยะต่อไปได้

4.2 การทดสอบระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ

เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่าง ๆ สำหรับพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง แล้วนั้น คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ โดยเมื่อเซ็นเซอร์แต่ละชนิดทำการแอคทีฟสัญญาณที่ตรวจจับได้แล้ว จะส่งค่ายังแอปพลิเคชัน Blynk บนอุปกรณ์สมาร์ตโฟน เพื่อแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานในรูปแบบ Real Time โดยการทดสอบจะเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้ง 2 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อการตรวจจับค่าต่าง ๆ ที่เซ็นเซอร์วัดค่าได้นั้นในระยะไกล ซึ่งเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) โดยคณะผู้วิจัยทำการทดสอบระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศด้วยสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้ง 2 รูปแบบ จำนวนรูปแบบละ 10 ครั้ง ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังกราฟการทดสอบการทำงาน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟผลการตอบสนองการแจ้งเตือนระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศไปยังผู้ใช้งาน

จากรูปที่ 9 กราฟผลการตอบสนองการแจ้งเตือนระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศไปยังผู้ใช้งาน โดยผลการเปรียบเทียบการเชื่อมต่อรับ-ส่งข้อมูลของสัญญาณอินเทอร์เน็ตระหว่าง Wi-Fi และ Cellular (Sim Net) แล้ว แจ้งเตือนผ่านแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk พบว่า ระบบตรวจจับค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศที่ได้จากเซ็นเซอร์นั้น เมื่อตรวจจับแล้วจะส่งค่าข้อมูลมายังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ให้ทำหน้าที่ส่งการแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานผ่าน

แอปพลิเคชัน Blynk และระบบปั้มน้ำจะทำการรดน้ำให้ความชื้นถึงค่าระดับความชื้นที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิดที่ปลูกตามที่กำหนด เช่น ระหว่าง 60-75 %RH สำหรับพืชที่ปลูกด้วยดิน และระหว่าง 70-85 %RH สำหรับเห็ดที่เพาะในโรงเรือน หรือพืชดินที่ต้องการความชื้นสูง เป็นต้น ซึ่งค่าต่างๆ ที่เซ็นเซอร์จะตรวจจึ้นนั้นขึ้นอยู่กับกรเขียนโปรแกรมคำสั่งให้กับบอร์ดควบคุมหลักของชุดควบคุมระบบ ดังนั้น เมื่อทำการทดสอบการทำงาน 10 ครั้ง ที่ทำการทดสอบทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และทดสอบในพื้นที่โล่งนอกห้องปฏิบัติการ มีระยะการควบคุมระหว่างชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะกับอุปกรณ์สมาร์โฟน เริ่มต้นที่ระยะ 10 เมตรขึ้นไปตามลำดับนั้น ระบบสามารถส่งการทำงานได้ในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 1 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 2 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) สรุปได้ว่า ผลการทดสอบระบบตรวจจึ้นค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ โดยแสดงผลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk สามารถใช้งานสำหรับการควบคุมระบบเกษตรอัจฉริยะได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งานตามรูปแบบของแปลงเกษตรอัจฉริยะเมื่อนำไปใช้ในการสถานการณ์จริง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้สถานการณ์ได้อย่างทันที และสามารถดำเนินการแก้ไข หรือป้องกันเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ หรือเป็นต้นแบบของการพัฒนาระบบควบคุมระยะไกลสำหรับแปลงเกษตรอัจฉริยะต่อไปได้

4.3 การทดสอบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในสถานการณ์จริง

คณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง และทดสอบการทำงานของระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้วนั้น คณะผู้วิจัยต้องการทราบถึงความสามารถในการใช้งาน และความเสถียรภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น จึงได้ทำการทดสอบกับผู้เรียน และผู้ที่สนใจในระบบที่พัฒนาขึ้น โดยการนำไปจัดแสดงนิทรรศการผลงานวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม ณ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ระหว่างวันที่ 13 – 14 สิงหาคม 2568 ซึ่งมีผู้สนใจเข้าทำการทดสอบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง จำนวน 50 คน และนำไปจัดแสดงวันวิทยาศาสตร์ ณ โรงเรียนเซนต์โยเซฟนครสวรรค์ ระหว่างวันที่ 20 – 21 สิงหาคม 2568 ซึ่งมีผู้สนใจเป็นนักเรียนในระดับชั้นตั้งแต่มัธยมศึกษาปีที่ 1 – 6 มากกว่า 100 คน ผลจากการทดสอบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในสถานการณ์จริง พบว่า ระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สามารถใช้งานได้อย่างทันท่วงที แม้มีการทำงานซ้ำ ๆ กัน โดยไม่มีการขัดข้องทางระบบสื่อสาร ระบบควบคุม และการสั่งการในแบบต่างๆ ผ่านแอปพลิเคชัน แม้ว่าจะมีผู้ใช้งานที่แตกต่างกัน โดยคณะผู้วิจัยได้ทำการประเมินและบันทึกผลความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งให้ดีขึ้น และเหมาะสมต่อการใช้งานให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้น ในสถานการณ์จริงของแปลงเกษตรอัจฉริยะ

5. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ที่คณะผู้วิจัยได้ออกแบบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ IoT ที่มีอุปกรณ์ติดตั้งอยู่ในระบบ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น และส่วนซอฟต์แวร์ เลือกใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบสมองกลฝังตัวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ที่สามารถประมวลผล และควบคุมในระยะไกลได้ด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ที่ใช้งานบนโทรศัพท์มือถือแบบสมาร์โฟน หรือแท็บเล็ต ได้ทั้งระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ และระบบปฏิบัติการ iOS สามารถสั่งการได้ทั้งแบบอัตโนมัติ และแบบควบคุมระยะไกลผ่านเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตทั้งในรูปแบบ Wi-Fi และ Cellular โดยการควบคุมสามารถสั่งการได้ตามการวางระบบ ผลจากการทดสอบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ที่กำหนดไว้ 3 การทดสอบ คือ 1) การทดสอบระบบควบคุมระยะไกลด้วยแพลตฟอร์มแอปพลิเคชัน Blynk ซึ่งเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) ผลจากการทดสอบสั่งการทำงาน 10 ครั้ง ที่ทำการทดสอบทั้งภายในห้องปฏิบัติการ และทดสอบในพื้นที่โล่งนอกห้องปฏิบัติการ มีระยะการควบคุมระหว่างชุดจำลองเกษตรอัจฉริยะกับอุปกรณ์สมาร์โฟน เริ่มต้นที่ระยะ 10 เมตรขึ้นไปตามลำดับนั้น ระบบสามารถส่งการทำงานได้ในอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 1 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Wi-Fi และอัตราเฉลี่ย 1 ครั้งต่อ 2 วินาที สำหรับการเลือกใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบ Cellular (Sim Net) เช่นเดียวกับการทดสอบที่ 2) การทดสอบระบบตรวจจึ้นค่าความชื้นในดิน และค่าอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ เมื่อระบบของ

เซ็นเซอร์ต่าง ๆ ตรวจสอบแล้วจะส่งค่าข้อมูลมายังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ให้ทำหน้าที่ส่งการแจ้งเตือนมายังผู้ใช้งานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และระบบปั๊มน้ำจะทำการรดน้ำให้ความชื้นถึงค่าระดับความชื้นที่เหมาะสมกับพืชแต่ละชนิดที่ปลูกตามที่กำหนดสรุปได้ว่า ผลการทดสอบระบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้งานสำหรับการควบคุมระบบเกษตรอัจฉริยะได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความสะดวกของผู้ใช้งานตามรูปแบบของแปลงเกษตรอัจฉริยะเมื่อนำไปใช้ในสถานการณ์จริง ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้สถานการณ์ได้อย่างทันที และสามารถดำเนินการแก้ไข หรือป้องกันเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งช่วยให้เกษตรกรสามารถควบคุมการให้น้ำพืชได้สะดวกขึ้น ลดภาระในการทำกิจกรรมทางการเกษตรให้กับผู้ใช้งาน ควบคุมปัจจัยแวดล้อมที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้น ในงานวิจัยดังกล่าวที่คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาขึ้น นอกจากจะเป็นการจำลองระบบเพื่อการนำไปถ่ายทอดองค์ความรู้ และเป็นแนวทางในการต่อยอดอาชีพเกษตรกรกรรมให้กับผู้สนใจแล้วนั้น แนวคิดที่นำเทคโนโลยี IoT มาประยุกต์ใช้เพื่อการพัฒนาแบบจำลองเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่ส่งเสริมเรียนรู้ และความเข้าใจพื้นฐานให้ผู้เรียนในยุคประเทศไทย 4.0 นี้ ตั้งแต่ระดับชั้นมัธยมศึกษา จนถึงระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า หรือสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องได้ โดยที่ผู้เรียนนั้นจะได้ศึกษาควบคู่กับการลงมือฝึกปฏิบัติด้วยตนเอง ซึ่งจะช่วยให้ผู้เรียนได้เข้าใจด้านเทคโนโลยีต่าง ๆ และเข้าใจขั้นตอนของการประกอบอาชีพเกษตรกรรมแต่ละประเภทได้ และยังสามารถเป็นชุดส่งเสริมกิจกรรมการเรียนรู้ให้กับผู้เรียน หรือเป็นสื่อช่วยสอนให้กับครู อาจารย์ ที่ขาดเครื่องมือในการจัดการเรียนรู้ให้กับผู้เรียน ซึ่งจะช่วยให้การสร้างบรรยากาศการเรียนรู้ภายในห้องเรียนมีความสนใจ และเป็นชุดสาธิตด้านเกษตรอัจฉริยะที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางให้กับกลุ่มเกษตรกรรุ่นใหม่ที่มีความสนใจด้านเกษตรอัจฉริยะได้ในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (1 กันยายน 2568). เทคโนโลยีการเกษตรเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในภาคเกษตรกรรม. สืบค้นจาก : <https://www.arda.or.th/detail/6182>
- [2] อีรศักดิ์ โพธิ์ทอง, ประสิทธิ์ เมฆอรุณ และ สิทธิชัย ขุสำโรง, “การพัฒนาแบบจำลองอัจฉริยะสำหรับเกษตรยุคใหม่ด้วยซอฟต์แวร์สเปคและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งที่,” วารสารเกษตรนเรศวร, ปีที่ 17, ฉบับที่ 2, หน้า 10-17, 2562.
- [3] N. Shashwathi, Priyam Borkotoky, Suhas K. Smart Farming: A Step towards Techno-Savvy Agriculture. International Journal of Computer Applications, Vol. 57, No. 18, pp. 45-48. Nov. 2012.
- [4] ณฐมน หงษา, “การศึกษาปัจจัยเกื้อหนุนต่อระบบนิเวศฟาร์มอัจฉริยะกรณีศึกษาฟาร์มปลูกแตงเทศ,” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานโยบายและการบริหารดิจิทัล, วิทยาลัยนวัตกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2562.
- [5] อีรเกียรติ์ เกิดเจริญ, “ฟาร์มอัจฉริยะ ตอนที่ 1,” วารสารอพเทค, ปีที่ 22, ฉบับที่ 241, หน้า 93-96, 2550.
- [6] อีรพงศ์ มังคะวัฒน์, “การใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในระบบการจัดการฟาร์ม.” Journal of Agricultural Extension and Communication, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 102-109, 2554.
- [7] Amazon Web Services. (23 สิงหาคม 2568). IoT คืออะไร - คำอธิบายเกี่ยวกับ Internet of Things. สืบค้นจาก : <https://aws.amazon.com/th/what-is/iot/>
- [8] ไรบอทสยาม. (23 สิงหาคม 2568). ESP32 #1 รู้จัก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32. สืบค้นจาก : <https://robotsiam.blogspot.com/2017/11/esp32.html>
- [9] สุวิทย์ กิระวิทยา. (23 สิงหาคม 2568). การสร้างแอปพลิเคชันเพื่อควบคุมสิ่งประดิษฐ์ด้วย Blynk ในการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ในการสร้างนวัตกรรม. สืบค้นจาก : <http://suwitkiravittaya.eng.chula.ac.th/B2i2019BookWeb/blynkapp1.html>
- [10] กรุงเทพธุรกิจ. (12 พฤศจิกายน 2568). ระบบเกษตรอัจฉริยะ DSmart Farming หนุนเกษตรยั่งยืนได้อย่างไร. สืบค้นจาก: <https://www.bangkokbiznews.com/tech/innovation/1037484>
- [11] Tech Talk 2 Apply. (12 พฤศจิกายน 2568). ESP32 คืออะไร ดีกว่า ESP8266 อย่างไร. สืบค้นจาก: <https://techtalk2apply.com/what-is-esp32/>

การพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด

Development of a Volume Control System for Viscous Liquid in an Automatic Bottle Filling Process

ปรัชญ์ ใจกว้าง^{1*} กิตติศักดิ์ วาดสันทัด² ชุมพล ปทุมมาเกษร³ ศิริวรรณ พลเศษ⁴

^{1,2,3,4} สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

¹Email: prach@vru.ac.th; ²Email: kittisak.wad@vru.ac.th; ³Email: chumpon@vru.ac.th; ⁴Email: siriwan@vru.ac.th;

*Corresponding Author

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด โดยเน้นแก้ไขปัญหาความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาตรในการบรรจุของเหลวหนืด ปัญหาหลักเกิดจากความหนืดของน้ำยาล้างจานที่ไม่คงที่ ที่มีความหนืดในช่วง 1,300 ถึง 1,700 มิลลิปาสกาล-วินาที เนื่องจากมีการแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิแวดล้อม ส่งผลให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงและทำให้ปริมาตรที่บรรจุด้วยระบบตั้งเวลาแบบดั้งเดิมขาดความแม่นยำ งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้หลักการระบบพลศาสตร์ของไหลและระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยใช้เซนเซอร์วัดอัตราการไหลแบบฮอลล์เอฟเฟกต์ เพื่อตรวจจับอัตราการไหลของของเหลวแบบเรียลไทม์ นำค่าสัญญาณพัลส์ที่ได้จากเซนเซอร์มาประมวลผลเพื่อคำนวณเป็นปริมาตรสะสมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นวิธีการวัดผลโดยตรงที่แม่นยำกว่าการคาดการณ์จากเวลาการทำงานของปั๊ม งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมอัตโนมัติระบบปิดแบบพีไอ เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรอย่างมีประสิทธิภาพและปรับความเร็วของปั๊มโดยอัตโนมัติ ทำให้ระบบสามารถรักษาระดับปริมาตรสุทธิได้แม้ว่าความหนืดของของเหลวจะเปลี่ยนแปลงไป จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ในการบรรจุน้ำยาล้างจานลงในบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาด 100 มิลลิลิตร จำนวน 10 ขวด พบว่าการควบคุมอัตโนมัติระบบปิดแบบพีไอสามารถชดเชยผลกระทบจากความหนืดที่แปรผันได้ โดยสามารถบรรจุน้ำยาล้างจานได้ใกล้เคียงปริมาตรเป้าหมายที่ 100 มิลลิลิตร โดยมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตจากการสูญเสียผลิตภัณฑ์และเพิ่มประสิทธิภาพในสายการผลิตสำหรับของเหลวหนืด

คำสำคัญ : อัตราการไหลของของเหลว, ปริมาตรของเหลว, ความหนืดของของเหลว

Abstract

This research aims to design and develop a volume control system for viscous liquids in an automatic bottle filling process, specifically addressing the issue of volumetric inaccuracy. The primary problem stems from the inconsistent viscosity of dish soap, ranging from 1,300 to 1,700 mPa-s, which varies directly with ambient temperature. This fluctuation alters the flow rate, rendering traditional timer-based systems inaccurate. Consequently, this study applies fluid dynamics and automatic control principles, utilizing a Hall effect flow sensor for real-time flow rate detection. Pulse signals from the sensor are processed to continuously calculate cumulative volume, offering a direct measurement method that is more precise than estimating based on pump operation time. A Proportional-Integral (PI) closed-loop control system is implemented to effectively compensate for volumetric errors and automatically adjust pump speed. This enables the system to maintain net volume levels despite changes in liquid viscosity. Performance testing, involving the filling of 10 bottles with 100 mL of dish soap, demonstrated that the PI closed-loop control successfully compensated for variable viscosity effects. The system achieved a filling volume close to the 100 mL target with an average error of 0.5%, thereby reducing production costs from product loss and enhancing production line efficiency for viscous liquids.

Keyword: Fluid flow rate, Fluid volume, Fluid viscosity

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ยุคอุตสาหกรรมการผลิตสมัยใหม่ที่ขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม การดำเนินงานมักให้ความสำคัญและมุ่งเน้นด้านประสิทธิภาพ, ความแม่นยำและการลดต้นทุนอย่างสูงสุด ในกระบวนการบรรจุสินค้าถือเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่เป็นหัวใจสำคัญของสายการผลิต โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมสินค้าอุปโภคบริโภคซึ่งครอบคลุมผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม, เวชภัณฑ์, เครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในครัวเรือน ปริมาตรสุทธิของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุลงในภาชนะไม่เพียงแต่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความพึงพอใจและความเชื่อมั่นของผู้บริโภคต่อตราสินค้าเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องโดยตรงกับต้นทุนวัตถุดิบของฝ่ายผลิต และที่สำคัญคือการปฏิบัติตามข้อกำหนดทางกฎหมายว่าด้วยมาตรฐานสินค้าและการคุ้มครองผู้บริโภค ดังนั้น การพัฒนาระบบบรรจุของเหลวที่มีความแม่นยำสูงและมีเสถียรภาพในการทำงานซ้ำ จึงเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อการรักษาความสามารถในการแข่งขันของภาคอุตสาหกรรม

กระบวนการบรรจุของเหลวที่มีความหนืดสูงหรือของเหลวหนืด เช่น นํ้ายาล้างจาน, ขอสบปรู้งรส, นํ้าผึ้ง, หรือเจลแอลกอฮอล์ยังคงเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมที่สำคัญและซับซ้อน ปัญหาหลักเกิดจากคุณสมบัติทางกายภาพของของเหลวประเภทนี้ คือ ความหนืด ซึ่งมีความอ่อนไหวและแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในการผลิต ในสภาวะการทำงานจริงอุณหภูมิภายในโรงงานอุตสาหกรรมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดทั้งวันตามสภาพอากาศและช่วงเวลา ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์ไม่คงที่ เมื่อความหนืดเปลี่ยนแปลงไปย่อมส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของของเหลวผ่านระบบท่อและหัวบรรจุที่จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยแม้จะใช้แรงดันไฟฟ้าหรือกำลังของมอเตอร์ปั๊มที่มีค่าคงที่ก็ตาม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียวัตถุดิบในขั้นตอนการบรรจุและส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการผลิตสูงเกินกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรมที่ยอมรับได้ ซึ่งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์หากเกิดความคลาดเคลื่อนในการบรรจุเพียง 1-2% ก็จะเป็นความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อผลิตเป็จำนวนมาก อาจหมายถึงต้นทุนวัตถุดิบที่สูญเสียไปคิดเป็นมูลค่ามหาศาลต่อปี [1,2]

ระบบบรรจุของเหลวอัตโนมัติแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง มักอาศัยการควบคุมโดยใช้เวลาเป็นหลัก ซึ่งระบบจะตั้งค่าเวลาการทำงานของมอเตอร์ปั๊มให้คงที่สำหรับแต่ละรอบการบรรจุ โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าในระยะเวลาที่เท่ากัน ปริมาตรของเหลวที่ไหลออกมาควรจะเป็นเท่ากันทุกครั้ง วิธีการนี้อาจให้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจและยอมรับได้สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำและคงที่ เช่น นํ้าเปล่า แต่สำหรับของเหลวหนืดอย่างนํ้ายาล้างจาน ซึ่งมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1,300 ถึง 1,700 มิลลิปาสคาล-วินาที ระบบควบคุมโดยใช้เวลาจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาตร อย่างมีนัยสำคัญ ตัวอย่างเช่น ในวันที่สภาพอากาศร้อนความหนืดของนํ้ายาล้างจานจะลดลง ระยะเวลาการทำงานของมอเตอร์ปั๊มคงที่เท่ากันมีของเหลวไหลออกมาได้ในปริมาตรที่มากกว่าปกติส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ล้นภาชนะและเกิดการสูญเสียวัตถุดิบโดยตรง ในทางกลับกันหากสภาพอากาศเย็นลงความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ปริมาตรที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งไม่เพียงนำไปสู่การร้องเรียนจากผู้บริโภคยังอาจเข้าข่ายผิดกฎหมายคุ้มครองผู้บริโภคอีกด้วย

จากปัญหาดังกล่าว จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการพึ่งพาระบบควบคุมอัตโนมัติแบบเปิดที่สั่งการทำงานเพียงอย่างเดียวโดยไม่มี การตรวจสอบผลลัพธ์ หรือไม่สามารถรับรู้และปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของเหลวซึ่งเป็นตัวแปรบวกรววนที่สำคัญของระบบได้นั้น ไม่เพียงพอต่อการรับประกันคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ในระยะยาวอีกต่อไป ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนกระบวนการจากการควบคุมเชิงรับ (Reactive Control) ซึ่งหมายถึงการปล่อยให้เกิดความผิดพลาดขึ้นก่อนแล้วจึงตามแก้ไขในภายหลัง มาเป็นการควบคุมเชิงรุก (Proactive Control) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้นตั้งแต่ขั้นตอนแรก [3] โดยการพัฒนาระบบพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่สามารถตรวจจับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและทำการชดเชยแก้ไขได้แบบเรียลไทม์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเสนอแนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบดังกล่าว โดยเปลี่ยนจากการวัดตัวแปรโดยอ้อมมาสู่การวัดตัวแปรโดยตรง (ปริมาตร) โดยใช้เซนเซอร์วัดอัตราการไหลเพื่อติดตามปริมาตรที่บรรจุจริง และนำข้อมูลป้อนกลับเข้าสู่ระบบควบคุมอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานของตัวเองได้อย่างต่อเนื่อง และเกิดความแม่นยำสูงสุดตามค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ ซึ่งไม่เพียงแต่จะช่วยแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความหนืด แต่ยังเป็นการยกระดับกระบวนการผลิตให้มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตอบสนองต่อมาตรฐานอุตสาหกรรมที่เข้มงวดในปัจจุบันได้อย่างสมบูรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่สามารถวัดอัตราการไหลและคำนวณปริมาตรของเหลวที่บรรจุได้แบบเรียลไทม์

1.2.2 เพื่อประยุกต์ใช้ระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอในการควบคุมการทำงานของระบบ

1.2.3 เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น ในการบรรจุของเหลวหนืดลงในบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด และวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาดต้นแบบโดยใช้อุปกรณ์ต้นทุนต่ำ

1.3.2 ระบบถูกออกแบบมาสำหรับบรรจุของเหลวลงในบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาด 100 มิลลิลิตร

1.3.3 น้ำยาล้างจานที่ใช้ในการทดลองมีความหนืดอยู่ที่ประมาณ 1,300 ถึง 1,700 มิลลิปาสคาล-วินาที (mPa·s) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืด งานวิจัยนี้ได้กำหนดเป้าหมายและขอบเขตการออกแบบ (Design Requirements) เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนจากความหนืดที่ไม่คงที่ โดยกำหนดเกณฑ์สมรรถนะของระบบดังนี้:

1. ความแม่นยำ ระบบต้องมีความคลาดเคลื่อนของปริมาตรไม่เกิน $\pm 1\%$ สำหรับบรรจุภัณฑ์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. รองรับความหนืด ระบบต้องสามารถทำงานได้ในช่วงความหนืดของน้ำยาล้างจานที่ 1,300 – 1,700 มิลลิปาสคาล-วินาทีซึ่งครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำยาล้างจาน [13]
3. ความสามารถในการควบคุม ระบบสามารถปรับชุดเซตอัตราการไหลในการบรรจุของเหลวได้อัตโนมัติ ผ่านการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อรักษาปริมาตรสุทธิให้คงที่

จากข้อกำหนดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบโครงสร้างและเลือกใช้อุปกรณ์โดยประยุกต์ใช้องค์ความรู้จากการทบทวนวรรณกรรมดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

2.1.1 ชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด

ชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด จากการศึกษาแบบจำลองเครื่องบรรจุขวดอัตโนมัติในบทความ “Automatic Bottle Filling Machine” ของ Kalidasan และคณะ[4] ผู้วิจัยได้นำแนวคิดการใช้อัตราทดเฟืองมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชุดขับเคลื่อนสายพาน เพื่อให้ได้แรงบิดที่เพียงพอสำหรับการลำเลียงขวดที่มีน้ำหนักรวมของเหลวหนืดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วย สายพานลำเลียง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12V ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาทีในการขับเคลื่อน ผ่านเฟืองสายพานอัตราทด 1:0.8 ออกแบบให้เหมาะสมกับสายการผลิตขนาดเล็ก และสามารถใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาดเล็ก [4] ออกแบบอยู่บนชุดสายพานลำเลียงที่มีความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 700 มิลลิเมตร มีความสูง 115 มิลลิเมตร สามารถใช้ได้ทั้งของเหลวในอุตสาหกรรมอาหาร และของเหลวหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร

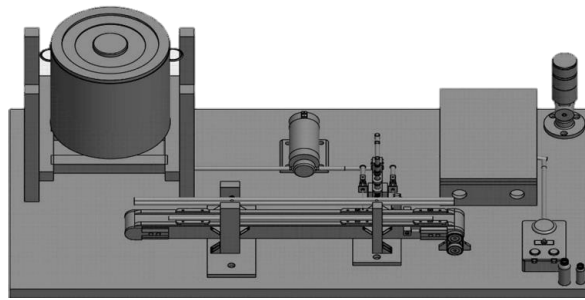
2.1.2 ชุดลำเลียงน้ำยาล้างจาน

ชุดลำเลียงน้ำยาล้างจาน ออกแบบให้เก็บน้ำยาล้างจานด้วยถังสแตนเลสสำหรับเก็บน้ำยาล้างจานขนาด 10,000 มิลลิลิตร ก่อนลำเลียงผ่านท่อลำเลียงไปยังชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน เชื่อมต่อมอเตอร์ปั๊มแบบเฟืองในขนาด 12V มีอัตราการขับของเหลว 1 - 4 ลิตรต่อนาที เพื่อเพิ่มแรงขับเคลื่อนน้ำยาล้างจานไหลตามท่อลำเลียงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 9 มิลลิเมตร ไปยังชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน

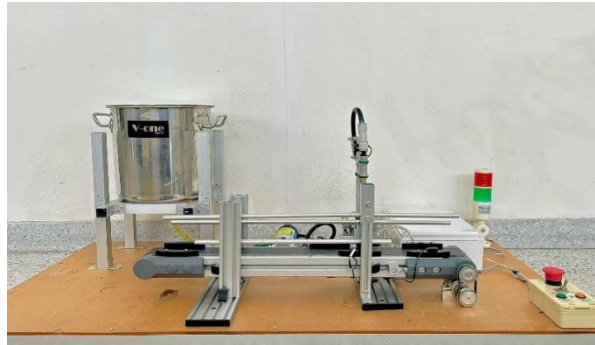
2.1.3 ชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด

ชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด ออกแบบให้ลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาด 100 มิลลิลิตร ไปยังชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน เพื่อบรรจุน้ำยาล้างจานลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด เมื่อได้ปริมาตรที่กำหนดแล้วให้เคลื่อนที่ไปยังปลายสายพานเพื่อปิดฝาบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่บรรจุน้ำยาล้างจานแล้ว สายพานลำเลียงมีความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 700 มิลลิเมตร ความสูง 115 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 600 มิลลิเมตรต่อนาที อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด อยู่บริเวณด้านข้างของชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด ใช้โฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์จำนวน 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งก่อนหัวจ่ายน้ำยาล้างจานและตำแหน่งปลายสายพานลำเลียง

การออกแบบระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด แสดงดังรูปที่ 1 และระบบควบคุมปริมาตรของเหลวหนืดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 2



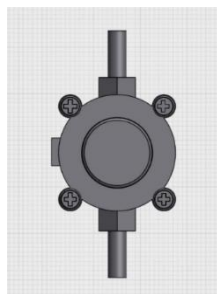
รูปที่ 1 การออกแบบระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด



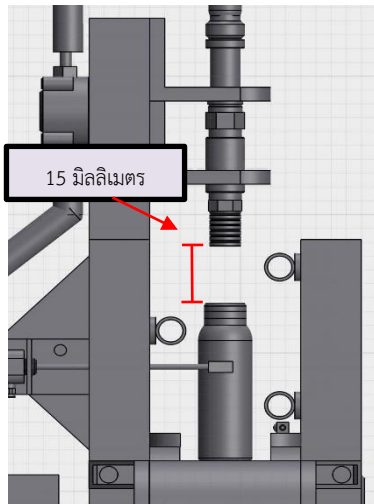
รูปที่ 2 ระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่สร้างขึ้น

2.1.4 ชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน ประกอบด้วย

ชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน ออกแบบให้รับน้ำยาล้างจานที่ถึงขั้นดันจากมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองใน ผ่านการตรวจวัดอัตราการไหลของของเหลวชนิด เลือกใช้เซนเซอร์แบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall-Effect Sensor) รุ่น YF-S401 จากการศึกษาบทความ “Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques” ของ Crescentini และคณะ [5] ที่ระบุว่าเซนเซอร์ชนิดนี้มีความเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดแบบไม่สัมผัส ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อน อย่างไรก็ตาม เพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของสนามแม่เหล็กที่อาจเกิดจากปัญหาการเกิดช่องว่างที่เกิดจากอากาศหรือฟองของของเหลวที่ใช้ในการบรรจุขึ้นตามการศึกษาบทความ “Study on the Effectiveness of Dual Complementary Hall-Effect Sensors in Water Flow Measurement for Reducing Magnetic Disturbance” ของ Garmabdari และคณะ [6] ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบจุดติดตั้งเซนเซอร์ให้ห่างจากมอเตอร์บีบและใช้วงจรแยกสัญญาณในการป้องกันสัญญาณรบกวน โดยใช้เทคนิคการวัดความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่างท่อลำเลียงน้ำยาล้างจานขาเข้ากับท่อลำเลียงน้ำยาล้างจานขาออกสู่ชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจานตามข้อเสนอแนะของบทความ “Dependence of Hall Effect flow sensor frequency on the attached inlet and outlet pipe size” ของ Lalnunthari และ Thanga [7] การออกแบบชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน แสดงดังรูปที่ 3 และผ่านหัวจ่ายน้ำยาล้างจานลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด โดยหัวจ่ายน้ำยาล้างจานเลือกใช้หัวจ่ายที่ทำจากวัสดุทองเหลืองออกแบบให้เว้นระยะห่างจากปากบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาด 1,000 มิลลิเมตร ประมาณ 15 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 4



รูปที่ 3 การออกแบบชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน



รูปที่ 4 การออกแบบหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน

2.2 การออกแบบวงจรไฟฟ้า

การออกแบบวงจรไฟฟ้า ออกแบบและทำวงจรสำหรับการประมวลผลค่าเซนเซอร์ต่างๆ รวมถึงการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบ ซึ่งประกอบด้วย

2.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ซิง แรงดันขาออก 12 โวลต์ จ่ายกระแสสูงสุด 10 แอมแปร์ เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้วงจรไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ได้แก่ วงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประมวลผล และผ่านวงจรขยายแรงดันเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลต์สำหรับวงจรขับโซลินอยด์วาล์ว

2.2.2 วงจรประมวลผล

ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 สำหรับรับค่าเซนเซอร์เพื่อใช้ในการประมวลผล และนำค่าต่างๆ มาคำนวณเพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์เกียร์ปั๊มแบบเฟืองใน

2.2.3 วงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

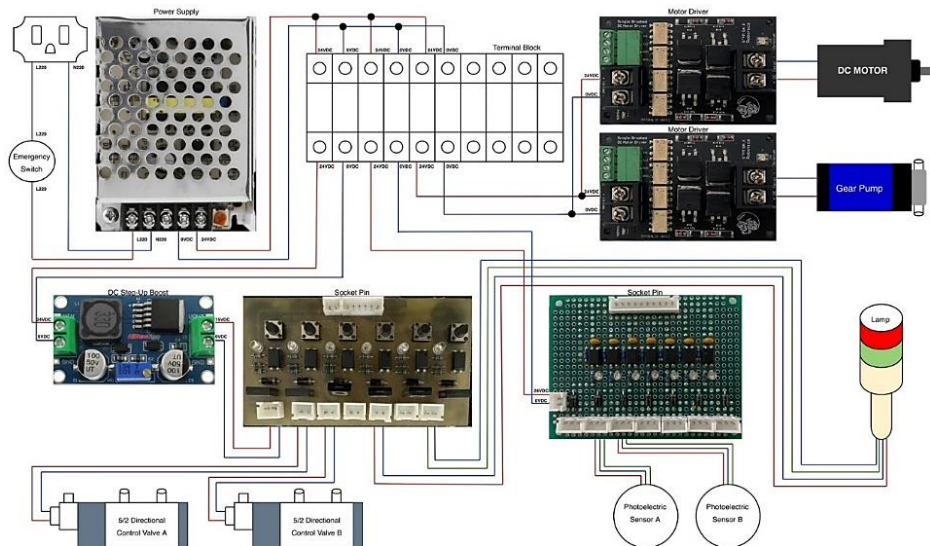
ใช้วงจรขับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเอชบริดจ์ ที่สามารถควบคุมทิศทางและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งถูกป้อนสัญญาณมาจากวงจรประมวลผล สำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในชุดลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด และสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในชุดหัวจ่ายน้ำยาล้างจาน

2.2.4 วงจรขับโซลินอยด์วาล์ว

ใช้วงจรขับโซลินอยด์ที่จัดสร้างขึ้น ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์วสำหรับนิวเมติกส์ ให้ทำงานตามสถานะที่วงจรประมวลผลสั่งการทำงาน โดยสามารถแยกสัญญาณอินพุตกับสัญญาณเอาต์พุตออกจากกัน เพื่อป้องกันกระแสย้อนกลับซึ่งภายในวงจรขับโซลินอยด์วาล์วเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์เปิด ปิดการทำงาน

2.2.5 วงจรแยกสัญญาณเซนเซอร์

ใช้วงจรแยกสัญญาณเซนเซอร์ที่สร้างขึ้น เพื่อรับค่าสัญญาณไฟฟ้าจากโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ ถูกแยกสัญญาณไฟฟ้าด้วยออปโตคัปเปิลอร์ ทำหน้าที่แยกสัญญาณวงจรไฟฟ้า เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนและป้องกันอันตรายจากสัญญาณไฟฟ้ากระชากจากสัญญาณไฟฟ้าที่รับค่าจากเซนเซอร์ การต่อวงจรไฟฟ้าภายในระบบแสดงดังรูปที่ 5

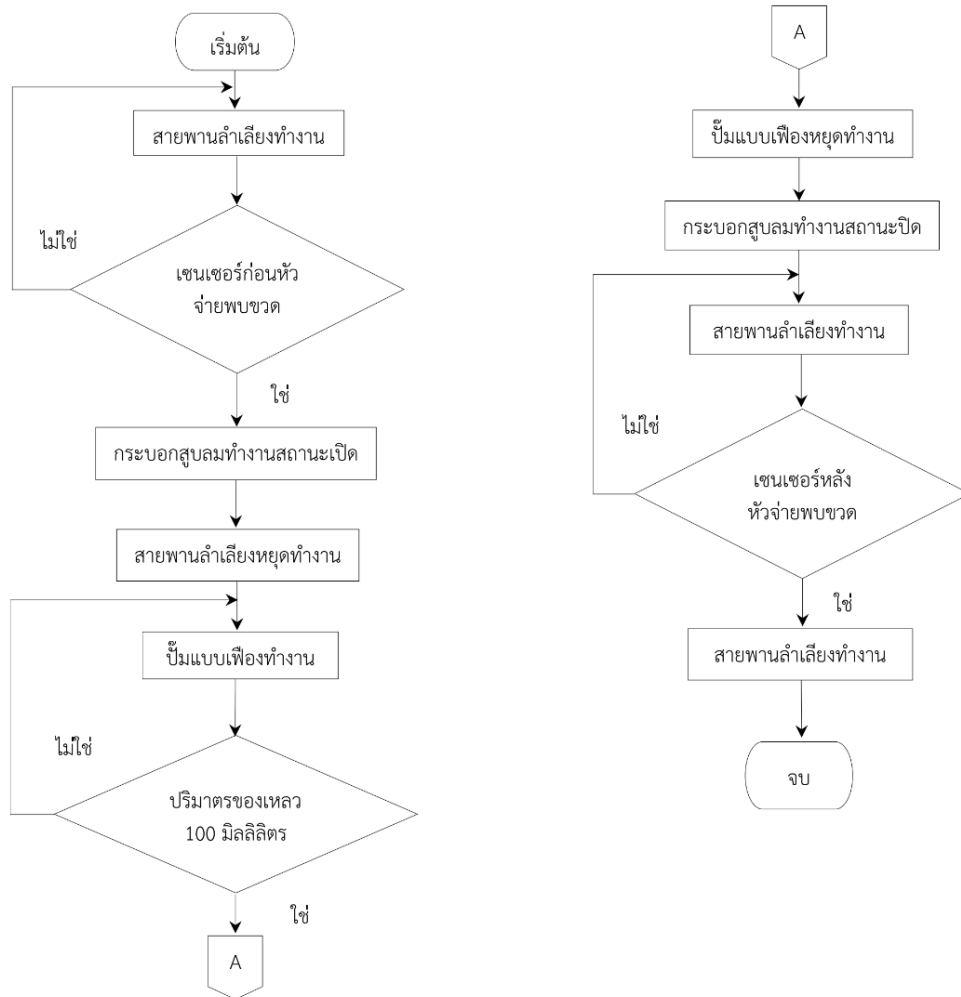


รูปที่ 5 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าภายในระบบ

2.3 การเขียนโปรแกรมควบคุม

2.3.1 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ

โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ เริ่มต้นจากสายพานลำเลียงเริ่มการเคลื่อนที่นำบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด สายพานลำเลียงจะเคลื่อนที่จนกว่าเซนเซอร์ตำแหน่งก่อนหัวจ่ายน้ำยาล้างจานพบบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด หากเซนเซอร์ตำแหน่งก่อนหัวจ่ายน้ำยาล้างจานตรวจพบกระบอกสุบลมจะเปลี่ยนสถานะเป็นเปิดเพื่อทำการล๊อคตำแหน่งของบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด และสายพานลำเลียงจะหยุดการทำงานซึ่งบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดจะอยู่บริเวณ เมื่อขวดอยู่ในตำแหน่งได้หัวจ่ายน้ำยาล้างจาน มอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนจะเริ่มทำงานขับเคลื่อนน้ำยาล้างจาน ตรวจสอบปริมาตรน้ำยาล้างจานด้วยเซนเซอร์วัดอัตราการไหล ในขั้นตอนการตรวจสอบปริมาตรของน้ำยาล้างจานที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดขนาด 100 มิลลิลิตร เริ่มต้นจากการอ่านค่าเซนเซอร์วัดอัตราการไหลแบบฮอลล์เอฟเฟกต์ รุ่น YF-S401 เซนเซอร์จะส่งสัญญาณพัลส์ออกมาอย่างไม่โครคอนโทรลเลอร์ และนำอัตราการไหลที่ได้มาคำนวณหาปริมาตรของเหลวโดยใช้สมการของฮาเกน-ปัวซอยล์ และควบคุมการทำงานของมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไน ควบคุมความเร็วรอบให้เหมาะสมกับปริมาตรที่กำหนด ใช้การควบคุมอัตโนมัติระบบปิดแบบพีโอ เพื่อสร้างเสถียรภาพของระบบ และได้ปริมาตรของน้ำยาล้างจานบรรจุลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่แม่นยำ การควบคุมการทำงานของมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไน เริ่มต้นจากเทอมสัดส่วน ในการสั่งให้มอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนทำงาน และหาความคลาดเคลื่อน (Error) ของระบบ ซึ่งได้แก่ปริมาตรของน้ำยาล้างจานที่บรรจุลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด หากปริมาตรของน้ำยาล้างจานห่างจากปริมาตรที่กำหนด ระบบจะเกิดข้อผิดพลาด และจะทำการปรับให้มอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนขับเคลื่อนในการผลักดันน้ำยาล้างจานเข้าบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด หากปริมาตรเข้าใกล้ปริมาตรที่กำหนด ระบบจะควบคุมมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนให้ทำงานช้าลงเรื่อยๆ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนจะเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของความผิดพลาด เทอมปริพันธ์ เทอมนี้จะตรวจสอบความผิดพลาดค้าง (Steady-State Error) เกิดขึ้นหรือไม่ในทุกช่วงเวลา และจะสะสมค่าความคลาดเคลื่อนที่ผ่านกระบวนการในเทอมสัดส่วนสู่การสั่งการทำงานของมอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองไนจนถึงปริมาตรที่ต้องการ เมื่อถึงปริมาตรที่กำหนดปั๊มเกียร์เฟืองไนจะหยุดทำงาน สายพานจะลำเลียงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดที่บรรจุแล้วไปยังปลายสายพาน เมื่อเซนเซอร์ตรวจพบบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดสายพานลำเลียงจะหยุดทำงาน บล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมโปรแกรมควบคุมระบบ

2.4 การคำนวณปริมาตรของเหลวจากอัตราการไหล

การบรรจุของเหลวลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด เป็นประเด็นสำคัญของระบบระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดนี้ในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดนี้ ซึ่งระบบใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบเปิด ปัญหาที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการพื้นฐานทางพลศาสตร์ของไหลที่ควบคุมการไหลของของเหลวในท่อ สมการของฮาเกน-ปัวซอยล์ [8-10] อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric Flow Rate), ความดันลดคร่อมท่อ (Pressure Drop), คุณสมบัติของของเหลว (ความหนืด) และคุณลักษณะทางกายภาพของท่อ (รัศมีและความยาว) สมการฮาเกน-ปัวซอยล์ใช้ได้กับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ของของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) ที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible) ผ่านท่อทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ มีรูปแบบดังสมการที่ (1)

$$Q = \frac{\pi \Delta P r^4}{8 \eta L} \quad (1)$$

Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

π คือ อัตราส่วนของความยาวของเส้นรอบวงต่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลม

r	คือ รัศมีของท่อ (m)
ΔP	คือ ความแตกต่างของแรงดันระหว่างปลายท่อ (Pa)
η	คือ ความหนืดของของไหล (Pa.s)
L	คือ ความยาวของท่อ (m)

จากสมการที่ 1 จะเห็นความสัมพันธ์ที่สำคัญว่า อัตราการไหล (Q) แปรผกผันกับความหนืด (η) ของของเหลว ดังสมการที่ (2)

$$Q \propto \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ได้ติดตั้งเซนเซอร์วัดอัตราการไหลแบบฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall-Effect Flow Sensor) เพื่อทำการวัดค่าสัญญาณพัลส์ แทนค่าดังกล่าวในตัวแปร Q แบบเรียลไทม์ [11] เซนเซอร์ชนิดนี้ทำงานโดยอาศัยหลักการแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วย กังหันขนาดเล็กที่มีแม่เหล็กติดอยู่ และมีเซนเซอร์ฮอลล์เอฟเฟกต์ติดตั้งอยู่ด้านนอกของตัวเรือน [12] เมื่อของเหลวไหลผ่านตัวเซนเซอร์จะไปขับเคลื่อนให้กังหันหมุนด้วยความเร็วรอบที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการไหลของของเหลว ทุกครั้งที่แม่เหล็กบนกังหันหมุนผ่านตัวเซนเซอร์ฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นมาหนึ่งชุด ดังนั้น ความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่วัดได้จึงมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยตรงกับอัตราการไหลของของเหลว ดังสมการที่ (3)

$$F = K \cdot Q \quad (3)$$

F	คือ ความถี่ของสัญญาณพัลส์ มีหน่วยเฮิรตซ์
K	คือ แฟกเตอร์ K (K-factor) ของเซนเซอร์ ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะตัวที่ระบุว่าจะต้องมีพัลส์จำนวนเท่าใดจึงจะเทียบเท่ากับปริมาตร 1 ลิตร มีหน่วย พัลส์ต่อลิตร
Q	คือ อัตราการไหลของของเหลว มีหน่วย ลิตรต่อนาที

ไมโครคอนโทรลเลอร์จะวัดความถี่ของพัลส์ที่เข้ามาอย่างต่อเนื่อง และนำมาคำนวณหา อัตราการไหล ณ เวลาจริง ($Q_{measured}$) ซึ่งถือเป็น ตัวแปรในกระบวนการ

$$Q_{measured}(t) = \frac{f(t)}{K} \quad (4)$$

$Q_{measured}$ คือ ข้อมูลที่จะถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบควบคุมเพื่อทำการปรับปรุงแก้ไข

2.5 การควบคุมระบบปิดแบบพีโอ

2.5.1 ส่วนประกอบของการควบคุมระบบปิดแบบพีโอ

1. ค่าเป้าหมาย (SP) คือค่าอัตราการไหลที่เราต้องการ
 2. ตัวแปรในกระบวนการ (PV) คือค่าอัตราการไหลที่วัดได้จริงจากเซนเซอร์ $Q_{measured}(t)$
 3. ค่าความคลาดเคลื่อน ($e(t)$) คือผลต่างระหว่างค่าที่ต้องการกับค่าที่วัดได้จริง
- สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (5)

$$e(t) = SP - PV = Q_{setpoint} - Q_{measured}(t) \quad (5)$$

4. ตัวกระทำ (Actuator) คืออุปกรณ์ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการไหลได้ในงานวิจัยนี้คือมอเตอร์เกียร์บีบบแบบเฟืองในที่สามารถปรับความเร็วรอบได้

2.5.2 การทำงานของการควบคุมระบบปิดแบบพีไอ

การควบคุมระบบปิดแบบพีไอ จะคำนวณสัญญาณเอาต์พุต (Control Output, $u(t)$) เพื่อส่งไปสั่งงานตัว โดยอาศัยสองส่วนประกอบหลัก

1. ส่วน Proportional (P) ตอบสนองต่อความคลาดเคลื่อนในปัจจุบัน

$$- Pout = Kp \cdot e(t)$$

- ถ้า $Q_{measured}(t)$ ต่ำกว่า $Q_{setpoint}$ ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นบวก ส่วน P จะสั่งให้มอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองในการทำงานแรงขึ้นทันทีค่า Error มาก การตอบสนองก็จะยิ่งแรงขึ้นตามสัดส่วน

2. ส่วน Integral (I) ตอบสนองต่อความคลาดเคลื่อนที่สะสมมาในอดีต

$$- Iout = Ki \int e(t) dt$$

- ส่วนนี้ทำหน้าที่กำจัด ความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (Steady-state error) หาก $Q_{measured}$ ยังคงต่ำกว่า $Q_{setpoint}$ เล็กน้อยเป็นเวลานาน ค่า Integral ของความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นทีละน้อย และจะไปสั่งให้มอเตอร์เกียร์บีบแบบเฟืองในการทำงานหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะกลายเป็นศูนย์สมบูรณ์

สมการของการควบคุมระบบปิดแบบพีไอดังสมการที่ (6)

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int e(t) dt \quad (6)$$

วิธีการนี้ช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณและลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการสุ่มวัดความถี่ในแต่ละช่วงเวลาสั้นๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงแค่ทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ที่เข้ามาอย่างต่อเนื่อง และแปลงเป็นค่าปริมาตรสะสมแบบทันที

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากการทดสอบระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด บรรจุ น้ำยาล้างจานที่มีความหนืด 1,300 – 1,700 มิลลิพาสคาล-วินาที [13] ลงบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด ขนาด 100 มิลลิลิตรจำนวน 10 ขวด ตรวจสอบความถูกต้องของปริมาตรด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลรุ่น Kitchen Scale CX-Series

ทำการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเปล่าและน้ำยาล้างจานที่อุณหภูมิ 25 องศา ด้วยวิธีการวัดอัตราการไหลของเหลว ปริมาตร น้ำ 1 ลิตร ผ่านท่อลำเลียงของเหลวที่มีรัศมี 9 มิลลิเมตร มีความยาว 1,040 มิลลิเมตร ตรวจวัดอัตราการไหลของเหลวด้วยเซนเซอร์ตรวจจับการไหลของน้ำ รุ่น YF-S401 ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง และนำค่าอัตราการไหลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนืดด้วยสมการ Poiseuille และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความหนืดของเหลว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง

3.1 การทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเปล่า

การทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเปล่า และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความหนืดของน้ำเปล่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเปล่า

จำนวนครั้งที่	อัตราการไหล (mm ³ /s)	ความหนืดของน้ำ (mPa·s)	ค่าความหนืดที่ได้ (mPa·s)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	2.785	0.89	0.889	0.0000089
2	2.785	0.89	0.889	0.0000089
3	2.784	0.89	0.890	0
4	2.784	0.89	0.890	0
5	2.784	0.89	0.890	0
6	2.785	0.89	0.889	0.0000089
7	2.784	0.89	0.890	0

จำนวนครั้งที่	อัตราการไหล (mm ³ s)	ความหนืดของน้ำ (mPa·s)	ค่าความหนืดที่ได้ (mPa·s)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
8	2.785	0.89	0.889	0.0000089
9	2.784	0.89	0.890	0
10	2.784	0.89	0.890	0
ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย				0.0000356

จากตารางที่ 3.1 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเปล่า ด้วยวิธีการวัดอัตราการไหลของเหลว โดยการขับปั๊มแบบเฟืองด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที ปริมาณน้ำ 1 ลิตร ผ่านท่อลำเลียงของเหลว มีรัศมี 9 มิลลิเมตร มีความยาว 1,040 มิลลิเมตร ตรวจวัดอัตราการไหลของเหลวด้วยเซนเซอร์ตรวจจับการไหลของน้ำ รุ่น YF-S401 ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง และนำค่าอัตราการไหลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนืดด้วยสมการ Poiseuille และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความหนืดของเหลว พบว่า ผลการทดลองครั้งที่ 1 ค่าความหนืดที่ได้ 0.889 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 2 ค่าความหนืดที่ได้ 0.889 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 3 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิ-ปาสคาลวินาที การทดลองครั้งที่ 4 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 5 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 6 ค่าความหนืดที่ได้ 0.889 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 7 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 8 ค่าความหนืดที่ได้ 0.889 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 9 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 10 ค่าความหนืดที่ได้ 0.890 มิลลิปาสคาล-วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำ ที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 0.89 มิลลิปาสคาล-วินาที ค่าที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.0000356 เปอร์เซนต์

3.2 การทดลองหาค่าความหนืดของน้ำยาล้างจาน

การทดลองหาค่าความหนืดของน้ำยาล้างจานยี่ห้อซันไลต์ที่มีความหนืด และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความหนืดของน้ำยาล้างจาน ที่อุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,300 มิลลิปาสคาล-วินาที ถึง 1,700 มิลลิปาสคาล-วินาที [13] จึงใช้ค่าเฉลี่ยในการทดลองที่ 1,500 มิลลิปาสคาล-วินาที แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำยาล้างจาน

จำนวนครั้งที่	อัตราการไหล (mm ³ s)	ความหนืดเฉลี่ยของน้ำยาล้างจาน (mPa·s)	ค่าความหนืดที่ได้ (mPa·s)	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
1	0.00000177	1,500	1,400.23	6.65
2	0.00000177	1,500	1,400.23	6.65
3	0.00000178	1,500	1,392.36	7.18
4	0.00000179	1,500	1,384.58	7.69
5	0.00000179	1,500	1,384.58	7.69
6	0.00000177	1,500	1,400.23	6.65
7	0.00000180	1,500	1,376.89	8.21
8	0.00000179	1,500	1,384.58	7.69
9	0.00000179	1,500	1,384.58	7.69
10	0.00000178	1,500	1,392.36	7.18
ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย				7.33

จากตารางที่ 3.2 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำยาล้างจาน ด้วยวิธีการวัดอัตราการไหลของเหลว โดยการขับปั๊มแบบเฟือง ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที ปริมาณน้ำ 1 ลิตร ผ่านท่อลำเลียงของเหลว มีรัศมี 9 มิลลิเมตร มีความยาว 1,040 มิลลิเมตร ตรวจวัดอัตราการไหลของเหลวด้วยเซนเซอร์ตรวจจับการไหลของน้ำ รุ่น YF-S401 ทำการทดลองจำนวน 10 ครั้ง และนำค่าอัตราการไหลที่ได้มาคำนวณหาค่าความหนืดด้วยสมการ Poiseuille และเปรียบเทียบกับมาตรฐานความหนืดของเหลว พบว่า ผลการทดลองครั้งที่ 1 ค่าความหนืดที่ได้ 1,400.23 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 2 ค่าความหนืดที่ได้ 1,400.23 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 3 ค่าความหนืดที่ได้ 1,392.36 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 4 ค่าความหนืดที่ได้ 1,384.58 มิลลิ-ปาสคาลวินาที การทดลองครั้งที่ 5 ค่าความหนืดที่ได้ 1,384.58 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 6 ค่าความหนืดที่ได้ 1,400.23 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 7 ค่าความหนืดที่ได้ 1,376.89 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 8 ค่าความหนืดที่ได้ 1,384.58 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 9 ค่าความหนืดที่ได้ 1,384.58 มิลลิปาสคาล-วินาที การทดลองครั้งที่ 10 ค่าความหนืดที่ได้ 1,392.36 มิลลิปาสคาล-วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำยาล้างจาน ที่มีค่าความหนืด 1,300 มิลลิปาสคาล-วินาที ถึง 1,700 มิลลิปาสคาล-วินาที มีค่าความหนืดเฉลี่ย 1,500 มิลลิปาสคาล-วินาที ค่าที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 7.33 เปอร์เซ็นต์

3.3 การทดลองบรรจุน้ำยาล้างจาน ลงขวดบรรจุภัณฑ์

ทำการบรรจุน้ำยาล้างจานด้วยระบบระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติ สำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวด ลงขวดบรรจุภัณฑ์ขนาด 100 มิลลิลิตร ลงขวดบรรจุภัณฑ์ จำนวน 10 ครั้ง แสดงผลการทดลอง ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการทดลองบรรจุน้ำยาล้างจานปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงขวดบรรจุภัณฑ์

จำนวนครั้ง	ปริมาณที่ได้จากเซนเซอร์	ปริมาณที่ได้จากเครื่องชั่ง	ค่าความคลาดเคลื่อน(%)
1	100 มิลลิลิตร	99 มิลลิลิตร	1
2	100 มิลลิลิตร	99 มิลลิลิตร	1
3	100 มิลลิลิตร	101 มิลลิลิตร	1
4	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	0
5	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	0
6	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	0
7	100 มิลลิลิตร	101 มิลลิลิตร	1
8	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	0
9	100 มิลลิลิตร	100 มิลลิลิตร	0
10	100 มิลลิลิตร	99 มิลลิลิตร	1
ค่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย			0.5

จากตารางที่ 4.5 ผลการทดลองบรรจุน้ำยาล้างจานปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงขวดบรรจุภัณฑ์ การทดลองเปรียบเทียบปริมาณน้ำยาล้างจานที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ตรวจจับการไหลของน้ำกับปริมาณน้ำยาล้างจานที่ทำการชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลรุ่น Kitchen Scale CX-Series ในฟังก์ชันวัดปริมาณของเหลว จำนวน 10 ครั้ง เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.5 เปอร์เซ็นต์

4. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยและพัฒนาระบบควบคุมปริมาตรของเหลวชนิดในกระบวนการบรรจุของเหลวอัตโนมัติสำหรับบรรจุภัณฑ์ชนิดขวดพบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการคำนวณหาค่าความหนืดของของเหลวโดยอาศัยหลักการวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตร การทดสอบประสิทธิภาพได้ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นการทดลองกับน้ำเปล่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ผลการทดลองจำนวน 10 ครั้งแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำที่สูงมาก โดยค่าความหนืดที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานที่ 0.89 mPa-s และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 0.0000356% ซึ่งเป็นการยืนยันความเที่ยงตรงของวิธีการและเซนเซอร์ที่ใช้ ในส่วนที่สอง ได้ทำการทดลองกับน้ำยาล้างจานยี่ห้อซันโล่ ซึ่งเป็น

ของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่า โดยเปรียบเทียบกับค่าความหนืดมาตรฐานเฉลี่ยที่ 1,500 mPa·s ผลปรากฏว่าระบบสามารถวัดค่าความหนืดได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 7.33% แม้ความคลาดเคลื่อนจะสูงกว่าการทดลองกับน้ำเปล่า แต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นนี้มีศักยภาพและความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบรรจุของเหลวที่มีความหนืดทั้งต่ำและสูงลงในบรรจุภัณฑ์โดยอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. ข้อเสนอแนะ

การต่อยอดงานวิจัยในอนาคตคือการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบควบคุมให้มีความแม่นยำสูงขึ้น โดยอาจประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูง เช่น การใช้ระบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) และปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อให้ระบบสามารถเรียนรู้และปรับตัวเข้ากับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของเหลวที่มีความซับซ้อนกว่าได้ นอกจากนี้ ควรมีการทดสอบระบบกับของเหลวหนืดประเภทอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ซอสปรุงรส หรือเจลเครื่องสำอาง เพื่อประเมินความสามารถในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลายยิ่งขึ้น การผสานเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยผลกระทบต่อความหนืดโดยตรง ควบคู่กับการพัฒนาให้ระบบสามารถเชื่อมต่อกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เพื่อการเก็บข้อมูลและกระบวนการผลิตแบบเรียลไทม์ จะเป็นการยกระดับสู่ระบบการผลิตอัจฉริยะที่สามารถตอบสนองต่อมาตรฐานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ได้อย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Laub Hunt. (31 August 2024). The Impact of Bottle Filling Accuracy on Product Quality and Cost. สืบค้นจาก <https://www.laubhunt.com/the-impact-of-bottle-filling-accuracy-on-product-quality-and-cost>
- [2] Filsilpek. (n.d.). Reducing Product Waste with Liquid Filling Machine Solutions. สืบค้นจาก <https://filsilpekgroup.com/blog/reducing-product-waste-with-liquid-filling-machine-solutions>
- [3] Matics. (n.d.). How to Reduce Giveaway in the Food Manufacturing Industry. สืบค้นจาก <https://www.cimpro.com/hubfs/Matics/MaticsRtOI-Use%20Case-Giveaway.pdf?hsLang=nl-nl>
- [4] B. Kalidasan, J. Ben Ajai Raja, M. Giri Gowtham and M. Kadeesh, “Automatic Bottle Filling Machine.” International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 5, No. 3, pp. 407-408, March. 2018.
- [5] M. Crescentini, S. Fatima Syeda, and G. Piero Gibiino, “Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques.” IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 22, No.11, 10137-10151, June. 2022.
- [6] R. Garmabdaria, S. Shafiea, W. Zuha Wan Hassana and A. Garmabdari, “Study on the Electiveness of Dual Complementary Hall-Effect Sensors in Water Flow Measurement for Reducing Magnetic Disturbance.” Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 45, No.4, pp. 280-287, October. 2015.
- [7] J. Lalnunthari and H.H. Thanga, “Dependence of Hall Effect flow sensor frequency on the attached inlet and outlet pipe size.” 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia), India, October. 5-7 2017, pp. 56-60.
- [8] White F. M., Fluid Mechanics, 8th ed. McGraw-Hill Education, 2016.
- [9] Munson, Okiishi, Huebsch, and Rothmayer, Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th ed. John Wiley & Sons, 2013.
- [10] Yunus A. Çengel and John M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th ed. McGraw-Hill Education, 2018.
- [11] R. Meia, M. Grossoa, S. Troncia, R. Barattia and F. Corominas, “Real-Time Control of Viscosity Curve for a Continuous Production Process of a Non-Newtonian Fluid,” 13th International Conference on Chemical and Process Engineering, Italy, May. 28-31, 2017, pp. 1099-1104.
- [12] Eric A. Ponce, Steven B. Leeb, and Peter A. Lindahl, “Know the Flow: Non-Contact Magnetic Flow Rate Sensing for Water Meters.” IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 21, No.1, 802-811, January. 2021.
- [13] Unilever Thai Trading Limited. (n.d). Safety Data Sheet: Sunlight Lemon Turbo. สืบค้นจาก <https://www.jorportoday.com/safety-data-sheet/>



สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
96 หมู่ 2 ตำบลประตูชัย
อำเภอพระนครศรีอยุธยา
จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
13000



arucon@aru.ac.th
www.aru.ac.th/arucon



0-3527-6577 , 0-3532-2082