



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอากาศยาน NKRAFA JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

ปีที่ 22 ฉบับที่ 2 ก.ค. - ธ.ค. 69



ISSN 3057 - 0905 (Print)
ISSN 3057 - 0913 (Online)

- ชื่อวารสาร:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
- ISSN:** 3057-0905 (Print)
3057-0913 (Online)
- เจ้าของ:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
999 หมู่ 5 ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2224 ตำบลมิตรภาพ อำเภอมวกเหล็ก สระบุรี 18180
เว็บไซต์ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct>
อีเมล nkrafa.scijournal@gmail.com
- วัตถุประสงค์:** 1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อส่งเสริมด้านการค้นคว้าด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- ขอบเขต:** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ รับผิดชอบบทความวิชาการและบทความวิจัย
ด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีการบินและป้องกันประเทศหรือศาสตร์
ที่เกี่ยวข้อง
- กำหนดออก:** ปีละ 2 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน
ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม
- จัดพิมพ์โดย:** กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ โรงเรียนนายเรืออากาศ
นวมินทกษัตริยาธิราช

ทุกบทความได้รับการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิ (Reviewers) กลั่นกรองบทความทั้งหมด 3 ท่าน ด้วยวิธีการที่ไม่ทราบชื่อกันและกัน (Double Blind Review) ก่อนตีพิมพ์และเผยแพร่ในวารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ทางวารสารไม่มีนโยบายในการเก็บค่าธรรมเนียมในการ ตีพิมพ์ทุกขั้นตอน กองบรรณาธิการไม่สงวนสิทธิ์ในการคัดลอกบทความเพื่อการศึกษาแต่ให้อำอิง บทความให้ครบถ้วน

ที่ปรึกษา:

พล.อ.ท. กฤษณะ เปี่ยมศรี
พล.อ.ต. รศ.สมเกียรติ สุgangs
น.อ. ศ.ประสาทพร วงษ์คำซ่าง
อ.ชาติรี วงษ์แก้ว

บรรณาธิการ:

น.อ. รศ.ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง

รองบรรณาธิการ:

ร.อ. ผศ.ภูมินันท์ บัวงาม

กองบรรณาธิการ:

ร.อ. รศ.ดร.วิศรุต คล้ายแจ้ง	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ผศ.ดร.ธนธร ชื่นยินดี	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ผศ.ดร.ธงจุฑา สุวรรณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.ศิริวิมล สายเวช	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ดร.เกวลี สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ
ดร.ปิวิตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ ราชวิทยาลัยจุฬาภรณ
รศ.ดร.สันติ เชื้อเตอะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.พยุง มีสัจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตรภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ณัฐพล บุญนำ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.รัตนศักดิ์ เหมะ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ภักคินี ชิตสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อ.สมโภชน์ วงษ์เขียด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ณัฐวุฒิ ผ่องหนู	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตอุดรธานี
ผศ.ดร.กมลภัสสร มั่นศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
รศ.ดร.พงศกร สุนทรายุทธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วงศ์วิศรุต เชื่องสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุดาภรณ์ ภูแปร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ปิยดา โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.กรรณิการ์ อ่อนสำลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.พัชรินทร์ บัวเย็น	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผศ.ดร.รสนิน เพตะกร	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.คมเดช ภาพพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ชูประดิษฐ์
ผศ.ดร.อดิศร แก้วภักดี
อ.กวินทร์ จิวสุวรรณ
อ.สาวิตรี พิบูลศิลป์
ดร.ภูวสิทธิ์ ตุ่นแก้ว

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

กองจัดการวารสาร

ร.อ. หญิง พัทธมน ปิ่นเพชร
ร.ท. นัฐวัตร ถนอมชาติ

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ตรวจทานภาษาของบทความ

อ.ธีระพงศ์ คงด้วง
ร.ท. ณัฐวุฒิ นาคแก้ว

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

น.อ. รศ.ฐานันต์ บัวภิบาล	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
น.ท. รศ.ดร.พายัพ ศิรินาม	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
น.ท. รศ.ปราโมทย์ สุขศิริศักดิ์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ธนาณพ ลิ้มสุวรรณโรจน์	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ร.อ. ชัยญญาวัจน์ สถิตภัทรสมบัติ	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
อ.ดร.จริยากรณ์ หวังศุภกิจโกศล	สถาบันการบินพลเรือน
ผศ.ดร.อดิศร แก้วภักดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
อ.พุมิพงษ์ ธนวีระกุล	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผศ.ดร.เศรษฐวิทย์ ภูฉายา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.คมเดช ภาพพัฒนบุรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อ.วงศธร ภาธรสุวรรณ	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.ศุภวัฒน์ คชประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ขวัญจิต ออกเวหา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผศ.กรรณิการ์ อ่อนสำลี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ดร.ธนวัฒน์ พงษ์ศักดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ณภัทรชกร สารพัฒน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.ภาวิณี เทียมดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
อ.ดร.ณัฐกิตต์ อยู่ด้วง	สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
ผศ.ดร.อภิรัฐ ศิระวรกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ผศ.ดร.ชัยศิริ สนิทพลกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
อ.จุฬาวลัย นนตะพันธ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ดวงพร กาชาสปี	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ผศ.ดร.ภาคิน จำปาศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.มุสดี บุญรอด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชยธัช เพือกสามัญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร. ดุสิต งามรุ่งโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ถกล ตั้งผาติ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ดร.อรดี ศรีกิมแก้ว	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผศ.ปรีชา วงศ์หิรัญเดชา	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สุมิตรา นวลมีศรี	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผศ.ดร.ชนินทร์ ตั้งพานทอง
รศ.ดร.กสิณ รังสีกรรพุม
ผศ.ดร.ธารชุตา พันธนิกุล
ผศ.ดร.ขวัญชัย หนาแน่น
อ.จุฑาพร เกษร
ผศ.ดร.สุทินรัตน์ เพชรรัตน์
ผศ.ดร.ณัฐรัตน์ ปาณานนท์
ผศ.สิรินธร จิยาศักดิ์
ผศ.ดร.นิกร กรรณิกากลาง
ผศ.ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์
อ.หทัย แก้วกรณ์
ดร.สุริยา จิรสติสิน
ผศ.ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส
รศ.เมธี บุญพิเชฐวงศ์
รศ.ดร.สุระสิทธิ์ ทรงม้า
รท.ผศ. ดร.รัฐวุฒิ วงษ์วิทย์
ผศ.ศตวรรษ ด้วงแป้น
ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพบุรี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยราชมงคลศรีวิชัย
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ ขอขอบพระคุณผู้อ่าน ผู้เขียนบทความ ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนวารสารด้วยดีตลอดมา วารสารฉบับนี้ยังคงมุ่งมั่นในการเผยแพร่ผลงานวิชาการคุณภาพสูงในสาขาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการในระดับชาติและนานาชาติ โดยกองบรรณาธิการความมุ่งมั่นที่จะยกระดับวารสารสู่ฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 โดยเน้นการเสริมสร้างคุณภาพบทความ การพัฒนากระบวนการพิจารณาบทความที่เข้มงวดยิ่งขึ้น

วารสารฉบับนี้มีบทความที่ผ่านการพิจารณาจำนวนทั้งสิ้น 12 เรื่อง ประกอบด้วย บทความจากหน่วยงานภายนอก จำนวน 11 เรื่อง และบทความภายในโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จำนวน 1 เรื่อง ทั้งนี้ กองบรรณาธิการขอเรียนเชิญอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นิสิตนักศึกษา และผู้ที่สนใจส่งผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพ ปฏิบัติตามจรรยาบรรณการวิจัย เพื่อร่วมขับเคลื่อนองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในฉบับถัดไป

นาวาอากาศเอก



(รองศาสตราจารย์ ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง)

บรรณาธิการ

บทความวิจัย

สมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน Mechanical Properties of Pavement Recycling Materials as Base Layer for Quality Improvement with Cement and Asphalt Emulsion <i>ศุภศิษฐ์ สีลา, นิรชร นกแก้ว</i> <i>Suppasit Seela, Nirachorn Nokkaew</i>	192-213
การพัฒนาระบบตรวจจับข้อบกพร่องอัตโนมัติด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วม การจำแนกแบบลูกผสม K-Means และ K-Nearest Neighbor An Automatic OMR System Using Digital Image Processing with Hybrid K-Means and K- Nearest Neighbor Classification <i>พิศณุ คุ้มชัย, ปกรณ์ รัตนครีพ, อีรพงศ์ โอฬารกิจอนันต์, ณัฐวุฒิ สุชาโต</i> <i>Pisanu Kumeechai, Pakorn Rattanakreep, Teeraphong Olarnkijanan,</i> <i>Nattawut Suchato</i>	214-234
การพัฒนาระบบคัดแยกขยะพลาสติกอัจฉริยะ Development of An Intelligent Classification of Plastic Waste System <i>พัชรภา ชมพิพัฒน์, ปาณิสรา หาดขุนทด</i> <i>Patcharapa Chompipat, Panisara Hadkhuntod</i>	235-248
การจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทางสำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ ด้วยสัญญาณวิทยุ A Simulation of Directional Antenna System for UAV Detection Using Radio Frequency Signals <i>วัชรพงศ์ เกตุปาน, ครองบุญ สิงหนาท</i> <i>Watcharapong Ketpan, Krongboon Singhanat</i>	249-274
ระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม A Real-Time Sales Data Management System for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs) <i>กฤษณการณ วังอัคคะ, อีรววัฒน์ เลปนธิรางกูร, เบญญาภา มัศยามาศ, สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์,</i> <i>เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล</i> <i>Kitsanakan Wongorakha, Theerawat Lapanathirangkoon,</i> <i>Benyapha Matsayamat, Surajate On-rit, Egkarin Watanyulertsakul</i>	275-289

บทความวิจัย

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติเพื่อสนับสนุน กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน	290-303
Development of a Web-Based 3D Model Visualization Application to Support Community-Based Product Design Processes	
<i>ดวงทิพย์ รั้งพรดี, ญาณพัฒน์ ลาภพานิชยกุล</i>	
<i>Duangthip Rubporndee, Yanapat Lappanitchyakul</i>	
การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณของการพยากรณ์รังสีอาทิตย์รายชั่วโมงด้วยวิธีมอนติคาร์โล: กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสถียรภาพแบบจำลอง CPR ในประเทศไทย	304-313
Quantitative Risk Assessment of Hourly Solar Radiation Forecasting using Monte Carlo Method: A Comparative Stability Study of CPR Model in Thailand	
<i>พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย์</i>	
<i>Phisit Suvarnaphaet</i>	
กระบวนการปรับปรุงอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร: กรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี	314-333
Building Renovation Process Using Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Code (BEC) to Reduce Energy Consumption in Buildings: A Case Study of the Thai Public Broadcasting Services Television (Thai PBS) Transmitter Building in Ubon Ratchathani Province	
<i>วรายุทธ นนไส, ธีรวัฒน์ ลินศิริ, อภัย ชาภิรมย์</i>	
<i>Warayut Nonsai, Teerawat Sinsiri, Aphai Chapirom</i>	
การศึกษาอิทธิพลของคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์ลูกค้าที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ	334-354
The Study of the Influence of Logistics Service Quality and Customer Relationship Management on Customer Engagement in International Freight Forwarding Business	
<i>พุดพิงษ์ ธนวีระกุล, นรินทร์ เนียมน้อย</i>	
<i>Puthipong Thanaveerakul, Narin Neamnoy</i>	

บทความวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อใช้ในการท่องเที่ยว เชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ Development of an Augmented Reality (AR) Application for Cultural Tourism in Nonthaburi Province: A Case Study of Five Cultural Sites <i>พรหมบัญชา พรหมมาหล้า</i> <i>Prombuncha Prommala</i>	355-380
Analysis of an SVIR Epidemic Model with Vaccination and Nonlinear Incidence <i>Satchukorn Dueannuan, Ekkachai Kunnawuttipreechachan</i>	381-394
Investigating Safety Behavior, Accidents, and Safety Standards: The Role of Strategic Design and Education in Enhancing Laboratory Safety <i>Duangporn Garshasbi, Pattadon Sukkapan, Jureebhorn Kaewjunda, Krisada Masomboon, Kanyakorn Kunwaneeworaya, Supunnee Pladsrichuay, Sasawat Pengpae</i>	395-417

สมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง
ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน
Mechanical Properties of Pavement Recycling Materials as Base Layer
for Quality Improvement with Cement and Asphalt Emulsion

ศุภศิษฐ์ สีลา¹ และ นิรชร นกแก้ว^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Suppasit Seela¹ and Nirachorn Nokkaew^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Corresponding Author Email : nirachorn.n@en.rmutt.ac.th

Received 22 August 2025

Revised 13 January 2026

Accepted 23 January 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุจากโครงสร้างทางเดิมถนนทางหลวงชนบท นย.3027 โดยมีความหนาผิวทางแอสฟัลต์เดิม 0.05 m และความหนาพื้นทางหินคลุกเดิม 0.15 m นำไปทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม และออกแบบวัสดุบนพื้นฐานวัสดุรีไซเคิล (Recycled Materials) โดยผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักมวลรวม ก่อนนำวัสดุไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลเพิ่มเติมด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักมวลรวม และเปรียบเทียบผลของระยะเวลาการบ่มที่ 7 และ 28 วัน

ผลการทดสอบพบว่า วัสดุมวลรวมมีการกระจายตัวเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ชนิด ก. โดยมีความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm³ และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 5.60 การใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักมวลรวม ทำให้วัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียวเท่ากับ 17.50 kg/cm² จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (ITS) โมดูลัสคืนตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (ITSM) และ โมดูลัสคืนตัว (RM) พบว่า CSS-1 สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่น ความต้านทานการเสียดสีและการสึกกร่อนและความต้านทานการแตกร้าวได้ดี โดยที่ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักมวลรวม เหมาะสมกับการนำมาปรับปรุงวัสดุชั้นพื้นทาง เพราะปริมาณ CSS-1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลง และระยะเวลาในการบ่มที่อายุ 28 วัน ช่วยพัฒนาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันสมบูรณ์ขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากช่วยลดการนำวัสดุใหม่มาใช้งาน และลดมลพิษจากการขนส่งด้วย

คำสำคัญ: การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม, ปูนซีเมนต์, แอสฟัลต์อิมัลชัน

Abstract

This research was conducted by using pavement recycling materials from rural road structure No.3027 with the reclaimed asphalt pavement thickness of 0.05 m and the reclaimed crushed rock thickness of 0.15 m. Firstly, the basic properties of the materials were tested and then designed on the basis of recycled materials with a cement hydraulic GU type in the ratios of 0, 1, 2, 3, 4, and 5% by total mass weight. Then the material was further improved with an asphalt emulsion of CSS-1 type in the ratio of 0, 1, 2, and 3% by total mass weight, and the results of the curing periods of 7 and 28 days were compared.

The test results showed that the aggregate material was distributed close to the standard of crushed rock base layer type A with a maximum dry density of 2.291 g/cm³ and an optimum moisture content of 5.60%. The use of cement was 2.82% by total weight, resulting in an unconfined compressive strength of 17.50 kg/cm². Based on indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, and Resilient Modulus, it was found that CSS-1 can improve its mechanical properties of elasticity, permanent deformation resistance, and cracking resistance, where CSS-1 was equal to 1% by total mass weight. It was suitable for use to improve the base course layer material because of the increased amount of CSS-1. As a result, the material has a reduced unconfined compressive strength. In addition, the incubation period at the age of 28 helped to develop the hydration reaction of cement and asphalt emulsions and was also environmentally friendly because it reduced the use of new materials and also the pollution from transportation.

Keywords: Pavement Recycling, Cement, Asphalt Emulsion

1. บทนำ

จากรายงานสำนักงบประมาณของรัฐบาล ฉบับที่ 8/2562 กล่าวว่า การพัฒนาระบบการคมนาคมขนส่งของประเทศไทยมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ระบบการขนส่งทางถนนยังคงเป็นหลักในการขนส่งสินค้าภายในประเทศ สัดส่วนการขนส่งสินค้ากว่าร้อยละ 90 ถูกขนส่งโดยรถบรรทุกและรถหัวลาก ทำให้ปริมาณการคมนาคมขนส่งทางถนนมีมากกว่าความจุของถนนที่สามารถรองรับได้ [1] การรับน้ำหนักจากการจราจรที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ถนนเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะจากยานพาหนะที่มีน้ำหนักมาก การกระจายแรงจากล้อของยานพาหนะทำให้เกิดความเครียดในวัสดุชั้นทางและโครงสร้างทาง ส่งผลให้เกิดการเสียรูปถาวร (Permanent Deformation) และเกิดรอยแตกร้าวจากความล้า (Fatigue Cracking) ในระยะยาว ซึ่งมีผลต่อการใช้งานถนนในอนาคต การซ่อมบำรุงถนนที่เสื่อมสภาพก่อนระยะเวลาอันควร จะเพิ่มภาระค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมถนนมากขึ้น

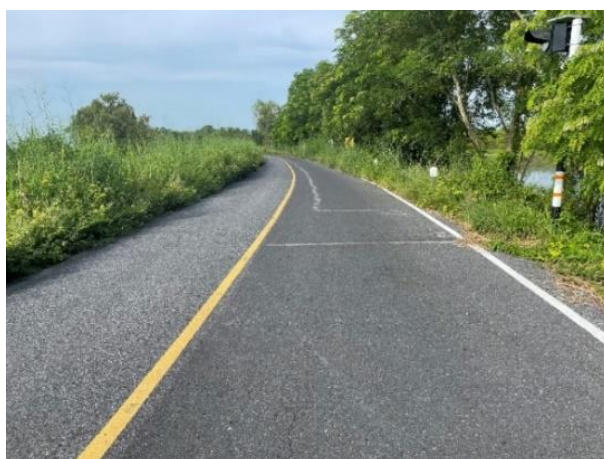
การซ่อมบำรุงรักษาถนนที่เสียสภาพถาวร เช่น การหลุดตัวเป็นร่องล้อ (Rutting) จะต้องขุดรื้อชั้นผิวทางลงไปถึงชั้นโครงสร้างทางและทดแทนด้วยวัสดุใหม่ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชั้นโครงสร้างทาง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการ

ขาดแคลนวัสดุคุณภาพดีและค่าใช้จ่ายแพง รวมถึงปัญหาการจราจรและฝุ่นละอองจากการขนส่ง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงขึ้น การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการบำรุงรักษาโครงสร้างทางเดิม ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยผลการศึกษาของธนาคารโลกชี้ให้เห็นว่า การใช้วัสดุชั้นทางเดิมในกรณีที่ดินเสื่อมสภาพลงร้อยละ 40 จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 3-4 เท่าของการซ่อมถนนที่เสื่อมสภาพถึงร้อยละ 80 และช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนได้อีกระยะหนึ่ง [2]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ โดยการนำผิวจราจรเดิม (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) [3] และวัสดุมวลรวม เช่น ทางหินคลุกเดิม (Reclaimed Crushed Rock, RCR) [4] หรือวัสดุหินมวลรวมใหม่มาผสมกัน และปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ แล้วนำกลับมาใช้ใหม่เป็นโครงสร้างชั้นพื้นทาง (Base Course) เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตาม ดังรูปที่ 1 ปูนซีเมนต์อาจนำไปสู่ปัญหาการแตกหักและเกิดการหดตัว (Shrinkage Cracking) และการเสื่อมสภาพจากกระบวนการทางเคมีได้และสะท้อนมาถึงผิวจราจร [2] ชิตินทรีย์ โสภณพงษ์ [5] พบว่าการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดแกนเดียวและค่าความเร็วคลื่นเฉือนเพิ่มขึ้น แต่ทำให้วัสดุเหล่านั้นเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแข็งเปราะ B. Dołżycki and P. Jaskuta [6] ยืนยันว่า การใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากเกินไปร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชันในถนนของประเทศโปแลนด์ มีความเสี่ยงไปและเกิดรอยแตกกว้างตามขวางจำนวนมาก J. Yan, Z. Leng, F. Li, H. Zhu, and S. Bao [7] พบว่า การเติมปูนซีเมนต์ในปริมาณเกินร้อยละ 2 ทำให้วัสดุมีความเปราะและลดความต้านทานการแตกร้าวที่อุณหภูมิต่ำ การลดปริมาณปูนซีเมนต์และเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันช่วยลดความแข็งของวัสดุและเพิ่มความยืดหยุ่นได้ T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, and Y. Pi [8] พบว่า การเลือกใช้อิมัลชันชนิดแตกตัวช้าถือเป็นการเลือกที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากช่วยให้ปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุเพิ่มขึ้น ธัญรติ ก่อตั้งสัมพันธ [9] พบว่า แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 มีความสามารถในการรับกำลังได้ดีกว่า CMS-2 ในอัตราส่วนผสมที่เท่ากัน L. Kihnl and A. F. Braham [10] พบว่า CSS เหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการระยะเวลาในการผสมที่ช้ากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CMS และยังคงความยืดเกาะดี วรุฒ เลิศไพฑูรย์ [11] พบว่า ปริมาณบิทูเมน CSS-1h และ CSS-1 ร้อยละ 3 ในทุกรูปแบบการผสมจะมีค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าเฉลี่ย 2 ถึง 4 เท่า ของวัสดุที่ไม่ได้รับการปรับปรุง B. Dołżycki, M. Jaczewski, and C. Szydlowski [12] และ Y. Li, Y. Lv, L. Fan, and Y. Zhang [13] ต่างยืนยันว่า การใช้แอสฟัลต์อิมัลชันมากกว่าร้อยละ 4 อาจทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ความพรุน (Void Ratio) ในวัสดุเพิ่มขึ้น ขณะที่ปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างตัวประสานกับวัสดุเดิมเติมได้อย่างมีนัยสำคัญ P. Nanthavisit [14] การปรับปรุงถนนด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน พบว่า สามารถแก้ไขปัญหาการแตกร้าวและความเสียหายจากน้ำ รวมทั้งเพิ่มกำลังรับแรงอัด แรงดึง ความยืดหยุ่น และความต้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ จักรพงษ์ วงศ์คำจันทร์ และคณะ [15] พบว่า ค่ากำลังอัดแกนเดียวลดลงเมื่อปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชันเพิ่มขึ้น เมธากุล มีธรรม และ วชรภูมิ เบญจโอฬาร [16] นำเสนอมิติด้านสิ่งแวดล้อม โดยการก่อสร้างชั้นทางงานหมุนเวียนวัสดุเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการซ่อมบำรุงรักษาถนนด้วยวิธีอื่น และ Y. Yang, Y. Yang, and B. Qian [17] สนับสนุนแนวคิดนี้ โดยกล่าวว่า การเติมปูนซีเมนต์ในวัสดุหมุนเวียนมาใช้ใหม่ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุในงานก่อสร้างถนน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการบำรุงรักษาถนน จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่า วิธีการนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมมาปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงและเกิดรอยแตกร้าวจากการหดตัวได้ง่ายด้วยเหตุนี้ จึงมีความพยายามในการหาสารปรับปรุงคุณภาพชนิดอื่น ๆ มาผสมรวมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้ายังคงมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ การเลือกใช้วัสดุรีไซเคิล (RAP หรือ RCR) เพียงอย่างเดียวหนึ่ง หรือการใช้อัตราส่วนผสมที่ไม่สอดคล้องกับโครงสร้างถนนทางหลวงชนบทส่วนมากของประเทศไทย นอกจากนี้ วิธีการเก็บตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยบางส่วนยังไม่สะท้อนถึงรูปแบบการก่อสร้างของเครื่องจักรหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิม

กลับมาใช้ใหม่แบบในที่ ซึ่งทำให้ยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริงในประเทศ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบในที่ของถนนทางหลวงชนบท ซึ่งเป็นวิธีการบำรุงรักษาถนนที่นิยมในปัจจุบัน โดยให้ความสำคัญกับสัดส่วนผสมของ RAP กับ RCR และรูปแบบในการบำรุงรักษาถนนดังกล่าว รวมทั้งศึกษาสารปรับปรุงคุณภาพเพียง 2 ชนิดร่วมกัน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU และ แอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 แต่งานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU เพื่อให้สอดคล้องกับแนวทางการก่อสร้างที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน และ CSS-1 เนื่องจากมีสมบัติเด่นในการกันน้ำและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวม [18] ทั้งนี้งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งทำให้วัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ยังคงมีความแข็งแรง (Strength) ขณะเดียวกันก็ยังคงมีความยืดหยุ่น (Flexibility) และความทนทานต่อการแตกร้าวภายใต้สภาวะการใช้งานจริงและการแทรกซึมของน้ำในโครงสร้างทาง ซึ่งจะช่วยยืดระยะเวลาการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ยาวนานยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 รอยแตกร้าวจากงานหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) พื้นทางหินคลุกเดิม (RCR) จากถนนทางหลวงชนบทสายทาง นย.3027 สายแยกทางหลวงหมายเลข 305 - บ้านบางไพล อ.เมือง จ.นครนายก โดยเครื่องจักรชุดไสผิวถนน (Milling Machine) และวัสดุผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกชนิด GU และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 วัสดุที่นำมาใช้ศึกษาได้มาจากแหล่งเดียวกันตลอดการทดลอง

2.2 ศึกษาการออกแบบการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ของความลึกจากการชุดไส และศึกษาสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ได้แก่ ขนาดคละของวัสดุผสม เพื่อตรวจสอบลักษณะของวัสดุมวลรวมเปรียบเทียบกับมาตรฐานงานชั้นพื้นทาง ตามมาตรฐาน มทข. 223-2545 [19] และค่าความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพื่อนำปริมาณความชื้นที่เหมาะสมไปกำหนดปริมาณน้ำในวัสดุมวลรวมของก้อนตัวอย่าง

2.3 ศึกษาสัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 0 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวม บ่มตัวอย่างที่ระยะเวลา 7 วัน และวิเคราะห์ข้อมูลหาปริมาณ

ปูนซีเมนต์ที่ทำให้ก้อนตัวอย่างวัสดุมีค่ากำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compressive Strength, UCS) เท่ากับ 17.50 kg/cm^2

2.4 ศึกษาสัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP ผสม RCR เท่ากับ 25:75 ปูนซีเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์ และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการทดสอบหลังการบ่มที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เพื่อหาสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการทดสอบต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (UCS) ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 [20] และ AASHTO T 208 [21]

2.4.2 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) ตามมาตรฐาน ASTM 6931 [22]

2.4.3 การทดสอบโมดูลัสคืนตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus, ITSM) ตามมาตรฐาน AASHTO TP-31 [23]

2.4.4 การทดสอบหาโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, RM) ตามมาตรฐาน AASHTO T 307 [24]

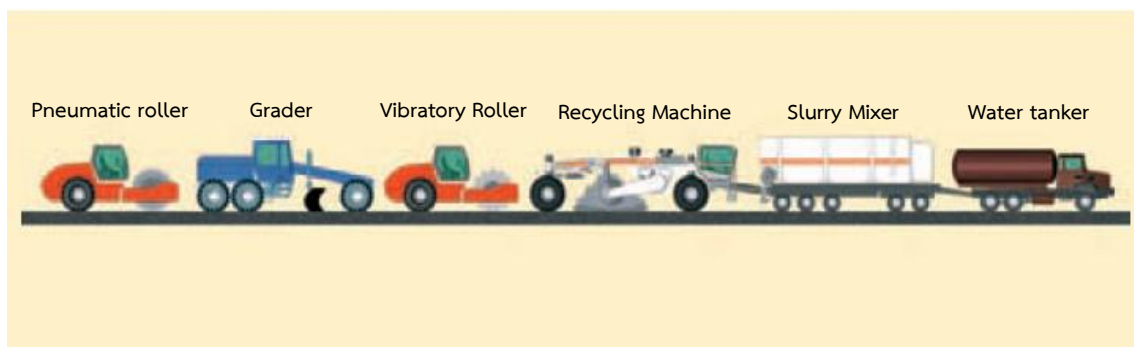
2.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) [25]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่ (Pavement Recycling) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการซ่อมบำรุงถนนที่มีความเสียหายลึกถึงชั้นโครงสร้าง โดยใช้วัสดุจากถนนเดิมผสมกับวัสดุใหม่หรือวัสดุรีไซเคิลจากถนนเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับชั้นโครงสร้างทาง ในปัจจุบันสามารถจำแนกเป็น 5 หมวดหมู่ เช่น การชุบไสแบบเย็น (Cold Planing) การรีไซเคิลแบบร้อน (Hot Recycling) การรีไซเคิลแบบร้อนในที่ (Hot In-Place Recycling) การรีไซเคิลแบบเย็น (Cold Recycling) และการปรับปรุงโครงสร้างทางแบบเต็มความลึก (Full Depth Reclamation) โดยวิธีที่นิยมในประเทศไทยคือวิธีการรีไซเคิลโดยวิธีผสมเย็น

การรีไซเคิลโดยวิธีผสมเย็นสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การหมุนเวียนโดยไม่เติมสารปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งใช้เมื่อถนนรองรับการจราจรที่มีปริมาณค่อนข้างต่ำ และการหมุนเวียนโดยเติมสารปรับปรุงคุณภาพ เช่น ปูนซีเมนต์หรือปิโตรเมอิมัลชัน เพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุ เมื่อถนนรองรับการจราจรที่มากขึ้น การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมโดยวิธีผสมเย็นนี้สามารถทำได้ทั้งในโรงงานและในสถานที่ โดยการหมุนเวียนในสถานที่ (In-Place Recycling) ดังรูปที่ 2 เป็นวิธีที่มีต้นทุนการก่อสร้างต่ำกว่าและได้รับการยอมรับในระดับสากล



รูปที่ 2 ขบวนการเครื่องจักรในการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่แบบในที่ [25]

การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมมาใช้ใหม่มีประโยชน์หลายประการ เช่น ลดการใช้วัสดุใหม่จากแหล่งเหมืองหิน ลดการขนส่งและภาระการใช้พลังงานในกระบวนการซ่อมบำรุง อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างทางลดระยะเวลาในการก่อสร้าง และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การใช้กระบวนการนี้จึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าในการบำรุงรักษาดูแล ทั้งในแง่ของต้นทุนและการอนุรักษ์ทรัพยากร

3.2 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก [26]

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกเป็นปูนซีเมนต์ที่ก่อตัวและแข็งตัวเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับน้ำ โดยมีสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 2594 การผลิตปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกใช้วิธีเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของปูนซีเมนต์ (Performance Based) และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการใช้วัสดุทดแทน เช่น ส่วนประกอบของแคลเซียม ปอซโซลาน และกากถลุง ซึ่งช่วยพัฒนาคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ในแง่ของกำลังอัด ความไหลลื่นของคอนกรีต และความคงทน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เปรียบเทียบการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีใช้วัสดุทดแทนที่ร้อยละ 10 [26]

ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีสมบัติทางวิศวกรรมที่ได้รับการรับรองจากหลายมาตรฐานและสามารถตอบสนองความต้องการในงานก่อสร้างโครงสร้างได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปสู่การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเป็นการสนับสนุนการสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ

ในส่วนของคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีการอุ้มน้ำและความต้องการน้ำที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และการยุบตัวเริ่มต้นของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่ามากกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังอัด ความต้านทานซัลเฟตและคลอไรด์ และการหดตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกมีค่าที่เทียบเท่าหรือดีกว่าคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเฉพาะในการต้านทานการกัดกร่อนและการทำปฏิกิริยาระหว่างต่างและมวลรวมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

3.3 แอสฟัลต์อิมัลชัน [27]

แอสฟัลต์อิมัลชันเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เป็นเม็ดเล็ก ๆ แล้วตีให้แพร่กระจายผสมกับน้ำที่ประกอบด้วยอิมัลซิฟายอิงเอเจนต์ (Emulsifying Agent) ผสมอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 0.25-2.0 โดยน้ำหนัก และมีแอสฟัลต์ซีเมนต์ประมาณร้อยละ 55-70 นอกนั้นเป็นน้ำ ซึ่งช่วยให้แอสฟัลต์อยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีเสถียรภาพ แอสฟัลต์อิมัลชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของสารอิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ อิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ (Anionic) และอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (Cationic) ซึ่งจะมีลักษณะประจุไฟฟ้าต่างกัน การเลือกใช้อิมัลซิไฟเออร์ที่เหมาะสมจะทำให้การผลิตแอสฟัลต์อิมัลชันมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพสูง

แอสฟัลต์อิมัลชันถูกใช้ในหลายงานวิจัยและการผลิตวัสดุถนนเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุชั้นทางเดิม โดยสามารถทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น ความต้านทานแรงอัดและแรงดึงทางอ้อม การใช้แอสฟัลต์

อิมัลชันในการก่อสร้างถนนมีประโยชน์ในการปรับปรุงความทนทานและการยึดเกาะของวัสดุต่าง ๆ และเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในงานบำรุงรักษาผิวทาง โดยมีข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับเกรดยางแอสฟัลต์อิมัลชัน [27]

แอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D977, AASHTO M140)	แอสฟัลต์อิมัลชัน (ASTM D2397, AASHTO M208)
RS-1	CRS-1
RS-2	CRS-2
HFRS-2	-
MS-1	-
MS-2	CMS-2
MS-2h	CMS-2h
HFMS-1	-
HFMS-2	-
HFMS-2h	-
HFMS-2s	-
SS-1	CSS-1
SS-1h	CSS-1h

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ผิวทางแอสฟัลต์เดิม (RAP) ความลึกของการขุดไสที่ 0.05 m โดยเครื่องจักรขุดไสผิวถนน (Milling Machine) ยี่ห้อ Wirtgen รุ่น W2200 จากถนนกรมทางหลวงชนบท สายทาง นย.3027 แยกทางหลวงหมายเลข 305-บ้านบางไพล อ.เมือง จ.นครนายก

2) พื้นทางหินคลุกเดิม (RCR) เก็บจากกองวัสดุบริเวณหน้างานก่อสร้าง โดยวิธีขุดด้วยรถแบคโฮ ซึ่งเป็นวัสดุที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

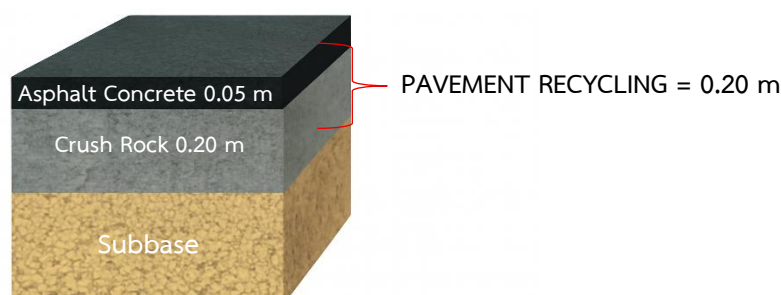
3) แอสฟัลต์อิมัลชันประเภทแยกตัวช้า (Cationic Slow Setting) ชนิด CSS-1 มอก.371-2530 [28] จากแหล่ง บริษัท โมเดอร์น แอสฟัลท์ จำกัด

4) ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU (General Use Portland Cement) มอก.2594-2556 [29] จากแหล่ง บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

4.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถนนทางหลวงชนบทที่เสื่อมสภาพจากการใช้งานระยะหนึ่ง โดยเน้นการบำรุงรักษาโครงสร้างทางเดิมเพื่อให้สามารถใช้งานต่อไปได้ ซึ่งโครงสร้างทางทั่วไปของถนนทางหลวงชนบทประกอบด้วยผิวทางแอสฟัลต์ติกคอนกรีตหนา 0.05 m และพื้นทางหินคลุกหนา 0.20 m ทั้งนี้การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมใหม่กลับมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทางแบบในที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ ที่ผ่านมานิยมขุดตัดผสมที่ความหนารวม 0.20 m

เนื่องจากผลกำลังของรถบดและเครื่องจักรรีไซเคิล ในการศึกษาครั้งนี้จึงทำการกำหนดสัดส่วนผสมของวัสดุโครงสร้างทางเดิมระหว่าง RAP และ RCR เท่ากับ 0.05 m และ 0.15 m หรือคิดเป็นสัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ ร้อยละ 25:75 โดยความหนา ในการเก็บตัวอย่างจะใช้เครื่องจักรชุดไสผิวถนน (Milling Machine) ซึ่งสมมติฐานคือ ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมไม่แตกต่างกัน เนื่องจากผลกำลังในการชุดตัดวัสดุเหมือนกันภายใต้ความหนา รวมที่เท่ากัน เพื่อให้สอดคล้องกับการรูปแบบการบำรุงรักษาถนนในปัจจุบัน และทดสอบหาสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เพื่อกำหนดค่าตัวแปรต้นที่จะใช้ในการทดลองต่อไป โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 แบบจำลองความหนาชั้นโครงสร้างทางหลวงชนบทและความลึกในการชุดตัดผสมของเครื่องจักร

1) การทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1.1) การทดสอบหาขนาดคละของวัสดุมวลรวม โดยผ่านตะแกรงแบบล่าง ตามมาตรฐานที่ มทข. (ท) 501.8-2545 [30] เพื่อหาขนาดคละของวัสดุมวลรวมหายาบ (Gradation) คำนวณได้จากสมการที่ (1) เปรียบเทียบกับ มาตรฐานงานชั้นพื้นทาง ตาม มทข. 223-2545 [19] ดังตารางที่ 2

$$\text{ร้อยละผ่านตะแกรงโดยน้ำหนัก} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

A คือ น้ำหนักของตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงแต่ละขนาด หน่วย g

B คือ น้ำหนักของตัวอย่างแห้งทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ หน่วย g

ตารางที่ 2 มาตรฐานขนาดคละของวัสดุชั้นพื้นทาง [19]

ขนาดตะแกรง มาตรฐาน	%Passing	
	ชนิด ก.	ชนิด ข.
2"	100	100
1"	-	75 - 95
3/8"	30 - 65	40 - 75
เบอร์ 4	25 - 55	30 - 60
เบอร์ 10	15 - 40	20 - 45
เบอร์ 40	8 - 20	15 - 30
เบอร์ 200	2 - 8	5 - 20

1.2) การทดสอบหาค่าความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ตามมาตรฐาน มทข. (ท) 501.2 – 2545 [31] เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นของวัสดุรวมกับน้ำที่ใช้ในการบดอัด โดยความชื้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการบดอัดส่วนผสม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{1+(w/100)} \quad (2)$$

โดยที่

γ_d คือ ความแน่นแห้งของดิน หน่วย g/cm^3

γ_w คือ ความแน่นชื้นของดิน หน่วย g/cm^3

w คือ ความชื้นในดินเป็นร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักดินอบแห้ง

2) การออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุผสม โดยใช้สัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 ผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 1 2 3 4 และ 5 โดยน้ำหนักของมวลรวม แบ่งตัวอย่างจะถูกบดอัดแน่นโดยใช้ปริมาณความชื้น (OMC) ที่เหมาะสม แล้วทำการบ่มภายในถุงพลาสติก เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นระยะเวลา 7 วัน ก่อนนำไปทดสอบ UCS ตามมาตรฐาน มทข.(ท) 303-2545 [20] และ AASHTO T 208 [21] ดังรูปที่ 5 แล้วนำไปเขียนกราฟสมการเชิงเส้นตรงสองตัวแปร แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบ และค่า UCS จากผลการกดแท่งตัวอย่างโดยมีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกัน จากนั้นเลือกปริมาณปูนซีเมนต์ ที่สามารถทำให้แท่งตัวอย่างมีค่า UCS เท่ากับ 17.50 kg/cm^2 ซึ่งเป็นค่าเป้าหมาย แล้วนำไปใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลขั้นต่อไป



(ก) บ่มแท่งตัวอย่างในถุงพลาสติก



(ข) กดแท่งตัวอย่างด้วยเครื่อง UCS

รูปที่ 5 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวปรับปรุงคุณภาพปูนซีเมนต์

3) การทดสอบหาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ (Pavement In-Place Recycling) ด้วยการทดสอบชั้นสูง โดยนำสัดส่วนผสมระหว่าง RAP:RCR เท่ากับ 25:75 และปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนำไปผสมแอสฟัลต์อิมัลชันชนิด CSS-1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลดังต่อไปนี้

3.1) การทดสอบกำลังอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Strength, UCS) ของชั้นพื้นทางเดิมที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับแอสฟัลต์อิมัลชัน ตามมาตรฐาน [20], [21] ด้วยเครื่องมือการทดสอบ UCS ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาด 101.6×116.4 mm แท่งตัวอย่างจะถูกบดอัดโดยวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน [31] และใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทดสอบหลังจากการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน โดยทดสอบด้วยอัตราความเครียด (Strain Rate) ร้อยละ 0.5 ถึงร้อยละ 2 ต่อนาที ค่ากำลังอัดแกนเดียวต้องไม่น้อยกว่าค่าเป้าหมาย 17.50 kg/cm^2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3, 4, 5) และรูปที่ 6

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

$$A_C = \frac{A}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

$$\sigma_C = \frac{P}{A_C} \quad (5)$$

โดยที่

ε คือ ความเครียดตามแนวดิ่งที่น้ำหนักกดใด ๆ

L คือ การทรุดตัวในแนวดิ่งของแท่งตัวอย่างที่น้ำหนักกดใด ๆ อ่านได้จากมาตรวัด

L_0 คือ ความยาวเดิมของแท่งตัวอย่าง หน่วย cm

A คือ พื้นที่หน้าตัดเดิมของแท่งตัวอย่าง หน่วย cm^2

A_C คือ พื้นที่หน้าตัดที่เปลี่ยนไปจากการคำนวณ หน่วย cm^2 (ดังสมการที่ 3 และ 4)

P คือ น้ำหนักกด หน่วย kg

σ_C คือ หน่วยแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สำหรับน้ำหนักกดใด ๆ หน่วย kg/cm^2



(ก) ผสมแอสฟัลต์อิมัลชัน CSS-1 ในอัตราส่วนต่าง ๆ



(ข) กดแท่งตัวอย่างด้วยเครื่อง UCS

รูปที่ 6 การทดสอบหาค่ากำลังอัดแกนเดียวปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชัน

3.2) การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Strength, ITS) เพื่อหาสมบัติต้านทานแรงดึงของวัสดุประกอบ (Composite Material) ตามมาตรฐาน [22] ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 mm บดอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมด้านละ 75 ครั้ง ด้วยเครื่องบดอัดแบบอัตโนมัติ (Marshall Hammer Machine) แล้วทำการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เตรียมแท่งตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C โดยให้แรงกระทำที่บนแท่งตัวอย่างบนระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวตั้งภายใต้อัตราความเร็วของหัวกด 50.8 mm/s จนกระทั่งแท่งตัวอย่างทลาย ดังรูปที่ 7 และบันทึกค่าน้ำหนักกดสูงสุดแล้วคำนวณค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม และดั่งสมการที่ (6)

$$ITS = \frac{2000P}{\pi DT} \quad (6)$$

โดยที่

ITS คือ ค่าความต้านทานแรงดึงทางอ้อม หน่วย KPa

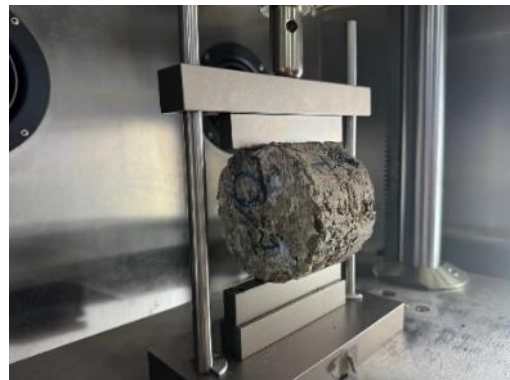
P คือ ค่าน้ำหนักกดสูงสุด หน่วย N

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง หน่วย mm

T คือ ความหนาเฉลี่ยของแท่งตัวอย่าง หน่วย mm



(ก) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



(ข) ทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

รูปที่ 7 การทดสอบความต้านทานแรงดึงทางอ้อม

3.3) การทดสอบโมดูลัสคั้นตัวด้วยแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus, ITSM) เพื่อประเมินโมดูลัสความแข็ง (Stiffness Modulus, SM) และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อน้ำหนักมากระทำ โดยให้แรงกระทำในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน [23] ทดสอบด้วยเครื่อง UTM ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 50.0 x 101.6 mm บดอัดก้อนตัวอย่างที่ได้จากการผสมด้านละ 75 ครั้ง ด้วยเครื่อง Marshall Hammer แล้วทำการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน เตรียมแท่งตัวอย่างในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C กำหนดอัตราการป้อนน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 15 ของค่า ITS จากสมการ (6) โดยให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที พัก 0.9 วินาที ในรูปแบบของ Haversine เครื่องจะทำการวัดการขยายตัวในแนวราบ (Horizontal Deformation) ที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำ ดังรูปที่ 8 แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัสความแข็ง ดังสมการที่ (7)

$$SM = \frac{P(0.273+v)}{\Delta ht} \quad (7)$$

โดยที่

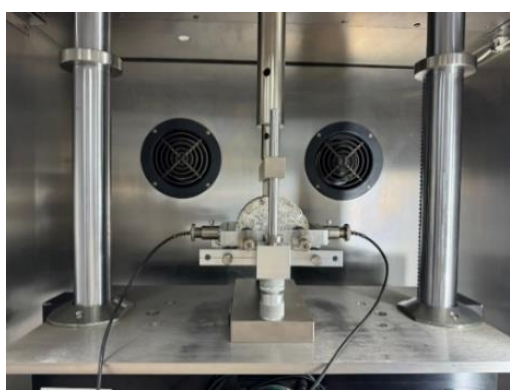
SM คือ โมดูลัสความแข็ง หน่วย kPa

P คือ ค่าสูงสุดของแรงกระทำตามแนวดิ่ง หน่วย N

v คือ อัตราส่วนปัวซอง

Δh คือ ค่าการเสียรูปในแนวนอน หน่วย m

t คือ ความหนาเฉลี่ยของตัวอย่าง หน่วย m



รูปที่ 8 การทดสอบโมดูลัสความแข็ง

3.4) การสอบโมดูลัสคืนตัว (Resilient Modulus, RM) ตามมาตรฐาน [24] ทดสอบด้วยเครื่อง UTM ใช้แท่งตัวอย่างขนาด 101.6 x 200.0 mm แท่งตัวอย่างจะถูกบดอัดโดยวิธีทดสอบความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐาน [31] และใช้ปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ทดสอบหลังจากการบ่มเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นที่ระยะเวลา 7 และ 28 วัน แล้วทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C โดยให้น้ำหนักลงบนก้อนตัวอย่าง 0.1 วินาที พัก 0.9 วินาที ในรูปแบบ Haversine ตามเงื่อนไขที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งในช่วงแรกเป็นการปรับสภาพของแท่งตัวอย่างด้วยการให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 1,000 ครั้ง จากนั้นทำการทดสอบจริงโดยแบ่งเป็น 15 ลำดับ แต่ละลำดับมีแรงดันด้านข้างและแรงกระทำซ้ำที่ต่างกันในแต่ละลำดับให้น้ำหนักกระทำซ้ำ 100 ครั้ง ดังรูปที่ 9 โปรแกรมจะบันทึกผลการทดสอบ แล้วทำการคำนวณค่าโมดูลัส ดังสมการที่ (8)

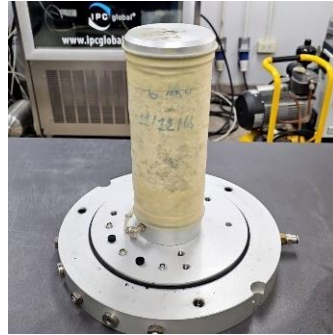
$$M_r = \frac{S_{cyclic}}{\epsilon_r} \quad (8)$$

โดยที่

M_r คือ โมดูลัสคืนตัว หน่วย kPa

S_{cyclic} คือ แรงที่กระทำในรูปแบบซ้ำในระหว่างการทดสอบ หน่วย kPa

ϵ_r คือ ความเครียดกลับคืน

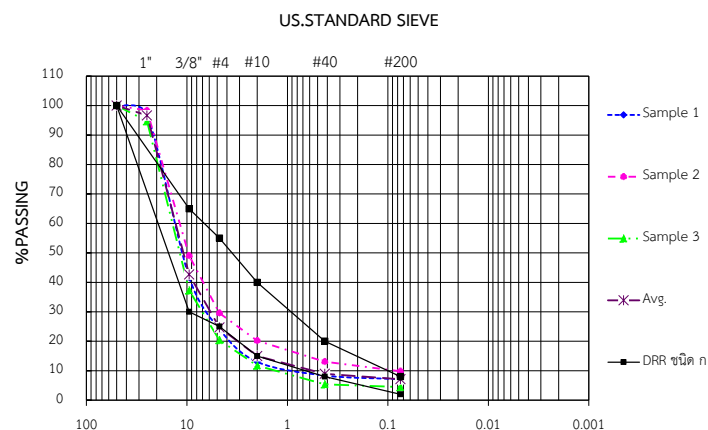


รูปที่ 9 การทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัว

5. ผลการวิจัย

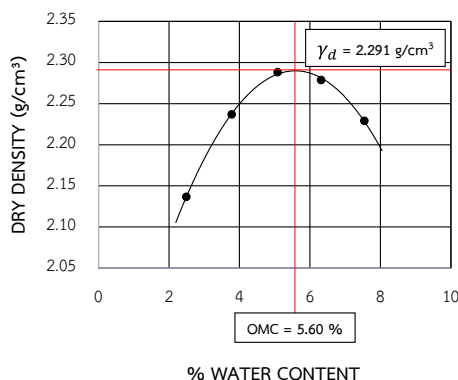
5.1 ผลการทดสอบสมบัติพื้นฐานของวัสดุโครงสร้างทางเดิม

1) ขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิม ดังรูปที่ 10 พบว่า ตัวอย่างที่ 2 แสดงความแปรปรวนของการกระจายตัวที่สูงกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 3 โดยเฉพาะในช่วงเม็ดขนาดกลางถึงเล็ก ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของวัสดุที่ละเอียดมากเกินไปในบางส่วน การเบี่ยงเบนเล็กน้อยของร้อยละผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 เป็นเรื่องปกติของวัสดุมวลรวมรีไซเคิล โดยสาเหตุหลักมาจากการเกาะตัวของแอสฟัลต์เดิมที่เคลือบมวลรวมของวัสดุ RAP อยู่ การกระจายขนาดคละของวัสดุโดยรวมนั้น อยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการนำไปออกแบบเป็นวัสดุรีไซเคิล โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นเน้นย้ำถึงความแปรปรวนในพื้นที่ และผลกระทบของการเกาะตัวของแอสฟัลต์เดิม ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงด้วยสารยึดเกาะในภายหลังเพื่อชดเชยช่องว่างของเม็ดมวลรวม ดังนั้น ตัวอย่างทั้งสามชุดมีแนวโน้มการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยการกระจายขนาดคละที่เข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุกชนิด ก. [19]



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบขนาดคละของวัสดุโครงสร้างทางเดิมของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75 กับมาตรฐานงานชั้นพื้นทาง

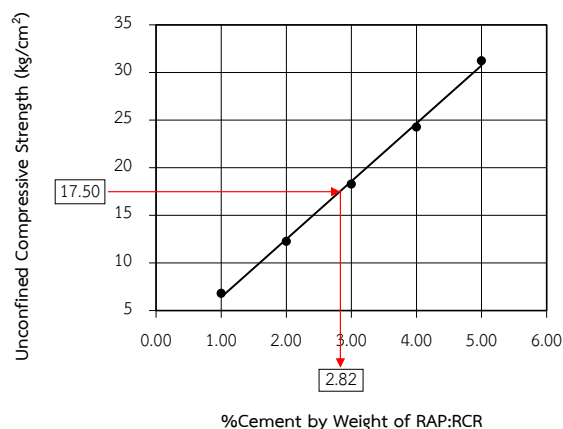
2) ความแน่นแบบสูงกว่ามาตรฐานและปริมาณความชื้นที่เหมาะสม ดังรูปที่ 11 พบว่า ค่าความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm^3 โดยค่า OMC เท่ากับร้อยละ 5.60 ของสัดส่วนผสม RAP:RCR เท่ากับ 25:75 โดยจะนำค่า OMC ที่ได้จากการทดสอบนี้ใช้เป็นค่าสำหรับการควบคุมปริมาณน้ำในการทดลองอื่น ๆ ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75

5.2 ผลการออกแบบหาปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับวัสดุมวลรวม

จากรูปที่ 12 พบว่า ตัวอย่างที่ปริมาณปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0 ไม่สามารถทดสอบได้ เนื่องจากก้อนตัวอย่างไม่มีความสามารถในการยึดเกาะ ทำให้ทลายในระหว่างขั้นตอนการแช่น้ำก่อนนำไปทดสอบ จึงไม่นำมาวิเคราะห์รวมในงานวิจัยนี้ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า UCS เพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ และทำให้ค่าความแน่นแห้งของวัสดุมวลรวมสูงขึ้น อาจเป็นเพราะปูนซีเมนต์ช่วยเพิ่มน้ำหนักของวัสดุมวลรวม และทำให้วัสดุมีการบีบอัดและการจัดเรียงที่ดีกว่า และผลการออกแบบนี้สรุปได้ว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักของมวลรวม ทำให้วัสดุมวลรวมมีค่า UCS เท่ากับค่าเป้าหมาย โดยจะนำปริมาณปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมนี้ไปใช้เป็นค่าสำหรับการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ในการทดลองอื่น ๆ ในการดำเนินงานวิจัยขั้นต่อไป ทั้งนี้ การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในวัสดุโครงสร้างทางเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสม ทำให้วัสดุเหล่านั้นเปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุแข็งเปราะ [5]

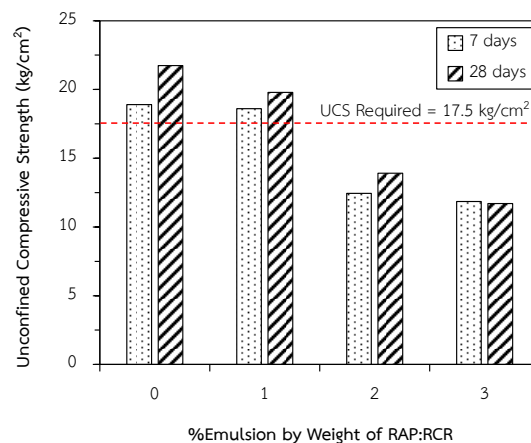


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์และค่ากำลังอัดแกนเดียวของอัตราส่วน RAP:RCR เท่ากับร้อยละ 25:75

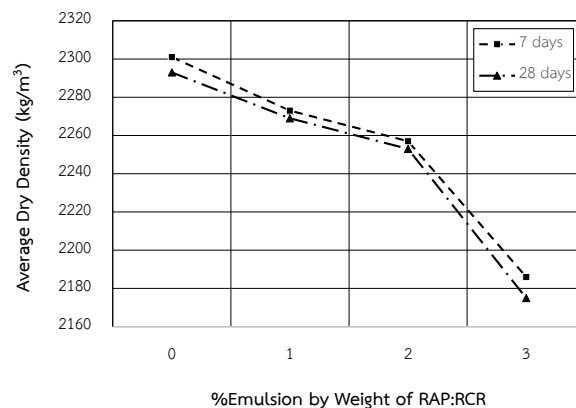
5.3 ผลการทดสอบหาสมบัติเชิงกลของการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยการทดสอบชั้นสูง

1) ผลการทดสอบ UCS ดังรูปที่ 13 พบว่า ที่ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 และ 1 เมื่ออายุการบ่ม 7 และ 28 วันทำให้ค่า UCS ของก้อนตัวอย่างผ่านเกณฑ์เป้าหมาย เท่ากับ 17.50 kg/cm² เมื่อ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 และ 2 ทำให้ค่า UCS ที่อายุการบ่มตัว 28 วัน มีค่าสูงกว่าที่อายุการบ่มตัว 7 วัน และปริมาณ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 3 กลับ

ส่งผลให้ค่า UCS ลดลง เป็นเหตุมาจาก CSS-1 เมื่อแตกตัวจะปล่อยสารลดแรงตึงผิว (Surfactants) ที่มีประจุบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ สารเหล่านี้จะทำหน้าที่เคลือบผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ และส่งผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เมื่ออายุการบ่มเพิ่มขึ้น แม้ว่าแอสฟัลต์จะช่วยเพิ่มความยึดหยุ่น แต่ปริมาณ CSS-1 ที่สูงเกินไป จะสร้างฟิล์มแอสฟัลต์ที่หนาเกินไประหว่างเม็ดมวลรวม และแคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (CSH) ซึ่งลดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical Bond) ของโครงสร้างซีเมนต์ ทำให้ UCS โดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และจากรูปที่ 14 พบว่า เมื่อปริมาณ CSS-1 เพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุมีค่าความแน่นแห้งลดลงและความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์อิมัลชันมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่



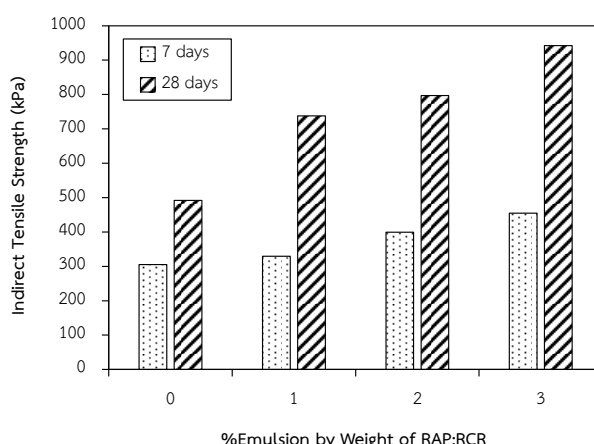
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดแกนเดียวและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



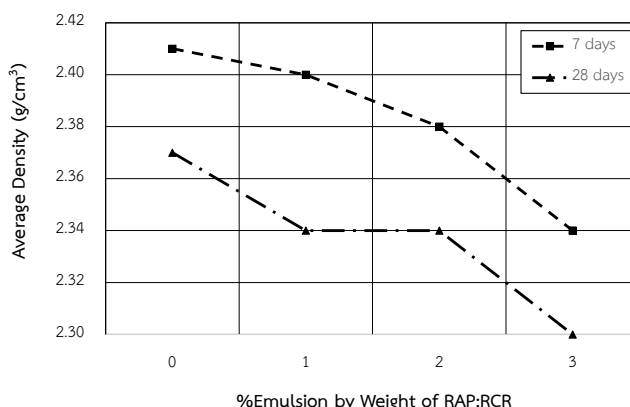
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแห้งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ UCS

2) ผลการทดสอบ ITS ดังรูปที่ 15 พบว่า ค่า ITS เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุในด้านความต้านทานต่อการแตกร้าวภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักการจราจรแบบไดนามิก การเพิ่มขึ้นของ ITS นี้เกิดจากกลไกการเชื่อมประสานของแอสฟัลต์ ฟิล์มแอสฟัลต์ที่มาจาก CSS-1 เมื่อแตกตัวและบ่มตัว จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่ยืดหยุ่น (Flexible Bond) ที่มีประสิทธิภาพสูงระหว่าง

อนุภาควลรวมและโครงสร้างผลึก CSH Gel ที่เกิดจากปูนซีเมนต์ GU แรงยึดเหนี่ยวนี้จะช่วยชดเชยความเปราะ (Brittleness) ของวัสดุที่เสริมด้วยซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ทำให้วัสดุสามารถดูดซับพลังงานก่อนการวิบัติได้มากขึ้น และจากรูปที่ 16 พบว่า ความแน่นแข็งของก้อนตัวอย่างแปรผกผันกับปริมาณ CSS-1 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณ CSS-1 ทำให้ความแน่นของวัสดุรวมลดลงและช่องว่างอากาศ (Air Void) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CSS-1 เกิดการแตกตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันจากการระเหยของน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าย่อมมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่ต่ำไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบ UCS และเป็นไปในทิศทางเดียวกับ [13] อย่างไรก็ตาม การบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วัน ช่วยให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันสมบูรณ์ขึ้น



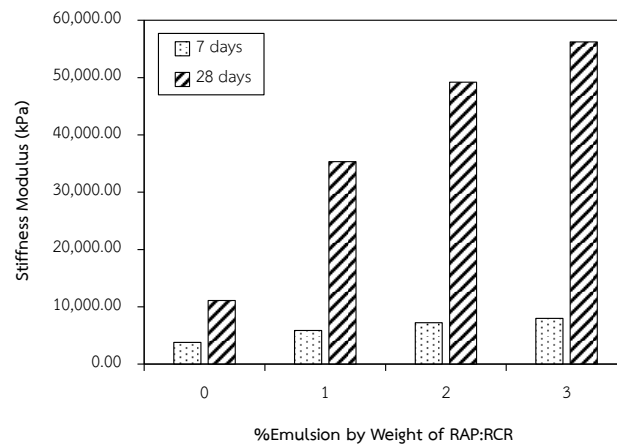
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงทางอ้อมและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



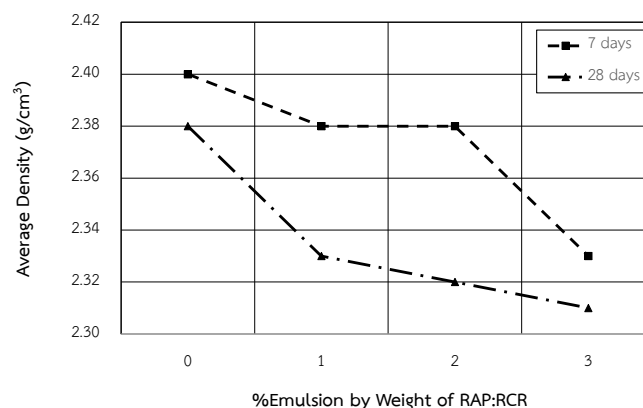
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ ITS

3) ผลการทดสอบ ITSM แสดงไว้ในรูปที่ 17 ปริมาณ CSS-1 ที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่า SM อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในระยะเวลาการบ่มที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรงภายใต้แรงที่กระทำได้ดีขึ้น โดยปูนซีเมนต์จะสร้างความแข็งแกร่ง และ CSS-1 จะสร้างแรงยึดเหนี่ยวที่ยืดหยุ่น (Cohesion) ช่วยลดความเปราะและกระจายความเค้นได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่า ITS

แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ปรับปรุงคุณภาพร่วมกับปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและ CSS-1 ไม่แข็งแรงเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับ การปรับปรุงสมบัติด้วยปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว จากรูปที่ 18 พบว่า แนวโน้มของความแน่นแข็งของก้อนตัวอย่างเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบ ITS ที่รายงานไว้ก่อนหน้านี้ ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงด้วยแอสฟัลต์อิมัลชัน การพัฒนากำลังของวัสดุมีความชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อผ่านการบ่มในระยะเวลา 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสำคัญของเวลาในการให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันและการก่อตัวของโครงสร้างจุลภาคเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์



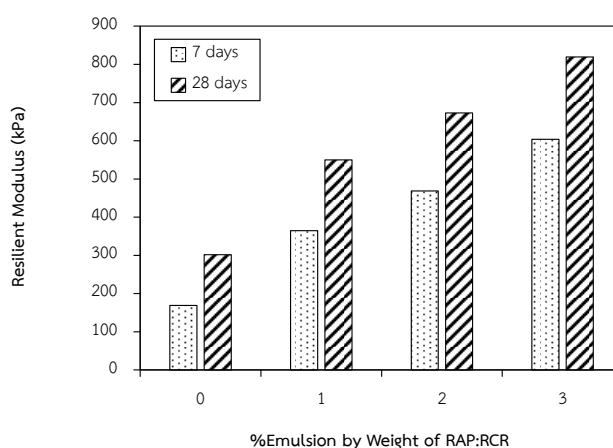
รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสความแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแน่นแข็งและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เท่ากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม เมื่อทดสอบ ITS

4) ผลการทดสอบ RM แสดงไว้ในรูปที่ 19 พบว่า ค่า RM เพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในช่วงอายุการบ่ม 7 และ 28 วัน โดยที่ปริมาณ CSS-1 เท่ากับร้อยละ 3 ให้ค่า RM สูงสุดในทุกช่วงอายุการบ่ม บ่งชี้ถึงการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นและความสามารถของวัสดุในการคืนตัวจากความเครียดกลับคืน (Recovery Strain) ภายใต้การรับน้ำหนักแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ซึ่งจำลองสภาวะการรับน้ำหนักจากการจราจรในการใช้งานจริง ค่า RM ที่สูงขึ้นสะท้อนถึงความสามารถของวัสดุในการทนต่อแรงกระทำจากภายนอก

และฟื้นคืนสภาพเดิมได้ดีในระหว่างการใช้งาน เนื่องจากฟิล์มแอสฟัลต์จะช่วยกระจายแรงเค้นที่กระทำต่อมวลรวมและโครงสร้างซีเมนต์อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้วัสดุสามารถดูดซับและปลดปล่อยพลังงานความเครียดได้มากขึ้น โดยไม่เกิดความเสียหายถาวร ตัวอย่างที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงค่าโมดูลัสคืนตัวสูงกว่าตัวอย่างที่บ่ม 7 วัน ในทุกอัตราส่วนการผสม ซึ่งเป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และแอสฟัลต์อิมัลชันที่ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และการบ่มตัวที่สมบูรณ์ของ CSS-1 ทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์มีความเหนียวแน่นและทำให้วัสดุมีสมบัติคืนตัวได้สูงสุด เห็นได้ว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของ RM มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ ITS และ ITSM อย่างมีนัยสำคัญ โดย ITS และ RM แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นและความทนทานต่อความล้า และ SM แสดงให้เห็นถึงความต้านทานต่อการเสียรูปถาวร



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสคืนตัวและปริมาณแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 เทากับร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักของมวลรวม

6. สรุป

สรุปผลการศึกษาพบว่า การหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง ในอัตราส่วน RAP:RCR เทากับ 25:75 วัสดุมวลรวมมีการกระจายตัวเข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานพื้นทางหินคลุก ชนิด ก. โดยมีความแน่นแห้งสูงสุดเท่ากับ 2.291 g/cm^3 และความชื้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 5.60 เมื่อปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU ร้อยละ 2.82 โดยน้ำหนักของมวลรวม และแอสฟัลต์อิมัลชัน ชนิด CSS-1 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของมวลรวม สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลได้อย่างมีนัยสำคัญ ในมิติความแข็งแรงและความทนทาน CSS-1 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะสร้างพันธะยึดเกาะแบบยืดหยุ่น (Flexible Cohesive Bond) ที่ช่วยกระจายแรงดึงและชดเชยความเปราะที่เกิดจากปูนซีเมนต์ ทำให้วัสดุสามารถทนทานต่อการขยายตัวและหดตัวได้ดีขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบ ITS ITSM และ RM แสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความสามารถในการต้านทานการแตกร้าวจากความล้าและฟื้นคืนสภาพเดิมภายใต้ภาระพลวัต (Dynamic Load) ได้ดี และจากผลการทดสอบ UCS แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ CSS-1 ที่สูงขึ้นเกินกว่าร้อยละ 1 ส่งผลให้ UCS ลดลงต่ำกว่าเกณฑ์เป้าหมายคือ 17.50 kg/cm^2 เนื่องจากน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก ส่งผลให้ความหนาแน่นแห้งลดลงและช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น รวมถึงการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ถูกจำกัด ซึ่งทำให้วัสดุขาดความแข็งแรงเชิงโครงสร้างที่จำเป็นสำหรับชั้นพื้นทาง นอกจากนี้ ระยะเวลาการบ่มวัสดุที่ 28 วัน มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกล เนื่องจากจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกและการรวมตัวของแอสฟัลต์อิมัลชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ วัสดุมวลรวมที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพจากการศึกษานี้ มีศักยภาพในการนำไปใช้งานก่อสร้างจริงในการบำรุงรักษาทางหลวงชนบทด้วยการหมุนเวียนวัสดุชั้นทางเดิมนำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัสดุ

ชั้นพื้นทางของประเทศไทย เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าการบำรุงรักษาดนแบบเดิม และสอดคล้องกับแนวคิดการก่อสร้างที่ยั่งยืนจากการใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ชนิด GU และการนำวัสดุเดิมกลับมาใช้ซ้ำต่อไป

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ควรทำการทดสอบความทนทานต่อความล้า (Fatigue Life) ภายใต้แรงดึงซ้ำ เพื่อประเมินอายุการใช้งานจริงของชั้นพื้นทางภายใต้ภาระจราจรแบบวัฏจักร และควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเพิ่มเติม เพื่อให้ได้แบบจำลองพฤติกรรมวัสดุที่ถูกต้องตามสภาพภูมิอากาศจริง

7.2 ควรดำเนินการวิเคราะห์เชิงจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscopy (SEM) และเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อสังเกตโครงสร้างของเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H Gel) และการกระจายตัวของฟิล์มแอสฟัลต์ที่ทำหน้าที่เชื่อมประสานในระดับอนุภาค

7.3 เนื่องจากอายุการบ่ม 28 วัน ยังไม่สะท้อนพฤติกรรมในระยะยาว ควรขยายระยะเวลาการบ่มวัสดุเพื่อประเมินการพัฒนาความแข็งแรงในระยะยาว และควรทดลองนำร่องในภาคสนาม เพื่อยืนยันสมรรถนะเชิงโครงสร้างในสภาพการใช้งานจริง

7.4 จากการศึกษาพบว่า CSS-1 ทำให้ความแน่นแห้งลดลงเนื่องจากน้ำที่เป็นส่วนผสมหลัก ควรทดลองการใช้สารลดน้ำ (Water-Reducing Admixtures) หรือสารกระตุ้นการแตกตัวแบบรวดเร็ว (Fast-Breaking Additives) ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก และ CSS-1 เพื่อลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการบดอัด ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าความแน่นแห้งและลดช่องว่างอากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบดอัดโดยไม่ลดทอนสมบัติเชิงกล

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่และวิศวกร สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา สำนักงานทางหลวงชนบทที่ 13 (ฉะเชิงเทรา) กรมทางหลวงชนบท ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการและการเก็บข้อมูล สนับสนุนข้อมูลและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงบประมาณของรัฐบาล, *แนวทางการพัฒนาระบบคมนาคมขนส่งของประเทศ*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร, 2562, หน้า 1-2. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://web.parliament.go.th/assets/portals/82/news/452/1_452.pdf
- [2] U.S. Department of Transportation, *Basic Asphalt Recycling Manual*, Glen Ellyn, IL, US: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), 2001, pp. 1-7. [Online]. Available: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/Materials/Materials%20References/BasicAsphaltRecyclingManual.pdf>
- [3] *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*, ASTM D 8-12, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d0008-12.html>
- [4] *Standard Specification for Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses*, AASHTO M 147, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2017, pp. 1-3. [Online]. Available: <https://store.transportation.org/item/publicationdetail/3851>

- [5] ชิตินทรีย์ โสภณพงษ์, “การศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างทางผสมซีเมนต์ด้วยวิธีทดสอบดินด้านพลศาสตร์,” วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2560.
- [6] B. Dotzycki and P. Jaskuła, “Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 6, no. 4, pp. 311–323, May 2019, doi: 10.1016/j.jtte.2019.02.002.
- [7] J. Yan, Z. Leng, F. Li, H. Zhu, and S. Bao, “Early-age strength and long-term performance of asphalt emulsion cold recycled mixes with various cement contents,” *Construction and Building Materials*, vol. 137, pp. 153–159, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.114.
- [8] T. Ma, H. Wang, Y. Zhao, X. Huang, and Y. Pi, “Strength mechanism and influence factors for cold recycled asphalt mixture,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, pp. 1–10, Sep. 2015, Art. no. 181853, doi: 10.1155/2015/181853.
- [9] ธัญรดี ก่อตั้งสัมพันธ์, “การนำวัสดุโครงสร้างทางเดิมกลับมาใช้ใหม่ด้วยแอสฟัลต์อิมัลชันชนิดผสมเย็น,” วศ.ม., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2552.
- [10] L. Kiihl and A. F. Braham, “Developing a particle size specification for asphalt emulsion,” *construction and building materials*, vol. 293, pp. 1-10, May 2021, Art. no. 123414, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123414.
- [11] วรุฑ เลิศไพฑูย์พันธ์, “การปรับปรุงผิวทางเดิมด้วยบิทูเมนอิมัลชันเพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นพื้นทาง,” วศ.ม., จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://digiverse.chula.ac.th/Info/item/dc:42433>
- [12] B. Dotzycki, M. Jaczewski, and C. Szydlowski, “The impact of long-time chemical bonds in mineral-cement-emulsion mixtures on stiffness modulus,” *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 121–126, 2018, doi: 10.7250/bjrbe.2018-13.406.
- [13] Y. Li, Y. Lyv, L. Fan, and Y. Zhang, “Effects of cement and emulsified asphalt on properties of mastics and 100% cold recycled asphalt mixtures,” *Materials*, vol. 12, no. 5, Mar. 2019, Art. no. 754, doi: 10.3390/ma12050754.
- [14] P. Nanthavisit, “Development of cement-asphalt emulsion mixture for Thailand road rehabilitation,” Ph.D. dissertation, D.Eng. (Civil Engineering), Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2020.
- [15] จักรพงษ์ วงศ์คำจันทร์ และคณะ, “คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุชั้นพื้นทางเดิมปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ร่วมกับยางอิมัลชัน,” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, จังหวัดภูเก็ต, 24–26 พฤษภาคม 2566, หน้า 1–6. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://www.conference.thaince.org/index.php/ncce28/article/download/2287/1430>
- [16] เมธากุล มีธรรม และ วรภูมิ เบญจโอฬาร, “การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากงานก่อสร้างถนนโดยการเลือกเทคนิคการก่อสร้างที่ต่างกัน,” *วารสารวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรม พระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 2, หน้า 1–9, ก.ค. – ธ.ค. 2559.
- [17] Y. Yang, Y. Yang, and B. Qian, “Performance and microstructure of cold recycled mixes using asphalt emulsion with different contents of cement,” *Materials*, vol. 12, no. 16, Aug. 2019, Art. no. 2548, doi: 10.3390/ma12162548.

- [18] G. Flores, J. Gallego, L. Miranda and J. R. Marcobal. "Cold asphalt mix with emulsion and 100% RAP: Compaction energy and influence of emulsion and cement content." *Construction and Building Materials*, Vol. 250, Mar. 2020, Art. no. 118804, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118804.
- [19] มทข.223-2545 มาตรฐานงานชั้นพื้นทาง (Base), สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, ปทุมธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559, หน้า 94–95.
- [20] มทข.(ท) 303-2545 วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าแรงอัดแกนเดียว (UNCONFINED COMPRESSION TEST), สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, ปทุมธานี: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2559, หน้า 272–280.
- [21] *Standard Method of Test Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, AASHTO T 208-15, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2015, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://store.transportation.org/Item/PublicationDetail?ID=5493>
- [22] *Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Asphalt Mixtures*, ASTM D6931-17, West Conshohocken, PA, 2017, pp. 1–5. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d6931-17.html>
- [23] *Standard Method of Test for Resilient Modulus of Asphalt Mixtures*, AASHTO TP 31-96, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1996, pp. 380–409. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/475728404/AASHTO-TP31-Resilient-modulus-of-bituminous-mixtures-by-indirect-tension-pdf>
- [24] *Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials*, AASHTO T 307-99 (2007), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C, 2007, pp. 1–42. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/733275991/AASHTO-T307-99-Determination-of-Resilient-Modulus>
- [25] Wirtgen GmbH, *Wirtgen Cold Recycling Technology*, 1st ed. Windhagen: Wirtgen GmbH, 2012, pp. 73–98. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Kim-Jenkins-4/publication/327738860_Recommendation_of_RILEM_TC237-SIB_on_cohesion_test_of_recycled_asphalt/links/5bab48b445851574f7e65b40/Recommendation-of-RILEM-TC237-SIB-on-cohesion-test-of-recycled-asphalt.pdf
- [26] สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA), *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก หนึ่งในมาตรการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยตามข้อตกลงปารีส*, ฉบับปรับปรุง. กรุงเทพฯ: สมาคมอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ไทย (TCMA), 2565, หน้า 1–20. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://shorturl.at/oHE7U>
- [27] วชิรินทร์ วิทยกุล, *ยางมะตอยน้ำสำหรับงานถนน*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548, หน้า 1–33.
- [28] *แคตตาล็อกแอสฟัลต์อิมัลชันสำหรับถนน*, มอก. 371-2530, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2530, หน้า 1–16.
- [29] *ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*, มอก. 2594-2556, สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2556, หน้า 1–10. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://a.tisi.go.th/t/?n=8133>
- [30] *วิธีการทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Sieve Analysis)*, มทข. (ท) 501.8-2545, สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, กรุงเทพฯ, 2559, หน้า 57–62.

- [31] วิธีการทดสอบความแน่น แบบสูงกว่ามาตรฐาน (*Modified Compaction Test*), มทช. (ท) 501.2-2545, สำนักวิเคราะห์ วิจัย และพัฒนา กรมทางหลวงชนบท, กรุงเทพฯ, 2559, หน้า 10–17.

การพัฒนาระบบตรวจสอบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับ

การจำแนกแบบลูกผสม K-Means และ K-Nearest Neighbor

An Automatic OMR System Using Digital Image Processing with Hybrid K-Means and K-Nearest Neighbor Classification

พิศณุ คุมีชัย¹, ปกรณ์ รัตนครีพ^{1*}, ธีรพงศ์ โอฟารกิจอนันต์¹ และ ณัฐวุฒิ สุชาโต¹

¹กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ฝ้ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

Pisanu Kumeechai¹, Pakorn Rattanakreep^{1*}, Teeraphong Olarnkijanan¹ and Nattawut Suchato¹

¹Department of Engineering, Education Branch, Royal Thai Naval Academy

Corresponding Author Email : pakorn.rattana@gmail.com

Received 16 September 2025

Revised 23 December 2025

Accepted 23 December 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบการรู้จำเครื่องหมายเชิงแสง (Optical Mark Recognition: OMR) เพื่อแก้ปัญหาความล่าช้าและข้อผิดพลาดจากการตรวจด้วยแรงงานคน โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับการจำแนกแบบลูกผสม (Hybrid Classification) ที่ผสมอัลกอริทึม K-Means และ K-Nearest Neighbor (K-NN) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและลดสัญญาณรบกวนของข้อมูล ระบบต้นแบบประมวลผลกระดาษคำตอบ 100 แผ่น แผ่นละ 150 ช่อง รวม 15,000 ตัวอย่าง แบ่งเป็นชุดฝึก 80% และชุดทดสอบ 20% ขั้นตอนประกอบด้วย การปรับปรุงภาพ การแบ่งส่วนภาพ และการสกัดคุณลักษณะ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้ม (Mean Intensity) ความแปรปรวน (Variance) และความหนาแน่นของพิกเซล (Pixel Density) เพื่อจำแนกว่า “ฝน” หรือ “ว่าง” ผลการเปรียบเทียบ 4 วิธี ได้แก่ K-NN, SVM, Decision Tree และ K-Means + K-NN พบว่าเทคนิคหลังให้ค่า Accuracy เฉลี่ยจากการทดลองซ้ำหลายครั้งสูงสุดที่ 99.30% (SD = 0.23) ขณะที่การประเมินด้วย Confusion Matrix ของชุดทดสอบ 3,000 ตัวอย่าง ให้ค่า Accuracy 99.30% Precision 99.11% Recall 98.56% และ F1-score 98.83% ผลการทดลองยืนยันว่าการผสม K-Means กับ K-NN ช่วยเพิ่มความถูกต้องและความเสถียรของระบบอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมศักยภาพในการใช้งานจริงโดยไม่ต้องพึ่งกระดาษเฉพาะหรือเครื่องสแกนคุณภาพสูง

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพดิจิทัล, การจำแนกแบบลูกผสม, ตรวจสอบข้อสอบแบบฝน, การสกัดคุณลักษณะ, การวิเคราะห์ผล, เมทริกซ์ความสับสน, การจัดกลุ่มแบบเคมีนส์, ขั้นตอนวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

Abstract

This research focused on developing an automated Optical Mark Recognition (OMR) system to overcome the issues of delay and errors associated with manual checking. We utilized Digital Image Processing (DIP) techniques combined with a Hybrid Classification approach employing K-Means and K-Nearest Neighbor (K-NN) algorithms to enhance accuracy and reduce data noise. The prototype processed 15,000 samples from 100 answer sheets (150 marks per sheet), divided into 80% training and 20% testing sets. The methodology included image preprocessing, segmentation, and feature extraction, focusing on Mean Intensity, Variance, and Pixel Density, to classify marks as "Filled" or "Empty." Comparative results across four methods (K-NN, SVM, Decision Tree, and K-Means + K-NN) showed that the latter technique yielded the highest average Accuracy from multiple repeated trials at 99.30% (SD = 0.23). Furthermore, evaluation using a Confusion Matrix on the 3,000 test samples confirmed a high Accuracy of 99.30%, Precision of 99.11%, Recall of 98.56%, and an F1-score of 98.83%. These findings confirmed that integrating K-Means with K-NN significantly improved the system's correctness and stability, demonstrating its potential for real-world deployment without reliance on specialized paper or high-quality scanners.

Keywords: Digital Image Processing, Hybrid Classification, Optical Mark Recognition, Feature Extraction, Result Analysis, Confusion Matrix, K-Means, K-Nearest Neighbor

1. บทนำ

การตรวจสอบแบบเลือกตอบ (Multiple Choice) เป็นวิธีการประเมินผลการเรียนที่ได้รับความนิยมในหลายระดับการศึกษา เนื่องจากสามารถประเมินผลผู้เรียนจำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น อย่างไรก็ตาม ระบบการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่อาศัยแรงงานคนยังคงมีข้อจำกัด ทั้งด้านความรวดเร็ว ความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ข้อสอบมีจำนวนมาก การใช้บุคลากรในการตรวจอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้สูง ขณะเดียวกันแม้ว่าเทคโนโลยี OMR จะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าว แต่ระบบ OMR แบบดั้งเดิมกลับต้องอาศัยกระดาษเฉพาะและอุปกรณ์สแกนคุณภาพสูง ส่งผลให้ต้นทุนสูงและไม่ยืดหยุ่นต่อรูปแบบข้อสอบที่หลากหลาย อีกทั้งยังมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดได้เมื่อผู้สอบฝนเครื่องหมายไม่เต็ม หรือลบไม่หมด [1]

การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการแก้ไขข้อจำกัดของการตรวจสอบแบบดั้งเดิม เทคนิค เช่น การปรับปรุงคุณภาพภาพ (Image enhancement), การแบ่งส่วนภาพ (Segmentation) และการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) ถูกนำมาใช้ในการแยกและตรวจจับตำแหน่งการฝนคำตอบอย่างแม่นยำและรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น งานของ Tran Vu Ha และ Nguyen Thi Thu (2020) ได้พัฒนาระบบ OMR ด้วย MATLAB ที่สามารถตรวจจับเครื่องหมายได้ถูกต้องทั้งหมด แม้จะเป็นแบบฟอร์มหลากหลายรูปแบบ [2] ขณะที่ระบบที่ใช้ OpenCV และ Python ก็มีความเร็วและความแม่นยำสูงในการประมวลผลคำตอบจำนวนมาก [3] นอกจากนี้ งานวิจัยจาก Ravindra S. (2025) ได้พัฒนาระบบ OMR บนแนวทางการประมวลผลภาพดิจิทัลและ

การเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาอุปกรณ์สแกนเฉพาะ โดยใช้กล้องมือถือหรือเว็บแคมแทนในกระบวนการตรวจสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4]

ในส่วนของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Algorithms), K-Nearest Neighbor (K-NN) ถือเป็นหนึ่งในเทคนิคแบบ (Supervised Learning) ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเข้าใจง่าย มีระยะเวลาประมวลผลต่ำ และให้ความแม่นยำสูงในงานจำแนกลักษณะภาพ เช่น งานด้าน OCR ที่รวบรวมขั้นตอน Preprocessing, Segmentation, Feature Extraction, Classification และถูกใช้ในงานจดจำตัวอักษรลายมือและข้อความหลายภาษา [5] อีกทั้งยังมีเอกสารที่กล่าวถึงการนำ K-NN ไปใช้ในงานตรวจสอบภาพที่ซับซ้อน (เช่น Blob Detection หรือ Social Image Segmentation) และพบว่าการเลือกใช้ K ค่าที่เหมาะสมช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของภาพได้ดี สรุปได้ว่า การผสมผสาน K-Means (จัดกลุ่มข้อมูลก่อน) กับ K-NN (จำแนกขั้นสุดท้าย) มีศักยภาพสูงในการเพิ่มความแม่นยำและลดความซับซ้อนของข้อมูลภาพตรวจสอบ

งานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น งานของ Hernández-Mier และคณะ (2025) ได้นำเสนอระบบ OMR แบบ unsupervised สำหรับการตรวจแบบฟอร์มจำนวนมาก โดยประยุกต์การตรวจจับจุดมาร์กด้วยโมเดลตรวจจับวัตถุ ร่วมกับอัลกอริทึม DBSCAN Clustering เพื่อจัดกลุ่มตำแหน่งมาร์กและแยกมาร์กจริงออกจากสัญญาณรบกวน ภาพถูกรับมือด้วยขั้นตอน Preprocessing เช่น Median Filtering เพื่อลด Noise และ Adaptive Thresholding บนช่องสัญญาณ H ในระบบสี HSV เพื่อรองรับมาร์กที่มีความเข้มไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังใช้การแก้ความผิดเพี้ยนเชิงมุมด้วย homography/perspective correction เพื่อให้ตำแหน่งมาร์กถูกต้องก่อนประมวลผล ผลการทดลองรายงานความแม่นยำสูงถึง 99.95% ในระดับตัวเลือก และ 96.15% ในระดับทั้งแผ่น สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธีแบบ unsupervised clustering ร่วมกับการประมวลผลภาพสำหรับงาน OMR [6] ในทำนองเดียวกัน งานของ Surlakar, Araujo และ Meenakshi Sundaram (2016) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธี K-Means clustering (แบบไม่ใช้ป้ายกำกับ) กับ K-Nearest Neighbors (K-NN) (แบบมีป้ายกำกับ) สำหรับงานแบ่งส่วนภาพ และพบว่าในบางชุดข้อมูล K-NN ให้ค่า Mutual Information สูงกว่า K-Means ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าวิธี K-NN อาจมีความเหมาะสมมากกว่าในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูงและมีข้อมูลตัวอย่างแบบมีป้ายกำกับเพียงพอสำหรับการฝึกสอน [7]

ในอีกด้านหนึ่ง งานสรุปเชิงระบบเกี่ยวกับการจดจำลายมือโดย Memon, Sami, Khan และ Uddin (2020) รายงานว่างานวิจัยด้าน Handwritten OCR จำนวนมากอาศัยการสกัดคุณลักษณะเชิงสถิติเช่น moments, zoning และตัวจำแนกแบบ k-Nearest Neighbors (K-NN) ซึ่งมักให้ผลการจำแนกที่ดีเมื่อข้อมูลมีความซับซ้อนแบบไม่เชิงเส้น [8] ขณะเดียวกัน งานวิจัยด้าน OMR หลายชิ้นได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดกลุ่มแบบ K-Means เพื่อจำแนกความหนาแน่นของลักษณะการฝนมาร์ก ตัวอย่างเช่น งานของ Sancar และคณะ (2024) ซึ่งเสนอวิธี “mark density-based clustering” เพื่อเพิ่มความไวของระบบต่อรูปแบบการฝนที่แตกต่างกันระหว่างผู้ทำแบบทดสอบ [9] นอกจากนี้ บทความปริทัศน์โดย Singh (2023) ยังได้รวบรวมเทคนิคการสกัดคุณลักษณะและการจำแนกสำหรับการรู้จำลายมือ พร้อมทั้งเน้นถึงการใช้ K-NN ร่วมกับชุดคุณลักษณะเชิงสถิติต่าง ๆ ซึ่งตอกย้ำบทบาทของ K-NN ในฐานะตัวจำแนกที่มีประสิทธิภาพในงานจดจำลายมือ [10]

จากงานวิจัยเหล่านี้สามารถสรุปได้ว่างานก่อนหน้าส่วนใหญ่ยังคงมุ่งเน้นที่การใช้เทคนิคใดเทคนิคหนึ่งเพียงอย่างเดียว และยังไม่พบงานที่ศึกษาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการผสมผสานระหว่าง K-Means และ K-NN เพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบอัตโนมัติที่ยืดหยุ่นและสามารถรองรับข้อสอบทั่วไปที่ไม่ต้องอาศัยกระดาษเฉพาะได้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นใช้ K-Means หรือ K-NN แยกกัน โดยยังไม่มีงานผสมผสานทั้งสองเทคนิคในระบบตรวจสอบอัตโนมัติอย่างเป็นระบบ ซึ่งเป็นช่องว่างของการวิจัย (Research Gap) ที่งานนี้มุ่งพัฒนาให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยด้าน OMR ส่วนใหญ่มักใช้เทคนิค K-NN หรือ K-Means ในการจำแนกผลคำตอบแยกกันซึ่งยังขาดประสิทธิภาพในการจัดการกับความแปรปรวนของข้อมูลคุณลักษณะที่สกัดจากรอยฝนที่ไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับ การจำแนกแบบลูกผสม K-Means และ K-NN โดยระบบจะเริ่มต้นด้วยการปรับปรุงภาพ (Preprocessing) การแบ่งส่วนภาพ (Segmentation) และการสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการจัดกลุ่มข้อมูลด้วย K-Means Clustering เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลและทำหน้าที่เป็น Pre-Classifier จากนั้นจึงส่งผลลัพธ์ต่อไปยัง K-NN เพื่อทำการจำแนกผลคำตอบขั้นสุดท้าย การผสมผสานเทคนิคในลักษณะนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความเสถียรของระบบตรวจข้อสอบ OMR ให้ได้สมดุลกับประสิทธิภาพในการประมวลผล

เหตุผลในการเลือกใช้อัลกอริทึม K-NN และ K-Means เนื่องจาก K-NN มีจุดเด่นด้านความเรียบง่ายและประสิทธิภาพสูงในการจำแนกข้อมูลเชิงภาพ ขณะที่ K-Means สามารถลดความซับซ้อนของข้อมูลและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนก่อนเข้าสู่กระบวนการจำแนก เมื่อผสมกันจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความเร็วของระบบ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น เช่น Support Vector Machine (SVM) และ Decision Tree ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ามีความซับซ้อนของโมเดลและใช้เวลาประมวลผลมากกว่า จึงเลือกใช้คู่เทคนิคนี้ในงานวิจัยเพื่อให้ได้สมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการประมวลผล

การใช้ K-Means Clustering เป็น Pre-Classifier เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล จะส่งผลให้ความแม่นยำในการจำแนกของ K-NN (K-Means + K-NN) สูงกว่าการใช้ K-NN, SVM, และ Decision Tree เพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ

2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับอัลกอริทึม K-NN และ K-Means เพื่อจำแนกและวิเคราะห์คำตอบจากกระดาษคำตอบที่ออกแบบขึ้นเฉพาะจำนวน 150 ข้อ ลักษณะของคำตอบจะเป็นการฝนวงกลมทึบด้วยดินสอ 2B ข้อมูลที่นำมาใช้ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องและการสแกน โดยภาพกระดาษคำตอบถูกสแกนด้วยเครื่องสแกน Epson L3110 ที่มีความละเอียดเชิงแสง (Optical Resolution) 600 × 1200 dpi โดยบันทึกเป็นไฟล์ภาพชนิด JPEG เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพเบื้องต้น

ในกระบวนการพัฒนา จะใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) เพื่อแปลงและเตรียมข้อมูล เช่น การทำภาพขาวดำ การลดสัญญาณรบกวน และการแยกพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ จากนั้นนำคุณลักษณะ (Features) ที่สกัดได้ไปประมวลผลด้วย K-NN สำหรับการจำแนกคำตอบ และใช้ K-Means ในการจัดกลุ่มข้อมูลเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการประมวลผล รวมทั้งช่วยเพิ่มความแม่นยำของระบบ ต้นแบบโปรแกรมจะพัฒนาด้วยภาษา Python โดยระบบพัฒนาและทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ CPU AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics ความเร็วพื้นฐาน 2.90 GHz, RAM 16 GB, ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Home Single Language (แบบ 64-bit operating system, x64-based processor), ไลบรารี OpenCV 4.8 และ scikit-learn 1.4

การประเมินผลของระบบจะทำการเปรียบเทียบความแม่นยำในการจำแนกคำตอบว่า “ถูก” หรือ “ผิด” เมื่อเทียบกับการตรวจโดยผู้ประเมินมนุษย์ พร้อมทั้งวัดประสิทธิภาพด้านเวลาในการประมวลผลและความเสถียรของระบบ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้จะเป็นกระดาษคำตอบจากนักเรียนจำนวนหนึ่ง โดยจำกัดข้อมูลที่ใช้สำหรับการฝึกและทดสอบไว้ที่ 100 ตัวอย่าง เนื่องจากโครงการนี้เป็นการพัฒนาต้นแบบ (Prototype) ขอบเขตของงานวิจัยจึงมุ่งเน้นการพิสูจน์

แนวคิด (Proof of Concept) และประเมินความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้ในอนาคต มากกว่าการนำไปใช้งานจริงในระดับมหาวิทยาลัยหรือโรงเรียนในปัจจุบัน

นอกจากนี้ การประเมินผลยังคำนวณค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-score เพื่อประเมินประสิทธิภาพการจำแนกเชิงลึกเพิ่มเติมจากการเปรียบเทียบความถูกต้องทั่วไป โดยค่าชี้วัดเหล่านี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์สมมูลระหว่างอัตราการตรวจจับคำตอบที่ถูกต้องกับอัตราการตรวจผิด เพื่อสะท้อนความสามารถของระบบได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบตรวจสอบข้อสอบแบบฝน OMR อัตโนมัติ การทำความเข้าใจแนวคิดพื้นฐานทางทฤษฎีจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นพื้นฐานที่ช่วยกำหนดวิธีการออกแบบและประเมินผลของระบบอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความรู้ทางด้าน การประมวลผลภาพดิจิทัล ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการแปลงภาพกระดาษคำตอบให้อยู่ในรูปที่สามารถประมวลผลได้ นอกจากนี้ยังมีการนำ เทคนิคการจัดกลุ่ม (Clustering) และ การจำแนกประเภท (Classification) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุคำตอบที่ถูกต้อง อัลกอริทึมที่มีบทบาทสำคัญในงานวิจัยนี้ได้แก่ K-Nearest Neighbor (K-NN) สำหรับการจำแนกคำตอบ และ K-Means Clustering สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูลเบื้องต้น ดังนั้น ส่วนนี้จะนำเสนอทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นกรอบความรู้พื้นฐานที่สนับสนุนการพัฒนา ระบบตรวจสอบข้อสอบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

3.1 การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing)

การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) เป็นกระบวนการปรับปรุงและแปลงภาพให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ โดยทั่วไปประกอบด้วย การแปลงภาพสีเป็นภาพขาวดำ (Grayscale/Binary), การกรองเพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise Reduction) และการแบ่งส่วนภาพ (Segmentation) เพื่อแยกวัตถุที่สนใจออกจากพื้นหลัง [11] เทคนิคการแปลงภาพให้เป็นภาพทึบดำ-ขาว (Thresholding) สามารถนิยามได้ดังนี้

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x, y) \geq T \\ 0, & \text{if } f(x, y) < T \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ $f(x, y)$ คือค่าความเข้มของพิกเซลที่ตำแหน่ง (x, y) , T คือค่าความเข้มเกณฑ์ที่กำหนด และ $g(x, y)$ คือค่าผลลัพธ์หลังการแปลงภาพเป็นค่าทึบดำ-ขาว (Binary Image) [12]

3.2 การตรวจสอบข้อสอบด้วยเทคนิค OMR (Optical Mark Recognition)

การตรวจสอบข้อสอบด้วยเทคนิค OMR เป็นกระบวนการตรวจจับและระบุตำแหน่งของการทำเครื่องหมาย (mark) บนกระดาษคำตอบแบบเลือกตอบ โดยทั่วไปใช้กระบวนการ การประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) เพื่อตรวจหาลักษณะของจุดที่ผู้เข้าสอบฝนลงไป [1] ซึ่งประกอบด้วย การตรวจจับความเข้มของพิกเซล (Pixel Intensity), การแยกวัตถุออกจากพื้นหลัง (Segmentation) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณของพื้นที่ที่ถูกฝน (Filled Region Analysis) ในเชิงคณิตศาสตร์ การตรวจจับการฝนสามารถอธิบายได้ด้วยการคำนวณค่า เฉลี่ยความเข้มของพิกเซล (Mean Intensity) ภายในบริเวณเป้าหมาย (ROI: Region of Interest) ดังนี้

$$I_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(x_i, y_i) \quad (2)$$

โดยที่ $I(x_i, y_i)$ คือค่าความเข้ม (intensity) ของพิกเซลที่ตำแหน่ง

(x_i, y_i) และ N คือจำนวนพิกเซลในบริเวณที่พิจารณา หากค่า I_{mean} ต่ำกว่าค่าความเข้มเกณฑ์ (threshold) ที่กำหนด ระบบจะพิจารณาว่าช่องนั้นถูกทำเครื่องหมายแล้ว

ความท้าทายสำคัญของระบบ OMR คือปัญหาการเอียงของแผ่นคำตอบ (skew) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสแกนหรือการถ่ายภาพ ซึ่งอาจทำให้ตำแหน่งช่องคำตอบคลาดเคลื่อนและกระทบความถูกต้องในการตรวจมาร์ก งานของ Gyamfi และ Missah (2017) ได้เสนอวิธีแก้ไขปัญหานี้โดยใช้ Standard Hough Transform (SHT) เพื่อค้นหาเส้นเชิงโครงสร้าง (structural lines) บนแบบฟอร์ม จากนั้นประมาณมุมเอียงของภาพและทำการหมุนกลับเพื่อให้แผ่นคำตอบอยู่ในแนวที่ถูกต้อง ผลลัพธ์แสดงว่าวิธีนี้สามารถแก้ปัญหาการเอียงได้อย่างมีประสิทธิภาพในระบบ OMR [13]

3.3 อัลกอริทึม K-Nearest Neighbor (K-NN)

อัลกอริทึม K-NN เป็นหนึ่งในเทคนิคการเรียนรู้แบบมีผู้สอน ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีโครงสร้างที่เข้าใจง่ายและไม่ต้องการสมมติฐานเชิงสถิติที่ซับซ้อน K-NN จัดอยู่ในกลุ่ม Instance-based Learning หรือ Lazy Learning กล่าวคือ แทนที่จะสร้างโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ขึ้นมา อัลกอริทึมนี้จะเก็บตัวอย่างข้อมูล (Training Data) ไว้ทั้งหมด และเมื่อมีข้อมูลใหม่เข้ามา จะทำการคำนวณความใกล้ชิด (Similarity) ระหว่างข้อมูลใหม่กับข้อมูลที่มีอยู่เพื่อทำการจำแนกคลาส [14] โดยทั่วไป ความใกล้ชิดระหว่างข้อมูลนิยามด้วย Euclidean Distance ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

โดยที่ $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ และ $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ คือเวกเตอร์ข้อมูลในมิติ n และ $d(x, y)$ คือระยะทางระหว่างข้อมูลสองจุด

เหตุผลที่เลือกใช้ระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean Distance) เนื่องจากเป็นระยะทางเชิงเรขาคณิตที่สะท้อน “ความใกล้เคียงเชิงปริภูมิ” ได้ตรงไปตรงมาที่สุด เหมาะกับข้อมูลเชิงภาพที่มีคุณลักษณะเป็นตัวเลขต่อเนื่อง เช่น ค่าเฉลี่ยความเข้ม (Mean Intensity) และความหนาแน่นของพิกเซล (Pixel Density) ซึ่งมีสเกลเดียวกัน นอกจากนี้ Euclidean Distance ยังสามารถวัดความแตกต่างของลักษณะภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนเชิงคำนวณต่ำกว่าเมตริกอื่น เช่น Manhattan หรือ Mahalanobis จึงเหมาะกับระบบที่ต้องประมวลผลจำนวนมากอย่างการตรวจข้อสอบอัตโนมัติ

หลังจากคำนวณระยะทางแล้ว K-NN จะเลือก k ตัวอย่างที่ใกล้ที่สุด (Nearest Neighbors) จากชุดข้อมูลฝึก (Training Set) และตัดสินผลการจำแนก (Classification) โดยการใช้ Voting Mechanism หรือการโหวตเสียงข้างมาก เช่น

$$\hat{y} = \arg \max_{c \in C} \sum_{i=1}^k I(y_i = c) \quad (4)$$

โดยที่ $\hat{y}$ คือ ผลลัพธ์ของการทำนาย หรือคลาสที่ถูกจำแนก (Classification)

$\arg \max_{c \in C}$ หมายถึง การหาค่า c ที่ทำให้ผลรวมของเทอมด้านหลังมีค่าสูงสุด โดย C คือเซตของคลาสทั้งหมดที่เป็นไปได้

$\sum_{i=1}^k I(y_i = c)$ คือ การนับจำนวนของ K-Nearest Neighbors ที่อยู่ในแต่ละคลาส c

k คือ จำนวนเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดที่กำหนดไว้

$I(y_i = c)$ คือ Indicator Function ซึ่งจะให้ค่าเป็น 1 ถ้าเพื่อนบ้านตัวที่ i อยู่ในคลาส c และให้ค่าเป็น 0 ถ้าไม่อยู่

ส่วนผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum of Squared Error: SSE) ถูกเลือกเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ K-Means เพราะสามารถวัด “ความกระจุกตัวของข้อมูลในคลัสเตอร์” ได้อย่างเป็นรูปธรรม ค่า SSE ยิ่งน้อยแสดงว่าข้อมูลแต่ละจุดอยู่ใกล้เซนทรอยด์มาก ทำให้กลุ่มมีความชัดเจนและแยกจากกันได้ดี การลดค่า SSE ซ้ำ ๆ ในแต่ละรอบจึงเป็นกลไกหลักที่ทำให้ K-Means สามารถหาการจัดกลุ่มที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของ K-NN ขึ้นอยู่กับการเลือกค่า k ที่เหมาะสม [15] หากเลือกค่า k เล็กเกินไป อาจทำให้โมเดลไวต่อ Noise (Overfitting) แต่หากเลือกค่า k ใหญ่เกินไป ก็อาจทำให้สูญเสียความแม่นยำ (Underfitting) เนื่องจากข้อมูลจากคลาสต่าง ๆ มาปะปนกัน [15] ดังนั้น การเลือกค่า k มักทำโดยการทดลอง (Cross Validation) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละชุดข้อมูลเฉพาะ [16]

3.4 อัลกอริทึม K-Means Clustering

อัลกอริทึม K-Means เป็นเทคนิคการจัดกลุ่มข้อมูล (Clustering) แบบไม่ต้องมีผู้สอน (Unsupervised Learning) ที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีโครงสร้างเรียบง่ายและคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็น k กลุ่ม และหาตำแหน่งศูนย์กลาง (Centroid) ของแต่ละกลุ่ม เพื่อให้ระยะห่างระหว่างข้อมูลและศูนย์กลางกลุ่มมีค่าน้อยที่สุด วัดได้จาก Sum of Squared Error (SSE) ดังสมการ [17], [18]

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - \mu_j\|^2 \quad (5)$$

โดยที่ $x_i^{(j)}$ แทนข้อมูลตัวอย่างลำดับที่ i ในคลัสเตอร์ที่ j

n_j คือ จำนวนสมาชิกในคลัสเตอร์ที่ j

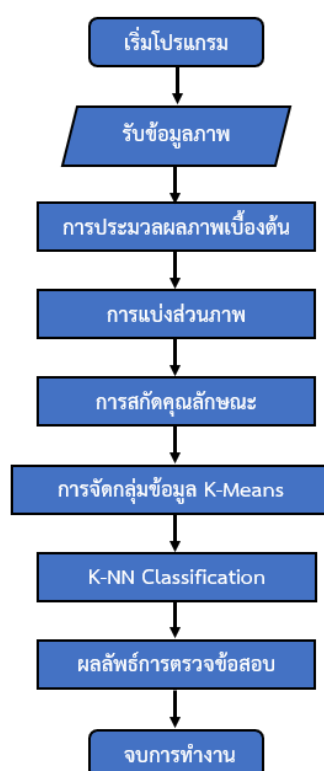
μ_j คือ เซนทรอยด์ของคลัสเตอร์ดังกล่าว

กระบวนการทำงานของ K-Means ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) กำหนดจำนวนคลัสเตอร์ k และเลือกเซนทรอยด์เริ่มต้น 2) จัดสรรข้อมูลเข้าสู่คลัสเตอร์ที่มีเซนทรอยด์ใกล้ที่สุดตามระยะทาง (เช่น Euclidean Distance) และ 3) คำนวณเซนทรอยด์ใหม่จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในคลัสเตอร์ และทำซ้ำขั้นตอนจนกว่าค่า SSE จะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญนอกจากนี้ K-Means ยังถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนเบื้องต้นเพื่อช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูล ก่อนการนำไปใช้กับอัลกอริทึมอื่น เช่น K-NN โดยการลดจำนวนจุดข้อมูลที่ต้องเปรียบเทียบ ทำให้การจำแนกประเภทมีความรวดเร็วขึ้น และสามารถเพิ่มความแม่นยำได้ในบางกรณี [19]

ในบริบทของงานวิจัยนี้ K-Means ไม่ได้ถูกใช้เป็นตัวจำแนกขั้นสุดท้าย แต่ถูกประยุกต์ใช้เพื่อเป็นขั้นตอนเบื้องต้นในลักษณะของ Pre-Classifier และ Feature Refiner โดย K-Means ทำหน้าที่จัดกลุ่มข้อมูลคุณลักษณะที่สกัดได้จากช่องคำตอบให้เป็นสองกลุ่ม (ฝน/ว่าง) เพื่อกำหนด Centroid ของแต่ละกลุ่ม จากนั้น Centroid เหล่านี้จะถูกใช้เป็นตัวแทนข้อมูลในการฝึกฝนโมเดล K-NN ในขั้นตอนถัดไป การทำงานร่วมกันตามลำดับขั้นนี้ก่อให้เกิด Hybrid Classification Pipeline (Ensemble-like System) ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูลคุณลักษณะก่อนเข้าสู่การจำแนกด้วย K-NN อันส่งผลให้ความแม่นยำและความเสถียรของระบบตรวจข้อสอบ OMR เพิ่มขึ้น

4. การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ถูกออกแบบให้มีลำดับขั้นตอนชัดเจนเพื่อพัฒนาระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติแบบ OMR โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับอัลกอริทึม K-Nearest Neighbor (K-NN) และ K-Means Clustering โดยสรุปกระบวนการทำงานสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก และมีภาพรวมกระบวนการทำงานของระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติดังแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพรวมกระบวนการทำงานของระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติ

รูปที่ 1 ภาพรวมกระบวนการทำงานของระบบตรวจข้อสอบอัตโนมัติ (System Overview Diagram) ซึ่งประกอบด้วย 7 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การรับภาพ (Input), การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing), การแบ่งส่วนภาพ (Segmentation), การสกัดคุณลักษณะ (Feature Extraction), การจัดกลุ่มข้อมูลเบื้องต้นด้วย K-Means, การจำแนกผลด้วย K-NN และการแสดงผลลัพธ์ (Output)

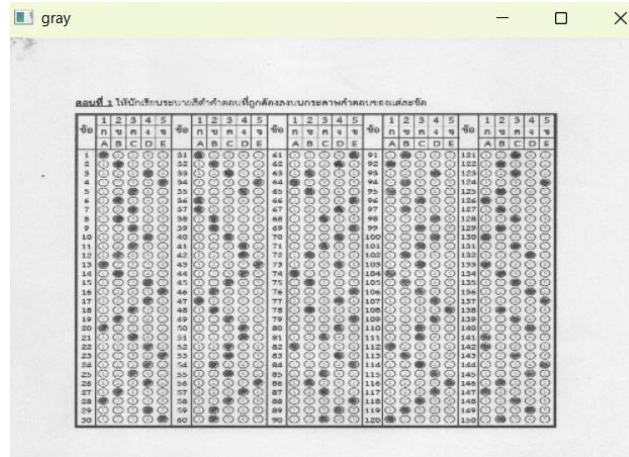
4.1 การได้มาซึ่งข้อมูล (Data Acquisition)

ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ได้มาจากการสร้างชุดกระดาษคำตอบจำลองจำนวน 100 ชุด ซึ่งออกแบบให้มีลักษณะใกล้เคียงกับกระดาษคำตอบมาตรฐานที่ใช้ในการสอบจริง โดยในแต่ละชุดจะมีตำแหน่งของช่องคำตอบและรูปแบบการจัดเรียงที่ชัดเจน เพื่อให้การประเมินผลมีความสมจริงมากที่สุด เพื่อลดความลำเอียง (Bias) ที่อาจเกิดขึ้นจากชุดข้อมูลจำลองและการฝนที่สม่ำเสมอเพียงรูปแบบเดียว ชุดข้อมูลทั้งหมดจึงถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองความหลากหลายของรูปแบบการฝนที่พบได้จริง (เช่น ฝนเข้ม ฝนอ่อน ฝนไม่เต็ม และรอยขีด)

กระดาษคำตอบทั้งหมดถูกนำเข้าสู่ระบบในรูปแบบดิจิทัลด้วยวิธีการ สแกนและการถ่ายภาพ โดยกำหนดความละเอียดที่ 300 dpi ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการตรวจจับร่องรอยการฝนดินสอ ทั้งในด้านความคมชัดและขนาด

ไฟล์ที่ไม่ใหญ่จนเกินไป ภาพที่ได้ถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบไฟล์มาตรฐาน เช่น JPEG หรือ PNG เพื่อความสะดวกในการประมวลผล

ข้อมูล Ground Truth ถูกกำหนดและตรวจสอบความถูกต้องซ้ำ (Double-Checked) โดย ผู้วิจัยเอง เพื่อให้มั่นใจว่าป้ายกำกับ (Labeling) ของข้อมูลทุกตัวอย่าง (ฝน/ว่าง) มีความแม่นยำและสอดคล้องกับคุณลักษณะทางภาพที่สกัดได้ ซึ่งเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนและทดสอบระบบในงานวิจัยนี้ ดังแสดงดังรูปที่ 2

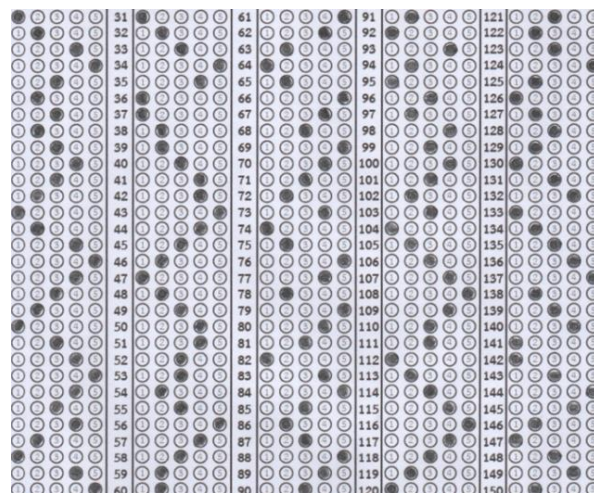


รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างกระดาษคำตอบที่ใช้ในการทดลอง

4.2 การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing)

ก่อนที่จะนำข้อมูลภาพเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนการประมวลผลภาพเบื้องต้น (Preprocessing) เพื่อปรับปรุงคุณภาพ ลดสัญญาณรบกวน และแก้ไขความผิดเพี้ยนที่อาจเกิดจากการสแกนหรือการถ่ายภาพ ขั้นตอนเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยเพิ่มความแม่นยำของการตรวจจับพื้นที่การฝนและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการจำแนกผลลัพธ์ โดยรายละเอียดมีดังนี้

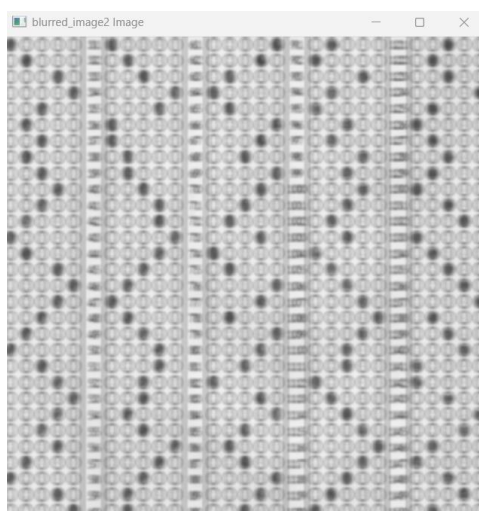
1) การแปลงภาพเป็นภาพระดับเทา (Grayscale Conversion) ภาพสีดั้งเดิมถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบ ภาพระดับเทา (8-bit grayscale) เพื่อทำให้การประมวลผลง่ายขึ้นและลดความซับซ้อน เนื่องจากการตรวจจับร่องรอยการฝนต้องการเพียงความเข้มของพิกเซลเป็นหลัก ดังแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างกระดาษคำตอบที่ภาพระดับเทา และการตัดกรอบเฉพาะคำตอบ

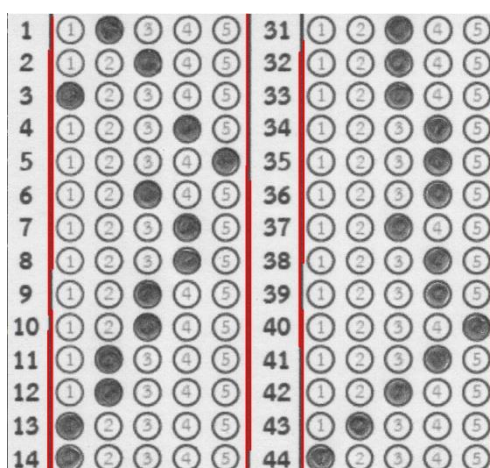
2) การปรับค่าความคมชัดและความสว่าง (Contrast & Brightness Adjustment) เพื่อให้ร่องรอยการฝนดินสอมีความแตกต่างจากพื้นหลังชัดเจน ภาพจะถูกปรับระดับความสว่างและความคมชัดอย่างเหมาะสม กระบวนการนี้ช่วยลดผลกระทบจากสภาพแวดล้อมการสแกนหรือการถ่าย เช่น แสงสว่างที่ไม่สม่ำเสมอ

3) การกำจัดสัญญาณรบกวนด้วย Gaussian Filter สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดจากกระบวนการดิจิทัลถูกลดทอนด้วย Gaussian Filter ซึ่งทำให้ภาพมีความเรียบเนียนขึ้น แต่ยังคงรายละเอียดที่สำคัญ เช่น ขอบของช่องคำตอบ ดังแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างกระดาษคำตอบที่ภาพเบลที่เกิดจากการใช้ Gaussian Filter

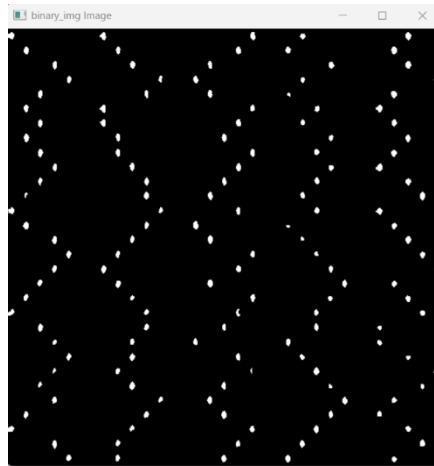
4) การแก้ความเอียง (Deskewing) กระดาษคำตอบบางชุดอาจเกิดการเอียงเล็กน้อยระหว่างการสแกนหรือถ่ายภาพ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงใช้วิธี Hough Transform [20] ในการตรวจจับเส้นตรง เช่น เส้นกรอบของกระดาษคำตอบ เพื่อนำมาคำนวณมุมเอียงและปรับภาพให้อยู่ในแนวระนาบที่ถูกต้อง กระบวนการนี้มีความสำคัญต่อการจัดตำแหน่งของช่องคำตอบให้ตรงกับตำแหน่งจริงในแม่แบบดังแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงผลการตรวจจับเส้นตรงจากกระดาษคำตอบ

4.3 การแบ่งส่วนภาพ (Segmentation)

เพื่อตรวจจับบริเวณช่องคำตอบ ระบบใช้วิธี Contour Detection ร่วมกับการตรวจหาตำแหน่งคงที่ของกระดาศ (Anchor Points) เพื่อแบ่งส่วนกระดาศออกเป็นช่อง ๆ ที่สอดคล้องกับตัวเลือก ก-ง การแบ่งส่วนนี้ช่วยให้สามารถตรวจสอบความเข้มของการฝนดินสอได้อย่างถูกต้อง [21] ดังแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ภาพหลังจากการแปลงภาพให้เป็นภาพทึบดำ-ขาว (Thresholding)

4.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะ (Feature Extraction)

หลังจากที่ได้ทำการประมวลผลภาพเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือ การวิเคราะห์คุณลักษณะ (Feature Extraction) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากคุณลักษณะที่ได้จะถูกใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลดิบจากช่องคำตอบ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการจำแนก (Classification) ด้วยอัลกอริทึมที่เลือกใช้ ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดคุณลักษณะหลัก (Features) ของแต่ละช่องคำตอบ ดังนี้

1) ค่าเฉลี่ยระดับความเข้ม (Mean Intensity) คำนวณจากค่าเฉลี่ยของพิกเซลในพื้นที่ช่องคำตอบ เพื่อบ่งบอกถึงความเข้มเฉลี่ยของการฝน หากผู้เข้าสอบฝนเข้ม ค่าเฉลี่ยจะมีค่าน้อย (เนื่องจากเป็นโทนมืด)

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (6)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเฉลี่ยระดับความเข้ม

I_i คือ ค่าความเข้มของพิกเซล

N คือ จำนวนพิกเซลทั้งหมด

2) ค่าความแปรปรวน (Variance) ใช้บ่งบอกถึงความแตกต่างของการฝนในพื้นที่เดียวกัน หากฝนไม่สม่ำเสมอ ค่าความแปรปรวนจะสูง แต่ถ้าฝนทึบและสม่ำเสมอ ค่าความแปรปรวนจะต่ำ

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu)^2 \quad (7)$$

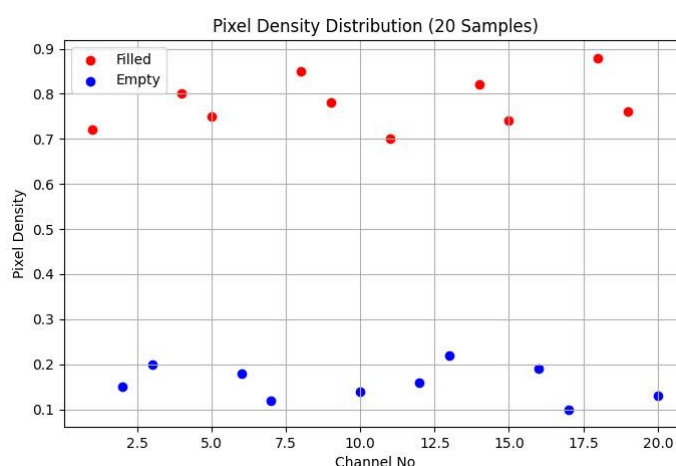
3) อัตราส่วนพื้นที่ที่ถูกฝน (Pixel Density) คำนวณจากอัตราส่วนจำนวนพิกเซลที่มีค่าน้อยกว่า Threshold (ถือว่าถูกฝน) ต่อพื้นที่ทั้งหมดของช่องคำตอบ ซึ่งใช้ในการบ่งบอกว่าช่องนั้นถูกฝนมากน้อยเพียงใด

$$D = \frac{N_{filled}}{N_{total}} \quad (8)$$

โดยที่ N_{filled} คือ จำนวนพิกเซลที่ถูกฝน
 N_{total} คือ ค่าจำนวนพิกเซลทั้งหมด

คุณลักษณะทั้งสามนี้จะถูกจัดเก็บในรูปของ เวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature Vector) สำหรับแต่ละช่องคำตอบ และถูกใช้เป็นอินพุตในอัลกอริทึม K-Nearest Neighbors (K-NN) และ K-Means Clustering เพื่อตรวจสอบและจำแนกผลลัพธ์การฝนในขั้นตอนต่อไป

จากข้อมูลค่า Mean Intensity ถ้า ว่าง (Ground Truth = 0) ค่าเฉลี่ยจะสูง (เช่น 150–200) เพราะช่องขาว ถ้า ฝน (Ground Truth = 1) ค่าเฉลี่ยจะต่ำ (เช่น 110–140) เพราะมีรอยดำ ค่า Variance ถ้า ว่าง → ความแปรปรวนต่ำ (เช่น 1500–2000) ถ้า ฝน → ความแปรปรวนสูง (เช่น 2100–2600) และค่า Pixel Density ถ้า ว่าง → ค่าต่ำ (เช่น 0.2–0.4) ถ้า ฝน → ค่าสูง (เช่น 0.55–0.8) คือค่า Ground Truth = 1 (ฝน) → Mean ต่ำ, Variance สูง, Density สูง และค่า Ground Truth = 0 (ว่าง) → Mean สูง, Variance ต่ำ, Density ต่ำ สามารถแสดงค่าตัวอย่างจำนวน 20 ค่า ดังแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลค่าตัวอย่างจำนวน 20 ค่า

แกน x (Channel No) หมายเลขลำดับของช่องคำตอบที่นำมาวิเคราะห์ ตั้งแต่ 1–20 ไม่ได้บอกตำแหน่งบนกระดาษ แต่เป็นดัชนีของตัวอย่างแต่ละช่อง แกน y (Pixel Density) ค่าความหนาแน่นของพิกเซลดำในช่องคำตอบ คำนวณเป็นสัดส่วน จำนวนพิกเซลที่ฝนหรือว่างหารด้วยจำนวนพิกเซลทั้งหมดในช่อง จึงเป็นค่ามิติไม่มีหน่วยอยู่ในช่วง [0,1] ค่ายิ่งสูงแปลว่า “ฝนทีบ/พื้นที่มีดมาก” สีของจุด ● แดง = Filled (Ground Truth = 1) จุดเหล่านี้กระจุกอยู่ช่วง ประมาณ 0.70–0.88 แสดงว่าแต่ละช่องมีพื้นที่มีดค่อนข้างมาก จึงตีความว่า “ฝน” และ ● น้ำเงิน = Empty (Ground Truth = 0) กระจุกอยู่ช่วง ประมาณ 0.10–0.22 สะท้อนว่าพื้นที่มีदन้อย เป็น “ว่าง” สรุปแล้วกราฟนี้แสดงให้เห็นชัดเจนว่า Pixel Density เป็นตัวแยก “ฝน/ว่าง” ที่มีพลังจำแนกสูงมากสำหรับชุดข้อมูลตัวอย่างนี้ โดยแกน x คือดัชนีช่องคำตอบ และแกน y คือสัดส่วนพิกเซลที่มีด (ค่ามาก = ฝน) เพื่อตอกย้ำความแตกต่างของลักษณะเชิงปริมาณดังกล่าว ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างค่าคุณลักษณะของช่องคำตอบจำนวน 20 ตัวอย่าง ที่ได้จากการบวนการสกัดคุณลักษณะของระบบ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงความแตกต่างระหว่างช่อง “ฝน” และ “ว่าง”

จากตารางจะเห็นได้ว่า ช่องคำตอบที่ “ว่าง” (Ground Truth = 0) มีค่า Mean Intensity สูงกว่า (≈ 170 – 190) และมี Variance ต่ำ (≈ 1500 – 1900) สอดคล้องกับลักษณะของพื้นที่สีขาวที่มีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ช่องที่ “ฝน” (Ground Truth = 1) มีค่า Mean ต่ำ (≈ 110 – 140), Variance สูง (≈ 2100 – 2600) และ Pixel Density สูง

($\approx 0.55-0.8$) ซึ่งสะท้อนถึงการมีรอยดำจำนวนมากจากการฝนคำตอบ ดังนั้นค่าคุณลักษณะทั้งสามจึงสามารถใช้แยกความแตกต่างระหว่างช่อง “ฝน” และ “ว่าง” ได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างค่าคุณลักษณะ (Feature Values) ของช่องคำตอบ

ลำดับ	Mean Intensity	Variance	Pixel Density	Ground Truth (ผลจริง)	หมายเหตุ
1	182	1650	0.32	0 (ว่าง)	ช่องว่าง พื้นขาวสม่ำเสมอ
2	176	1725	0.35	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
3	188	1600	0.28	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
4	193	1805	0.30	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
5	171	1900	0.38	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
6	136	2450	0.62	1 (ฝน)	มีรอยฝนเข้มชัดเจน
7	128	2320	0.70	1 (ฝน)	ฝนหนาแน่น
8	141	2180	0.55	1 (ฝน)	ฝนบางแต่สม่ำเสมอ
9	132	2540	0.74	1 (ฝน)	ฝนเข้ม
10	118	2600	0.78	1 (ฝน)	ฝนเข้มจัด
11	185	1700	0.33	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
12	191	1605	0.26	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
13	174	1950	0.37	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
14	120	2500	0.76	1 (ฝน)	ฝนชัด
15	135	2390	0.68	1 (ฝน)	ฝนหนา
16	126	2280	0.61	1 (ฝน)	ฝนปานกลาง
17	138	2205	0.59	1 (ฝน)	ฝนเรียบ
18	189	1650	0.34	0 (ว่าง)	ช่องว่าง
19	144	2160	0.58	1 (ฝน)	ฝนบาง
20	178	1850	0.31	0 (ว่าง)	ช่องว่าง

4.5 การจำแนกประเภท (Classification)

เพื่อให้ระบบสามารถระบุได้อย่างถูกต้องว่า "ช่องคำตอบ" ใดเป็นการ ฝน (Filled) หรือ ไม่ฝน (Empty) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการจำแนก (Classification) ที่ผสมกันระหว่าง K-NN และ K-Means ดังนี้

1) การจัดกลุ่มข้อมูลเบื้องต้นด้วย K-Means (Feature Refinement) [17] เพื่อให้การจำแนกด้วย K-NN ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและทนทานต่อความแปรปรวนของข้อมูลคุณลักษณะ (Feature Vector) ที่สกัดจากรอยฝนที่ไม่สม่ำเสมอ จึงมีการใช้ K-Means Clustering เป็นขั้นตอนจัดกลุ่มข้อมูลเบื้องต้น (Pre-Classifier) และทำหน้าที่เป็น Feature Refiner

การกำหนดจำนวนกลุ่ม (K)

K-Means เป็นวิธีการจัดกลุ่ม (Clustering) ที่มีแนวคิดหลักคือการแบ่งข้อมูลออกเป็น k กลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มมีจุดศูนย์กลาง (Centroid) ที่เป็นตัวแทนของข้อมูลในกลุ่มนั้น ระบบใช้ K-Means Clustering โดยกำหนด k เท่ากับ 2 ซึ่งสอดคล้องกับคลาสผลลัพธ์ที่ต้องการจำแนกคือ "ฝน" (Marked) และ "ว่าง" (Unmarked) โดย K-Means จะหาคำตอบโดยการลดค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function J) ให้น้อยที่สุด ดังแสดงในสมการที่ 9

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^{(j)} - \mu_j\|^2 \quad (9)$$

โดยที่ $x_i^{(j)}$ คือ ข้อมูลตัวที่ i ในกลุ่มที่ j

μ_j คือ จุดศูนย์กลาง (Centroid) ของกลุ่มที่ j

n_j คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่มที่ j

$k = 2$ คือ การบังคับให้ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ Cluster 1 $\rightarrow$ ฝน (Filled) และ Cluster 2 $\rightarrow$ ไม่ฝน (Empty)

การจัดกลุ่ม Feature Vector

ข้อมูลคุณลักษณะ (Feature Vector) ที่ได้จากหัวข้อ 4.4 ซึ่งมีความแปรปรวนสูงเนื่องจากรูปแบบการฝนที่แตกต่างกัน จะถูกนำเข้าสู่ K-Means เพื่อทำการจัดกลุ่มตามระยะทางแบบ Euclidean

การลดความแปรปรวน (Feature Refinement)

ผลลัพธ์จากการจัดกลุ่มคือ Centroid จำนวน 2 จุด โดยที่ Centroid เหล่านี้ทำหน้าที่เป็น ตัวแทนข้อมูลที่ได้รับการปรับปรุง (Refined Representation) ของคลาส "ฝน" และ "ว่าง" การใช้ Centroid แทนข้อมูลดิบที่มีความผันผวนสูง เป็นกลไกหลักที่ K-Means ทำหน้าที่เป็น Feature Refiner เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) และความแปรปรวนของข้อมูลก่อนนำเข้าสู่ขั้นตอนการจำแนกด้วย K-NN

2) การจำแนกขั้นสุดท้ายด้วย K-NN (Final Classification) [14] วิธีการ K-NN เป็นเทคนิคการจำแนกที่มีความเรียบง่ายแต่ทรงพลัง โดยมีแนวคิดหลักคือ ถ้าตัวอย่างใหม่มีลักษณะคล้ายกับกลุ่มข้อมูลใดมากที่สุด ก็ให้จัดอยู่ในกลุ่มนั้น ในงานวิจัยนี้ K-NN ถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนการจำแนกขั้นสุดท้าย (Final Classifier) โดยทำงานร่วมกับ Centroid ที่ปรับปรุงแล้วจาก K-Means ดังนี้

การสร้างชุดข้อมูลฝึกฝน (Training Set)

Centroid ทั้ง 2 จุด ที่ได้จาก K-Means ในขั้นตอน 4.5.1 จะถูกใช้เป็น ชุดข้อมูลฝึกฝนใหม่สำหรับ K-NN แทนข้อมูลฝึกฝนดั้งเดิมทั้งหมด (15,000 ตัวอย่าง) การใช้ Centroid ช่วยลดขนาดของชุดฝึกฝน และลดความแปรปรวนของข้อมูลได้อย่างมีนัยสำคัญ

การจำแนกผลคำตอบ

เมื่อมีตัวอย่างใหม่ (เช่น Feature Vector ของช่องคำตอบในชุดทดสอบ) เข้ามา โมเดล K-NN จะทำการคำนวณระยะทาง (Distance Metric) ระหว่างข้อมูลใหม่นี้กับ Centroid ที่เป็นตัวแทนคลาสในชุดฝึกฝน ระยะทางที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Euclidean Distance ซึ่งเป็นระยะทางแบบเส้นตรงใน n มิติ ดังแสดงในสมการที่ 10

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

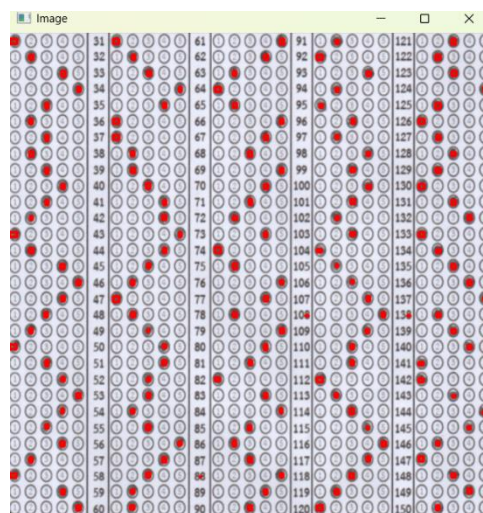
โดยที่ x_i คือ คุณลักษณะที่ i ของข้อมูลใหม่

y_i คือ คุณลักษณะที่ i ของข้อมูลในชุดฝึก
 n คือ จำนวนคุณลักษณะที่ใช้เปรียบเทียบ

การตัดสินใจขั้นสุดท้าย

ค่า k ที่เลือกใช้ในที่นี่จะถูกกำหนดจากผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุด โดย K-NN จะพิจารณา Centroid ที่ใกล้ที่สุด k ตัว แล้วใช้หลักการ “เสียงข้างมาก” เพื่อกำหนดว่าข้อมูลใหม่นั้นเป็น “ฝน” (Marked) หรือ “ว่าง” (Unmarked) การเชื่อมโยงข้อมูล Centroid จาก K-Means มาเป็นตัวแทนคลาสใน K-NN นี้เอง ที่ช่วยให้การจำแนกมีความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ระบบนี้แตกต่างจากการใช้ K-NN หรือ K-Means เพียงอย่างเดียว อันนำมาซึ่งประสิทธิภาพและความเสถียรที่เพิ่มขึ้น

การจำแนกประเภทในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิค K-NN และ K-Means Clustering ร่วมกันในลักษณะนี้เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบแบบฝน โดย K-Means ทำหน้าที่เป็น Feature Refiner จัดกลุ่มข้อมูลคุณลักษณะออกเป็นสองกลุ่มหลัก (ฝน/ไม่ฝน) เพื่อลดข้อมูลรบกวน (Noise) และปรับโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้น จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้ (Centroid) จะถูกส่งต่อให้ K-NN ทำการจำแนกขั้นสุดท้าย การผสมผสานทั้งสองเทคนิคช่วยให้การตัดสินใจรวดเร็วขึ้น และมีความถูกต้องสูง เหมาะสำหรับระบบตรวจสอบอัตโนมัติที่ต้องการความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพสูง กระบวนการจำแนกเริ่มจาก K-Means ทำหน้าที่จัดกลุ่มข้อมูลเพื่อลด noise และปรับโครงสร้างข้อมูลเบื้องต้น จากนั้นผลลัพธ์ถูกส่งต่อให้ K-NN ทำการจำแนกขั้นสุดท้าย ดังแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การจำแนกประเภท ด้วย K-Nearest Neighbor (K-NN) และ K-Means Clustering

5. ผลการวิจัย

โดยระบบพัฒนาและทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ CPU AMD Ryzen 7 4800H with Radeon Graphics ความเร็วพื้นฐาน 2.90 GHz, RAM 16 GB, ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Home Single Language (64-bit operating system, x64-based processor) และใช้ไลบรารี OpenCV 4.8 และ scikit-learn 1.4 การทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดสอบระบบตรวจสอบอัตโนมัติด้วยชุดข้อมูลจำลองจำนวน 100 ชุดข้อมูล โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง การใช้ K-NN เพียงอย่างเดียว และการผสมผสานเทคนิค K-Means ร่วมกับ K-NN การปรับพารามิเตอร์ของระบบใช้ grid search เพื่อหาค่า k ที่เหมาะสมที่สุด และทดลองเปรียบเทียบระยะทาง Euclidean, Manhattan, และ Minkowski โดยพบว่า Euclidean ให้ผลดีที่สุดเมื่อใช้ normalization แบบ Min-Max scaling นอกจากนี้ K-Means ใช้วิธี initialization แบบ k-means++ เพื่อลดปัญหา local minima

เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ครอบคลุมและสามารถอธิบายกระบวนการทำงานของระบบได้อย่างครบถ้วน การนำเสนอผลการวิจัยในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1) การวิเคราะห์คุณลักษณะ (Feature Extraction) อธิบายขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะจากภาพช่องคำตอบ เช่น ค่า Mean Intensity, Variance และ Pixel Density เพื่อใช้ในการจำแนกว่าช่องนั้นเป็น “ฝน” หรือ “ว่าง”

2) การวิเคราะห์ผล (Result Analysis) แสดงผลการคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของความแม่นยำในการจำแนก รวมถึงเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น เช่น SVM และ Decision Tree เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการผสมผสาน K-Means กับ K-NN

3) Confusion Matrix นำเสนอผลการจำแนกในเชิงลึก แสดงจำนวนตัวอย่างที่ระบบจำแนกถูกต้องและผิดพลาด รวมถึงคำนวณตัวชี้วัด Accuracy, Precision, Recall และ F1-score เพื่อประเมินความสามารถของระบบในมิติต่าง ๆ

5.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะ (Feature Extraction)

การประเมินผลใช้ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) เป็นเกณฑ์วัดประสิทธิภาพ ซึ่งคำนวณดังแสดงดังสมการที่

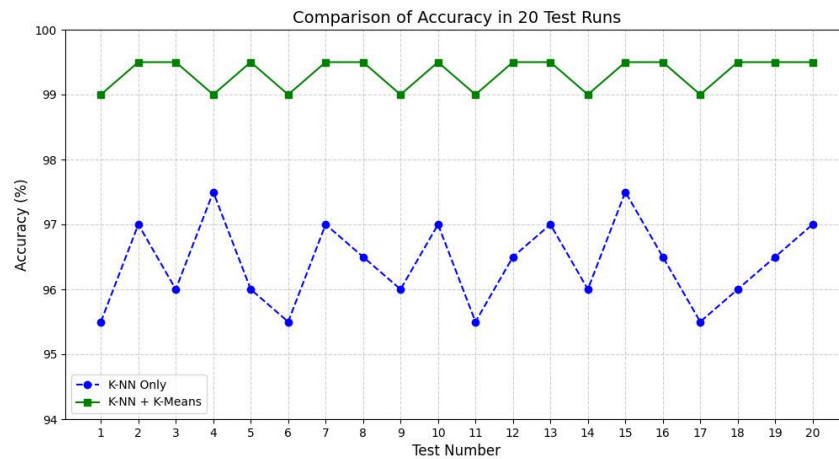
11

$$Accuracy = \frac{\text{จำนวนคำตอบที่ตรงถูกต้อง}}{\text{จำนวนคำตอบทั้งหมด}} \times 100 \quad (11)$$

ได้ทำการทดสอบซ้ำ 20 ครั้ง เพื่อลดอคติจากการสุ่มและเพื่อให้ได้ค่าที่สะท้อนประสิทธิภาพของระบบจริง ตารางต่อไปนี้จะแสดงผลการทดสอบในแต่ละครั้งตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางผลการทดลอง (20 ครั้ง)

Test No.	K-NN Only (%)	K-NN + K-Means (%)
1	95.5	99.0
2	97.0	99.5
3	96.0	99.5
4	97.5	99.0
5	96.0	99.5
6	95.5	99.0
7	97.0	99.5
8	96.5	99.5
9	96.0	99.0
10	97.0	99.5
11	95.5	99.0
12	96.5	99.5
13	97.0	99.5
14	96.0	99.0
15	97.5	99.5
16	96.5	99.5
17	95.5	99.0
18	96.0	99.5
19	96.5	99.5
20	97.0	99.5



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลจากค่าทดลอง (20 ครั้ง)

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่าค่า Accuracy ของ K-NN อย่างเดียว (เส้นสีน้ำเงิน) อยู่ในช่วงประมาณ 95.5% – 97.5% ค่ามีความผันผวนสูงกว่าการใช้ร่วมกับ K-Means บางครั้งค่า Accuracy ต่ำกว่า 96% แสดงถึงความไม่เสถียร ค่า Accuracy ของ K-NN + K-Means (เส้นสีเขียว) อยู่ในช่วงประมาณ 99% – 99.5% กราฟค่อนข้างนิ่งและเสถียรมากกว่า K-NN อย่างเดียว ค่ามีการแกว่งเพียงเล็กน้อย (0.5%) เท่านั้น การเปรียบเทียบ วิธี K-NN + K-Means ให้ค่า Accuracy สูงกว่าและเสถียรมากกว่า K-NN อย่างเดียวในทุกการทดลอง และเส้นกราฟสีเขียวแทบจะ “แบนเรียบ” ใกล้ 100% ขณะที่เส้นกราฟสีน้ำเงินแกว่งขึ้นลงชัดเจน

5.2 การวิเคราะห์ผล

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการจำแนก 4 วิธี ได้แก่ K-NN เพียงอย่างเดียว, Support Vector Machine (SVM), Decision Tree และการผสมผสาน K-Means กับ K-NN พบว่าค่าเฉลี่ยความถูกต้อง (Accuracy) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) ของแต่ละวิธีแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางการวิเคราะห์ผล		
วิธีการ	ค่าเฉลี่ย Accuracy (%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
K-NN เพียงอย่างเดียว	96.45	0.61
SVM	96.80	0.45
Decision Tree	97.30	0.69
K-Means + K-NN	99.30	0.23

เพื่อยืนยันความเหมาะสมของการใช้ K-NN + K-Means งานวิจัยได้ทดลองเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม SVM และ Decision Tree ซึ่งพบว่าความแม่นยำของทั้งสองเทคนิคอยู่ที่ 96.8% และ 97.3% ตามลำดับ ต่ำกว่าการผสมผสาน K-NN + K-Means ที่ให้ค่า Accuracy เฉลี่ย 99.3% จึงยืนยันถึงความเหมาะสมของเทคนิคที่นำเสนอ

5.3 Confusion Matrix

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย 100 แผ่นกระดาษคำตอบ แต่ละแผ่นมี 150 ช่องคำตอบ รวมเป็น 15,000 ตัวอย่าง (bubbles) ข้อมูลถูกแบ่งเป็น ชุดฝึก (Training) 80% และ ชุดทดสอบ (Test) 20% ซึ่งเท่ากับ 3,000 ตัวอย่าง ในชุดทดสอบ สำหรับการประเมินตัวชี้วัด ได้สมมติสัดส่วนคลาสในชุดทดสอบเป็น Filled (Positive) = 30% (900 ตัวอย่าง) และ Empty (Negative) = 70% (2,100 ตัวอย่าง) ทั้งนี้ การประเมินผลวัดด้วยตัวชี้วัดเพิ่มเติม ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall และ F1-score ดังนี้

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (12)$$

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (13)$$

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (14)$$

$$F1\ score = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision+Recall)} \quad (15)$$

โดยที่ TP (True Positive) คือ จำนวนช่องที่ระบบจำแนกเป็น “ฝน” และตรงกับคำตอบจริง

FP (False Positive) คือ จำนวนช่องที่ระบบจำแนกผิดว่า “ฝน” ทั้งที่จริงเป็น “ว่าง”

FN (False Negative) คือ จำนวนช่องที่ระบบจำแนกผิดว่า “ว่าง” ทั้งที่จริงเป็น “ฝน”

TN (True Negative) คือ จำนวนช่องที่ระบบจำแนกเป็น “ว่าง” และตรงกับคำตอบจริง

เวลาเฉลี่ยในการประมวลผลของระบบอยู่ที่ 0.18 วินาทีต่อกระดาษคำตอบหนึ่งแผ่น ซึ่งเร็วกว่าระบบตรวจแบบเดิมที่ใช้เวลาประมาณ 0.75 วินาทีต่อแผ่น แสดงถึงความคุ้มค่าทางประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4 Confusion Matrix

Model	TP	FP	FN	TN	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
K-NN only	829	35	71	2,065	96.47	95.95	92.11	93.99
SVM	852	22	48	2,078	97.67	97.49	94.66	96.06
Decision Tree	864	30	36	2070	97.80	96.65	96.0	96.32
K-Means + K-NN	887	8	13	2,092	99.30	99.11	98.56	98.83

6. สรุป

จากผลการทดลองการตรวจข้อสอบอัตโนมัติด้วยเทคนิค K-NN เพียงอย่างเดียว และการผสานร่วมกับ K-Means สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ประสิทธิภาพของ K-NN เพียงอย่างเดียว ค่า Accuracy โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 96.5% มีความผันผวน (Variance) ค่อนข้างมาก โดยค่าที่ได้ในการทดลองแต่ละครั้งมีการแกว่งตัวในช่วง 95.5% – 97.5% ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) อยู่ในระดับที่สูงกว่าวิธีการที่ใช้ K-Means ร่วมด้วย สะท้อนให้เห็นถึงความไม่เสถียรของการจำแนกข้อมูล

2) ประสิทธิภาพของ K-NN + K-Means ค่า Accuracy โดยเฉลี่ยสูงถึง 99.5% ค่าผลลัพธ์มีความสม่ำเสมอและเสถียรมาก โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 99.0% – 99.5% ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) มีค่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้ช่วยลดความไม่แน่นอนในการจำแนกคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) SVM ให้ผลลัพธ์ค่อนข้างดี (Accuracy $\approx$ 97.7%) แต่ใช้เวลา training สูงกว่า และไวต่อการเลือก kernel

4) Decision Tree มี Accuracy ใกล้เคียง SVM ($\approx$ 97.8%) แต่มีแนวโน้ม overfitting บางกรณี

5) K-NN + K-Means ยังคงให้ผลดีที่สุดในด้าน Accuracy และเสถียรภาพ (ค่า Precision และ Recall สมดุลสูงสุด) ยืนยันว่าแนวทาง “K-Means ลด noise แล้วส่งต่อให้ K-NN จำแนก” มีความเหมาะสมที่สุดกับลักษณะข้อมูลภาพ OMR

6) การเปรียบเทียบทั้งสองวิธี การเพิ่มกระบวนการ K-Means เพื่อจัดกลุ่มข้อมูลเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ K-NN ช่วยให้โมเดลมีความแม่นยำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 96.5% เพิ่มขึ้นเป็น 99.5% นอกจากนี้ยังช่วยลดความผันผวนของผลลัพธ์ได้มาก ทำให้การตรวจสอบแบบ OMR มีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น

7) ข้อสรุปสำคัญ การผสานเทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลร่วมกับ K-Means และ K-NN สามารถยกระดับความถูกต้องในการตรวจสอบอัตโนมัติให้ใกล้เคียง 100% ได้ แสดงให้เห็นว่า K-Means มีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงความถูกต้องและความเสถียรของการทำงานของ K-NN ดังนั้น วิธีการที่นำเสนอจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงในการตรวจสอบแบบฝน OMR ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้

7.1) คุณูปการหลัก ในการนำเสนอและพิสูจน์ประสิทธิภาพของการจำแนกแบบลูกผสมในงาน OMR โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ K-Means ในฐานะ Feature Refiner และ K-NN ในฐานะ Final Classifier ซึ่งเป็นการผสานจุดแข็งของทั้งสองเทคนิคเพื่อแก้ไขช่องว่างที่งานวิจัยก่อนหน้านี้เน้นการใช้เทคนิคเหล่านี้แยกกัน โดยแสดงให้เห็นว่าแนวทางนี้สามารถให้ผลลัพธ์ด้านความถูกต้องและเสถียรภาพที่เหนือกว่าเทคนิคอื่นที่ซับซ้อนกว่าอย่าง SVM และ Decision Tree

7.2) ระบบ OMR ที่พัฒนาขึ้นมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากสามารถประมวลผลกระดาษคำตอบที่พิมพ์บนกระดาษธรรมดาได้ โดยไม่ต้องพึ่งพาฟอร์ม OMR เฉพาะที่มีราคาสูง นับสำคัญที่สำคัญคือการลดต้นทุนการดำเนินงานของสถาบันการศึกษา และการเพิ่มความเข้าถึงและความน่าเชื่อถือของกระบวนการวัดผล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดความผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจด้วยแรงงานคนหรือระบบ OMR แบบดั้งเดิมที่ขาดความยืดหยุ่นต่อความไม่สม่ำเสมอของรอยฝน

7. ข้อเสนอแนะ

เพื่อยกระดับความถูกต้อง ความเสถียร และความพร้อมใช้งานของระบบตรวจสอบแบบฝน OMR ที่พัฒนาด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับ K-Means และ K-NN ข้อเสนอแนะต่อไปนี้จะครอบคลุมทั้งเชิงเทคนิค เชิงการประเมินผล และเชิงระบบจริงดังนี้

1) การเลือกพารามิเตอร์อย่างเป็นระบบ ปรับค่า k ของทั้ง K-Means และ K-NN ด้วย grid search + k-fold cross-validation (เช่น k=5 หรือ 10) แทนการกำหนดค่าคงที่ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลจริง ทดลอง ระยะเวลาสำหรับ K-NN (Euclidean, Manhattan, Mahalanobis) หลังจาก ปรับสเกลคุณลักษณะ (standardization/Min-Max) เพื่อหลีกเลี่ยงอคติจากสเกลที่ต่างกัน และใช้ k-means++ initialization และ multiple restarts สำหรับ K-Means เพื่อลดโอกาสติดค่าสุดโต่ง (local minima) และประเมินคุณภาพคลัสเตอร์ด้วย Silhouette score

2) จากผลการทดลองพบว่า การประยุกต์ใช้ K-Means ร่วมกับ K-NN ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้ K-NN เพียงอย่างเดียว ดังนั้นควรนำแนวทางนี้ไปประยุกต์กับข้อมูลลักษณะอื่น ๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงการปรับจำนวนกลุ่มให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความทั่วไปของแบบจำลองในอนาคต

3) ข้อจำกัดของงานวิจัยนี้คือ ขนาดข้อมูลค่อนข้างเล็กและใช้ภาพจำลองภายใต้สภาพแสงคงที่ ทำให้ยังไม่สามารถยืนยันความเสถียรเมื่อใช้ในสภาพแวดล้อมจริงที่แสงแตกต่างกันได้

4) ระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบของสถานศึกษาในระดับโรงเรียนหรือมหาวิทยาลัย รวมถึงใช้ในระบบการประเมินออนไลน์ที่รับภาพกระดาษคำตอบจากกล้องหรือสมาร์ตโฟนได้

5) ในอนาคต ควรพัฒนาโมเดลเชิงลึก (Deep Learning) เช่น Convolutional Neural Networks (CNN) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกช่องคำตอบ และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับเทคนิคแบบดั้งเดิมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงต่อ คณะกรรมการวิจัยโรงเรียนนายเรือ และ กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ กองทัพเรือ ที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกด้านอุปกรณ์ และสถานที่สำหรับการวิจัย จนทำให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่นและบรรลุผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] E.M. de Elias, P. M. Tasinafo, and R. Hirata Jr, “Optical mark recognition: Advances, difficulties, and limitations,” *SN Computer Science*, vol. 2, Jul. 2021, Art. no. 367, doi: 10.1007/s42979-021-00760-z.
- [2] T. V. Ha and N. T. Thu, “An application of image processing in optical mark recognition,” *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 864–871, Dec. 2020, doi: 10.31817/vjas.2020.3.4.09.
- [3] Z. Küçükkara and A. E. Tümer, “An image processing oriented optical mark recognition and evaluation system,” *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers (IJAMEC)*, vol. 6, no. 4, pp. 59–64, Dec. 2018. [Online]. Available: <https://ijamec.org/index.php/ijamec/article/view/261>
- [4] S. Ravindra, “Automated OMR analyser using ML and image processing,” *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 13, no. 6, pp. 1843–1845, Jun. 2025, doi: 10.22214/ijraset.2025.72535.
- [5] B. Lu, “Research and application of digit recognition based on K-nearest neighbor classifier,” in *Proceedings of the 2023 International Conference on Data Science, Advanced Algorithm and Intelligent Computing (DAI 2023)*, Xi'an, China, Nov. 24–26, 2024, pp. 36–42, doi: 10.2991/978-94-6463-370-2_5.
- [6] Y. Hernández-Mier, M. A. Nuño-Maganda, S. Polanco-Martagón, G. Acosta-Villarreal, and R. Posada-Gómez, “Unsupervised optical mark recognition on answer sheets for massive printed multiple choice tests,” *Journal of Imaging*, vol. 11, no. 9, 2025, Art. no. 308, doi: 10.3390/jimaging11090308.
- [7] P. Surlakar, S. Araujo, and K. Meenakshi Sundaram, “Comparative analysis of K-Means and K-Nearest neighbor image segmentation techniques,” in *Proc. 2016 IEEE 6th International Conference on Advanced Computing (IACC)*, Bhimavaram, India, Feb. 27–28, 2016, pp. 96–100, doi: 10.1109/IACC.2016.27.
- [8] J. Memon, M. Sami, R. A. Khan, and M. Uddin, “Handwritten optical character recognition (OCR): A comprehensive systematic literature review (SLR),” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 142642–142668, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012542.
- [9] Y. Sancar, U. Yavuz, and I. K. Aksakalli, “Personal mark density-based high-performance Optical Mark Recognition (OMR) system using K-means clustering algorithm,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 84, pp. 24671–24703, Sep. 2024, doi: 10.1007/s11042-024-20218-7.
- [10] S. Singh, N. k. Garg, and M. Kumar “Feature extraction and classification techniques for handwritten character recognition: A survey,” *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, pp. 745–775, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11042-022-13318-9.
- [11] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. NY, USA: Pearson, 2018.
- [12] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?>

tp=&arnumber=4310076

- [13] E. O. Gyamfi and Y. M. Missah, "Pixel-based unsupervised classification approach for information detection on optical markup recognition sheet," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, vol. 2, no. 4, pp. 121–132, 2017, doi: 10.25046/aj020417.
- [14] T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, Jan. 1967, doi: 10.1109/TIT.1967.1053964.
- [15] G. Guo, H. Wang, D. Bell, Y. Bi, and K. Greer, "KNN model-based approach in classification," in *On the Move to Meaningful Internet Systems 2003: CoopIS, DOA, and ODBASE. OTM 2003. Lecture Notes in Computer Science*, R. Meersman, Z. Tari, and D. C. Schmidt, Eds., 2003, Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, doi: 10.1007/978-3-540-39964-3_62.
- [16] M. L. Zhang and Z. H. Zhou, "ML-KNN: A lazy learning approach to multi-label learning," *Pattern Recognition and Artificial Intelligence.*, vol. 40, no. 7, pp. 2038–2048, 2007, doi: 10.1016/j.patcog.2006.12.019.
- [17] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in *Proc. 5th Berkeley Symp. Math. Stat. Probab.*, 1967, pp. 281–297. [Online]. Available: <https://scispace.com/pdf/some-methods-for-classification-and-analysis-of-multivariate-4pswti19oz.pdf>
- [18] S. P. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 28, no. 2, pp. 129–137, Mar. 1982, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [19] X. Wu *et al.*, "Top 10 algorithms in data mining," *Knowl. Inf. Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–37, 2008, doi: 10.1007/s10115-007-0114-2.
- [20] R. O. Duda and P. E. Hart, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures," *Commun. ACM*, vol. 15, no. 1, pp. 11–15, Jan. 1972, doi: 10.1145/361237.361242.
- [21] S. Suzuki and K. Abe, "Topological structural analysis of digitized binary images by border following," *Computer Vision Graphics and Image Processing*, vol. 30, no. 1, pp. 32–46, Apr. 1985, doi: 10.1016/0734-189X(85)90016-7.

การพัฒนาระบบคัดแยกขยะพลาสติกอัจฉริยะ Development of An Intelligent Classification of Plastic Waste System

พัชรภา ชมพิพัฒน์¹ และ ปานิสรา หาดขุนทด^{1*}

¹สาขาวิชาวิทยาการข้อมูลและการจัดการสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

Patcharapa Chompipat¹ and Panisara Hadkhuntod^{1*}

¹Department of Data Science and Information Management, Faculty of Science and Technology

Corresponding Author Email : panisara.h@psru.ac.th

Received 01 September 2025

Revised 07 January 2026

Accepted 28 January 2026

บทคัดย่อ

ขยะพลาสติกเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมรุนแรงในประเทศไทย คิดเป็นร้อยละ 12 ของขยะทั้งหมด แต่มีการนำกลับมาใช้เพียงร้อยละ 25 การคัดแยกด้วยมือจึงมีข้อจำกัดและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย งานวิจัยนี้นำ YOLOv11 โมเดลตรวจจับวัตถุเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำและรวดเร็วสูงกว่ารุ่นก่อนหน้า มาประยุกต์ใช้ในการคัดแยกขยะพลาสติก 4 ประเภทหลัก ได้แก่ HDPE, PET, PP และ PS พร้อมพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันด้วย Flask เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจจับและจำแนกขยะได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำ

ผลการทดสอบพบว่าโมเดลสามารถคัดแยกขยะพลาสติก 4 ประเภท (HDPE, PET, PP, PS) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยเฉลี่ยมีเวลาแฝง (Latency) 22 ms ต่อภาพ และความเร็วในการประมวลผล 55 FPS เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการจำแนกตามประเภทพลาสติก พบว่า PET มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) สูงสุด 0.994 และค่าความแม่นยำ (Precision) สูงสุด 0.999 ตามด้วย HDPE ที่ Accuracy 0.983, Precision 0.958 ส่วน PP และ PS มี Accuracy 0.958 และ 0.976, Precision 0.943 และ 0.971 ตามลำดับ สำหรับการเรียกคืน (Recall) HDPE มีค่า 1.0, PET 0.97, PP 0.898 และ PS 0.918 ส่วน F1-score ของ PET และ HDPE สูงสุดที่ 0.984 และ 0.978 ตามลำดับ ขณะที่ PS และ PP มีค่า 0.944 และ 0.92 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถจำแนกขยะประเภท PET และ HDPE ได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ ระบบนี้สามารถต่อยอดใช้งานจริงในโรงคัดแยกขยะหรือจุดรับรีไซเคิล ร่วมกับอุปกรณ์ IoT เช่น แขนกลอัตโนมัติหรือสายพานลำเลียง เพื่อแยกขยะแบบเรียลไทม์ ลดการพึ่งพาแรงงานคน และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะอย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: คัดแยกขยะ, พลาสติก, อัจฉริยะ

Abstract

Plastic waste is a severe environmental issue in Thailand, accounting for 12% of total waste, yet only 25% is recycled. Manual classification is therefore limited and prone to errors. This study applied YOLOv11, a real-time object detection model with higher accuracy and speed than its predecessors, to the classification of four major types of plastic waste: HDPE, PET, PP, and PS. A web application was developed using Flask to enable users to detect and classify plastic waste conveniently, rapidly, and accurately.

The experimental results indicated that the YOLOv11 model can effectively classify four types of plastic waste (HDPE, PET, PP, and PS), achieving an average latency of 22 ms per image and a processing speed of 55 FPS. Evaluating the classification performance by plastic type, PET achieved the highest accuracy of 0.994 and precision of 0.999, followed by HDPE with an accuracy of 0.983 and precision of 0.958. PP and PS recorded accuracies of 0.958 and 0.976, and precisions of 0.943 and 0.971, respectively. In terms of recall, HDPE reached 1.0, PET 0.97, PP 0.898, and PS 0.918. The F1-scores of PET and HDPE were the highest at 0.984 and 0.978, while PS and PP achieved 0.944 and 0.92, respectively. These results demonstrated that the model can reliably and accurately classify PET and HDPE waste. The system was suitable for practical deployment in waste sorting facilities or recycling centers, integrated with IoT devices such as robotic arms or conveyor belts, enabling real-time waste separation, reducing reliance on manual labor, and enhancing overall waste management efficiency.

Keywords: Waste Sorting, Plastic, Intelligent

1. บทนำ

ปัญหาขยะและการจัดการขยะเป็นประเด็นสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงในหลายประเทศ โดยเฉพาะเมืองใหญ่ที่มีการเติบโตทางเศรษฐกิจ ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยรวมประมาณ 26.95 ล้านตันต่อปี หรือเฉลี่ย 73,840 ตันต่อวัน ปริมาณขยะเพิ่มขึ้นราวร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับปี 2565 ขณะที่ขยะที่ถูกนำกลับมาใช้ประโยชน์มีเพียง 9.31 ล้านตัน ขยะพลาสติกคิดเป็นร้อยละ 12 ของขยะทั้งหมดหรือประมาณ 2 ล้านตันต่อปี และส่วนใหญ่เป็นพลาสติกใช้ครั้งเดียว เช่น ถัง แก้ว หลอด และกล่องโฟม ซึ่งส่วนใหญ่ไม่ได้ถูกนำกลับมารีไซเคิล ส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง และสร้างความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพประชาชน [1], [2]

การคัดแยกขยะพลาสติกเป็นขั้นตอนสำคัญในการรีไซเคิลเพื่อลดปริมาณขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลาสติกแต่ละประเภทมีคุณสมบัติและวิธีการรีไซเคิลที่แตกต่างกัน การจำแนกที่ไม่ถูกต้องจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการรีไซเคิลและทำให้เกิดมลพิษ ขณะเดียวกัน การคัดแยกด้วยมือมีข้อจำกัดและเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย การพัฒนาระบบคัดแยกที่แม่นยำและรวดเร็วจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการจัดการขยะอย่างยั่งยืน

งานวิจัยหลายชิ้นได้นำเทคโนโลยี YOLO (You Only Look Once) มาใช้ในการตรวจจับและจำแนกวัตถุ งานวิจัยของ ธนโชติ ภาชนะนัย และคณะ [3] พัฒนาเครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลที่จำแนกขยะ 4 ประเภทด้วยความแม่นยำสูงถึง 98.33% ส่วนงานของ สุขสันต์ พรหมบุญเรือง และคณะ [4] เปรียบเทียบโมเดล YOLOv5s, YOLOv5m และ YOLOv5x พบว่า YOLOv5x มีค่า mAP 0.417 และ Precision 0.911 ซึ่งสูงสุดในกลุ่ม YOLOv5 นอกจากนี้ ปาณิสรา หาดขุนทด และคณะ [5] ใช้ YOLOv8 ในการคัดแยกพันธุ์มะขามหวานจากภาพ 3,000 ภาพ มีค่า mAP 0.84, Precision 1.0, Recall 0.89 และ F1-Score 0.85 ระบบสามารถประมวลผลได้ 7.28 เฟรมต่อวินาทีและทำงานร่วมกับเว็บแอปพลิเคชัน Flask แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยี YOLO สามารถปรับใช้ในงานตรวจจับและจำแนกวัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับ YOLOv11 กับโมเดลตรวจจับวัตถุรุ่นก่อนหน้าและรุ่นอื่น พบว่า YOLOv11 มีความโดดเด่นทั้งด้านความแม่นยำและความเร็ว แสดงถึงการปรับปรุงโครงสร้างโมเดลและประสิทธิภาพการทำงานบนฮาร์ดแวร์อย่างมีนัยสำคัญ ในภาพรวม YOLOv11 จึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานที่ต้องการทั้งความเร็วและความแม่นยำสูง เช่น การคัดแยกขยะพลาสติกแบบเรียลไทม์ [6]

แม้งานวิจัยก่อนหน้าจะนำ YOLO มาประยุกต์ใช้กับการคัดแยกขยะรีไซเคิลหรือการจำแนกผลผลิตทางการเกษตร แต่ระบบเหล่านี้ยังไม่มุ่งเน้นเฉพาะขยะพลาสติกชนิดต่าง ๆ และยังไม่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยที่มีขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลาสติกใช้ครั้งเดียว งานวิจัยที่มีอยู่ยังไม่สามารถจำแนกขยะพลาสติก HDPE, PET, PP และ PS แบบเรียลไทม์ได้อย่างแม่นยำและสะดวกสำหรับการใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์พัฒนาระบบคัดแยกขยะพลาสติกเฉพาะประเภทด้วย YOLOv11 ร่วมกับเว็บแอปพลิเคชัน Flask เพื่อเพิ่มความสะดวก รวดเร็ว ลดข้อผิดพลาดจากการคัดแยกด้วยมือ และยกระดับประสิทธิภาพการจัดการขยะในบริบทไทย

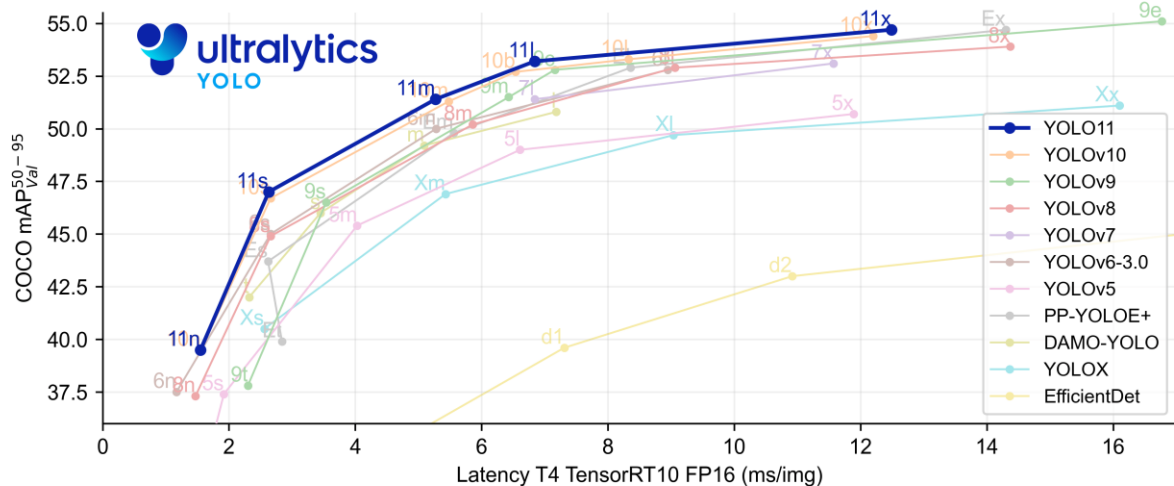
2. ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้แบบจำลอง YOLOv11 สำหรับการคัดแยกขยะพลาสติกออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ HDPE, PET, PP และ PS โดยใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายรวม 2,000 ภาพ (ประเภทละ 500 ภาพ) ซึ่งได้มาจาก 2 แหล่ง คือ ภาพถ่ายจริงจากขยะพลาสติกในหอพักทะเลแก้วนิเวศ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม และข้อมูลชุดข้อมูลจากฐานข้อมูลสาธารณะ (อัตราส่วน 1:1) ข้อมูลถูกแบ่งเป็น Training set 80%, Validation set 10% และ Testing set 10% เพื่อใช้ในการฝึกและประเมินโมเดล โดยใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall และ F1-score ระบบถูกพัฒนาเป็น เว็บแอปพลิเคชัน ด้วย Flask Framework และออกแบบด้วย HTML, CSS, และ JavaScript การทำงานของระบบคือ ผู้ใช้อัปโหลดภาพ ระบบตรวจสอบความถูกต้องของไฟล์และประมวลผลเบื้องต้น ส่งเข้าโมเดล YOLO เพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทพลาสติก แสดงผลลัพธ์พร้อม Bounding Box และค่า Confidence Score เพื่อช่วยให้ผู้ใช้ตรวจสอบผลการคัดแยกได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 YOLOv11 (You Only Look Once Version 11)

YOLOv11 เป็นอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุที่พัฒนาโดย Ultralytics ซึ่งได้รับการปรับปรุงให้ มีความแม่นยำสูงขึ้น ใช้ทรัพยากรน้อยลง และประมวลผลได้รวดเร็วขึ้น เมื่อเทียบกับเวอร์ชันก่อนหน้า โดยพัฒนาต่อยอดจาก YOLOv10 และ YOLOv9 ให้สามารถรองรับการใช้งานที่ซับซ้อนขึ้นในอุตสาหกรรมที่ต้องการการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล [6]

จากรูปที่ 1 จากกราฟแสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับวัตถุหลายรุ่น พบว่า YOLO11 มีความโดดเด่นเหนือกว่ารุ่นก่อนหน้าอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความแม่นยำและความเร็ว โดยเส้นกราฟของ YOLO11 อยู่สูงกว่าและชันกว่า YOLOv10, YOLOv9 และ YOLOv8 ซึ่งหมายถึงมีค่า mAP สูงกว่า (แม่นยำกว่า) ในขณะที่ใช้เวลาในการประมวลผลต่อภาพน้อยกว่า (Latency ต่ำกว่า) แสดงถึงการปรับปรุงทั้งด้านโครงสร้างโมเดล และประสิทธิภาพการทำงานบนฮาร์ดแวร์ TensorRT10 FP16 ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ YOLOv7 และ YOLOv6 พบว่ารุ่นเหล่านั้นยังคงมีความแม่นยำและความเร็วต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ส่วนโมเดลอื่นนอกตระกูล YOLO เช่น PP-YOLOE+, DAMO-YOLO, YOLOX และ EfficientDet มีค่าความแม่นยำที่ต่ำกว่าและใช้เวลาในการประมวลผลมากกว่า โดยเฉพาะ EfficientDet ที่อยู่ล่างสุดของกราฟสะท้อนถึงความล่าช้าทางประสิทธิภาพ ในภาพรวมจึงกล่าวได้ว่า YOLO11 เป็นผลลัพธ์ของการพัฒนาเชิงต่อเนื่องที่สามารถสร้างสมดุลระหว่างความเร็วและความแม่นยำได้ดีที่สุดในบรรดาโมเดลทั้งหมด [6]

YOLOv11 ทำงานแบบ single-stage detector ที่ประมวลผลภาพเพียงครั้งเดียวแล้วทำนายกรอบวัตถุ (bounding boxes), ความเป็นวัตถุ (objectness) และคลาสพร้อมกัน จึงเหมาะกับงานเรียลไทม์ ขั้นตอนหลักเริ่มจากการเตรียมภาพ (เช่น resize แบบ letterbox และ normalize) ก่อนส่งเข้า backbone แบบคอนโวลูชันที่ออกแบบให้ดึงคุณลักษณะหลายสเกลด้วยโครงสร้างเชิงลึกและการเชื่อมต่อแบบเหลือม (residual/CSP-like) จากนั้น neck ผสานคุณลักษณะด้วยแนวคิดลำดับชั้น (FPN/PAN-like) เพื่อให้เห็นวัตถุทั้งเล็กและใหญ่ แล้วจึงเข้าสู่ detection head แบบแยกสาขา (decoupled head) สำหรับงานจำแนกคลาสและระบุตำแหน่ง ซึ่งมักใช้การทำนายเชิง anchor-free/anchor-based ที่เหมาะสมพร้อมฟังก์ชันสูญเสียตระกูล IoU (เช่น CloU/DIoU/GIoU) ขณะฝึกโมเดลนิยมใช้ data augmentation เช่น Mosaic, MixUp, random perspective และการกำหนดป้ายกำกับเชิงไดนามิก (เช่น SimOTA/task-aligned) เพื่อเพิ่มความทนทานและการลู่เข้า ระหว่างอนุมานระบบจะคัดกรองผลด้วยเกณฑ์ความเชื่อมั่นและทำ Non-Maximum Suppression (เช่น NMS/Soft-NMS/DIoU-NMS) ก่อนส่งออกรายการวัตถุที่มีพิกัดกรอบ คลาส และคะแนนความมั่นใจ ทั้งยังรองรับขนาดโมเดลหลากหลาย (n/s/m/l/x) และการเร่งความเร็วด้วย FP16/INT8 ผ่าน ONNX/TensorRT เพื่อปรับใช้บน GPU หรืออุปกรณ์ edge ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หลักการดังกล่าวสืบเนื่องจากสายตระกูล YOLO ที่รวมการตรวจจับและจำแนกในเฟรมเดียวเพื่อตอบโจทย์ความเร็วและความแม่นยำในงานตรวจจับวัตถุสมัยใหม่ [7]

3.2 Confusion Matrix

เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการประเมินผลลัพธ์ของการทำนายที่ทำโดยโมเดลที่สร้างขึ้นในกระบวนการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) แนวคิดคือการวัดสัดส่วนระหว่างสิ่งที่เราเดา (จากโมเดลที่ทำนาย) และสิ่งที่เกิดขึ้นจริง [8]

ตารางที่ 1 เมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix)

ทำนาย	ผลลัพธ์จริง เป็นบวก (1)	ผลลัพธ์จริง เป็นลบ (0)
ทำนาย เป็นบวก (1)	ทำนายถูกว่าเป็นบวก TP	ทำนายผิดว่าเป็นบวก FP
ทำนาย เป็นลบ (0)	ทำนายผิดว่าเป็นลบ FN	ทำนายถูกว่าเป็นลบ TN

ทำนายถูกว่าเป็นบวก (TP) = การทำนายตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่การทำนายเป็นจริงและสิ่งที่เกิดขึ้นจริงก็เป็นจริง

ทำนายถูกว่าเป็นลบ (TN) = การทำนายตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่การทำนายเป็นเท็จและสิ่งที่เกิดขึ้นจริงก็เป็นเท็จ

ทำนายผิดว่าเป็นบวก (FP) = การทำนายไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่ทำนายว่าเป็นจริง แต่สิ่งที่เกิดขึ้นจริงไม่เป็นจริง

ทำนายผิดว่าเป็นลบ (FN) = การทำนายไม่ตรงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริง ในกรณีที่ทำนายว่าไม่จริง แต่สิ่งที่เกิดขึ้นจริงเป็นจริง

ค่า TP, TN, FP, FN ในตารางจะถูกแสดงโดยค่าความถี่ สามารถใช้ Confusion Matrix ในการคำนวณการประเมินผลการทำนายของโมเดลในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น

ความถูกต้อง (Accuracy)

$$\text{Accuracy} = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (1)$$

(ความแม่นยำ) Precision

$$\text{Precision} = TP / (TP + FP) \quad (2)$$

(การเรียกคืน) Recall

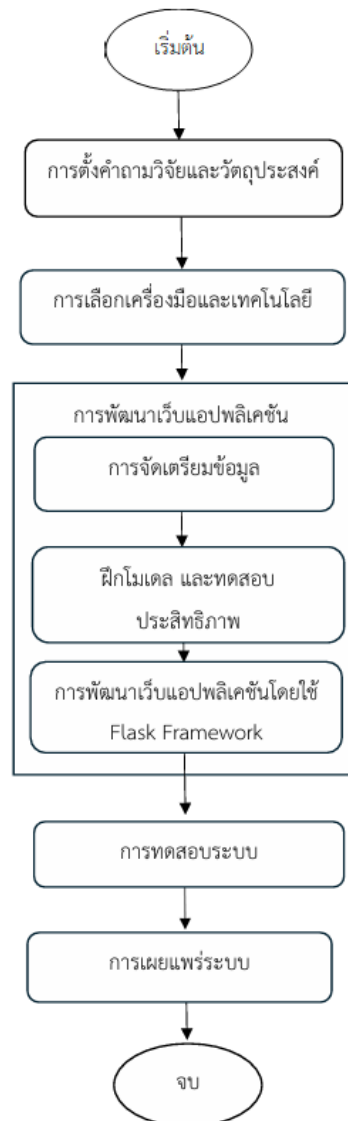
$$\text{Recall} = TP / (TP + FN) \quad (3)$$

(ความสมดุลของความแม่นยำกับการเรียกคืน) F1 Score

$$F1 = 2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}) \quad (4)$$

4. การดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินงานวิจัยโดยใช้ขั้นตอนของ Brownlee, J. [6] โดยมีขั้นตอนทั้งหมด 5 ขั้นตอนได้แก่ การตั้งคำถามวิจัยและวัตถุประสงค์ การเลือกเครื่องมือและเทคโนโลยี การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน การทดสอบระบบ และการเผยแพร่ ตามผังงานการทำงานของระบบ (System Flowchart) รูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 ผังงานการทำงานของระบบ (System Flowchart)

1. การตั้งปัญหาวิจัยและวัตถุประสงค์

ปัญหาขยะเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิตของประชาชนในหลายประเทศ รวมถึงประเทศไทย ซึ่งมีปริมาณขยะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี โดยเฉพาะขยะพลาสติกที่มีสัดส่วนสูงและการจัดการขยะประเภทนี้ยังไม่มีประสิทธิภาพ ขยะพลาสติกส่วนใหญ่ไม่ได้รับการคัดแยกอย่างถูกต้อง

2. การเลือกเครื่องมือและเทคโนโลยี

2.1 Roboflow ใช้ในการเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกฝนโมเดล ในการอัปโหลดรูปภาพ และการ Label รูปภาพ

2.2 Google Colab ใช้ในการฝึกฝนโมเดล ประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลภาพ และประเมินประสิทธิภาพของโมเดล

3.3 Flask Framework ใช้ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

4.4 Visual Studio Code ใช้ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

3. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

ในงานวิจัยนี้ได้มีการใช้โมเดล YOLOv11 [9] ในการประมวลผลภาพ และมีการใช้ Flask Framework ในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน โดยมีขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.1 การจัดเตรียมข้อมูล การรวบรวมข้อมูลเป็นกระบวนการที่เริ่มจากการเก็บภาพขยะพลาสติกจากแหล่งๆ เพื่อใช้ในการฝึกโมเดล ในงานวิจัยนี้ได้ถ่ายภาพขยะพลาสติกในบริเวณหอพักทะเลแก้ว มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม โดยใช้โทรศัพท์มือถือในการถ่ายภาพ และภาพจากแหล่งข้อมูลออนไลน์ โดยภาพทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น โดยแบ่งเป็นภาพขยะพลาสติกประเภท HDPE,PET,PP,PS กลุ่มละ 500 ภาพ รวมจำนวนทั้งสิ้น 2,000 ภาพ อัปโหลดภาพข้อมูลไปยัง Roboflow ทำ Data Augmentation ด้วย Flip และ Rotate จะได้ภาพ 6,000 ภาพ หลังจากการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่างๆ แล้วขั้นตอนนี้คือการอัปโหลดภาพไปยัง Roboflow เพื่อจัดการข้อมูล จากนั้นทำการติดป้ายกำกับ Labeling กำหนดประเภทขยะพลาสติกในแต่ละภาพ หลังจากนั้นทำการเพิ่มข้อมูลคือการสร้างข้อมูลใหม่จากข้อมูลเดิมโดยการปรับแต่งภาพ ทำการแบ่งข้อมูล โดยข้อมูลภาพทั้งหมดจะถูกแบ่งเป็น 3 ชุด คือ Train ชุดฝึกโมเดล จำนวน 80% Test ใช้สำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดลหลังการฝึกเสร็จ จำนวน 10% และ Validate ใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพของโมเดลระหว่างฝึกฝน จำนวน 10% [10]

3.2 ฝึกโมเดล (Train) ขั้นตอนในการฝึกฝนโมเดล YOLOv11 โดยนำเอาคัตลอกนำคำสั่งที่ได้จาก Roboflow มาประมวลผลด้วยภาษา Python โดยใช้ google colab ที่มีการจัดเตรียมไว้แล้วและมีการปรับแต่งพารามิเตอร์ดังนี้ `img_size=640 px`, `batch_size=16`, `epochs=150`, `learning_rate=0.001`, `classes=4` (HDPE, PET, PP, PS), `augmentation=Flip+Rotate` พร้อมทำ 5-fold cross-validation เพื่อประเมินความเสถียรและความแม่นยำของโมเดล

3.3 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันด้วย Flask Framework เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับสร้างแอปขนาดเล็กถึงกลาง เนื่องจากใช้งานง่ายและปรับแต่งได้ตามความต้องการ ในงานนี้ Flask ถูกใช้สร้างระบบที่สามารถอัปโหลดภาพ ตรวจสอบประเภทขยะ และแสดงผลผ่านหน้าเว็บ โดยเริ่มจากติดตั้ง Flask และสร้างไฟล์หลัก `app.py` สำหรับกำหนดการทำงานของแอป พร้อมวางไฟล์โมเดล `best.pt` ที่ผ่านการฝึก YOLO แล้ว การพัฒนาอินเทอร์เฟซ ผู้ใช้เน้นความสะดวก ผู้ใช้สามารถเลือกและอัปโหลดภาพขยะพลาสติกได้ง่าย หน้าเว็บจะแสดงผลรูปภาพพร้อมประเภทขยะที่ตรวจจับได้ทันที ข้อมูลจากผู้ใช้งานจะถูกส่งไปยังเซิร์ฟเวอร์ Flask เพื่อประมวลผลด้วยโมเดล YOLO และผลลัพธ์จะอัปเดตบนหน้าเว็บผ่าน JavaScript ทำให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบประเภทขยะพลาสติกได้อย่างรวดเร็วและสะดวก

4. การทดสอบระบบ

การทดสอบการประมวลผลภาพจะทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลในการตรวจจับและแยกประเภทขยะพลาสติก การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลจะทำโดยใช้ Latency กับ FPS ในการวัดความเร็วในการประมวลผล และตาราง Confusion Matrix หาค่า ได้แก่ ความถูกต้อง (Accuracy), ความแม่นยำ (Precision), การเรียกคืน (Recall) และ ความสมดุลของความแม่นยำกับการเรียกคืน (F1-score) [8]

5. การเผยแพร่ระบบ

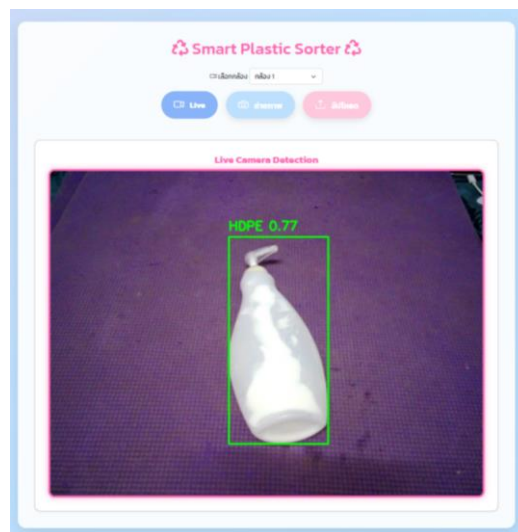
การเผยแพร่ระบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำให้ระบบสามารถใช้งานได้จริงและสามารถเข้าถึงผู้ใช้ทั่วไปได้ โดยขั้นตอนนี้ประกอบด้วยการโฮสต์ระบบบนเซิร์ฟเวอร์ ระบบจะถูกเผยแพร่บนเซิร์ฟเวอร์ที่ เว็บไซต์ของสาขาวิทยาการข้อมูลและการจัดการสารสนเทศ เมื่อระบบแล้วเสร็จ สามารถดำเนินการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงโดยติดตั้งกล้องตรวจจับและสายพานลำเลียงร่วมกับอุปกรณ์ IoT เช่น แขนกลอัตโนมัติ รวบรวมขยะพลาสติกจริง 4 ประเภท ได้แก่ HDPE, PET, PP และ PS จากจุดคัดแยกขยะและโรงงานรีไซเคิล ทำการประเมินประสิทธิภาพทั้งความถูกต้อง (Accuracy), ความแม่นยำ (Precision), การเรียกคืน (Recall), F1-score รวมถึงวัดความเร็วการประมวลผล (FPS) และเวลาแฝง (Latency) ในสภาพแวดล้อมจริง พร้อมบันทึกข้อจำกัด เช่น ขยะซ้อนกัน แสงสว่าง หรือมุมกล้อง และปรับแต่งระบบตามความเหมาะสม เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถคัดแยกขยะพลาสติกแบบเรียลไทม์ได้อย่างแม่นยำ ลดความพึงพาแรงงานคน และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการขยะในบริบทไทยอย่างแท้จริง ระบบนี้นำไปประยุกต์ใช้ในระบบ IoT เพื่อคัดแยกขยะอัตโนมัติในศูนย์รีไซเคิล หรือใช้ตรวจจับวัตถุในสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดความผิดพลาดของมนุษย์ได้

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยที่ได้จากการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการคัดแยกขยะโดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ โดยใช้แบบจำลอง YOLOv11 ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลการพัฒนา เว็บแอปพลิเคชันการคัดแยกขยะ และผลการศึกษาประสิทธิภาพของการคัดแยกขยะพลาสติกโดยใช้แบบจำลอง You Only Look Once

5.1 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันการคัดแยกขยะพลาสติก

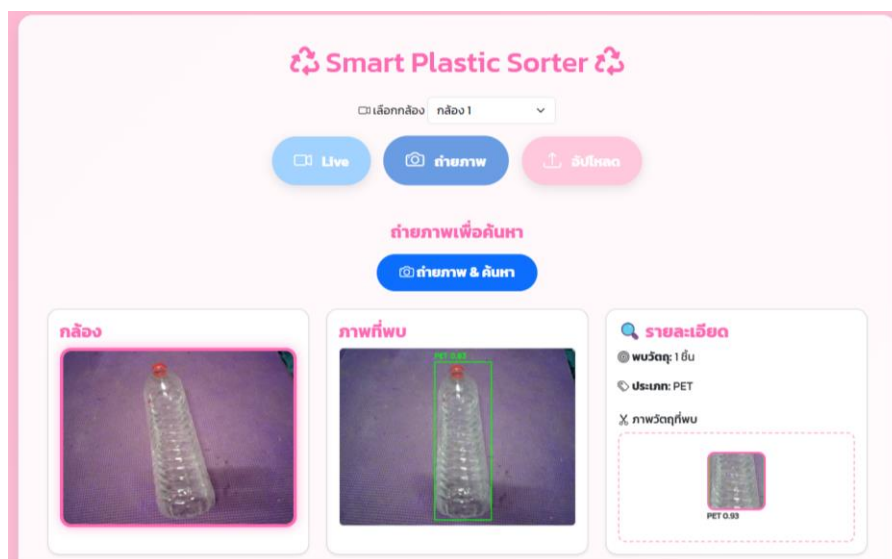
เว็บที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถอัปโหลดรูปภาพถ่ายของขยะพลาสติก แล้วระบบจะประมวลผลภาพด้วยโมเดล YOLOv11 เพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทขยะพลาสติก รูปที่ 4.1 หน้าเว็บแอปพลิเคชันโครงสร้างของระบบ ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา Python ใช้ Flask Framework สำหรับการจัดการเส้นทางของเว็บ (Routing) และแสดงผลด้วย HTML, CSS ลักษณะการทำงานของหน้าเว็บ หน้าเว็บของระบบถูกออกแบบมาให้ใช้งานง่าย ประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้



รูปที่ 3 หน้าระบบสำหรับ Live

ส่วนแรก คือ ส่วนควบคุม (ด้านบนสุด) แสดงชื่อหน้าจอแสดงชื่อระบบ Smart Plastic Sorter หรือระบบคัดแยกพลาสติกอัจฉริยะ พร้อมสัญลักษณ์รีไซเคิล มีเมนูเลือกโหมด มีเมนูสำหรับเลือกกล้อง (เช่น กล้อง 1) ปุ่มโหมดการทำงาน ได้แก่ Live สำหรับดูภาพสด, ถ่ายภาพ สำหรับถ่ายและประมวลผล, และ อัปโหลด สำหรับอัปโหลดไฟล์รูปภาพเพื่อตรวจสอบ

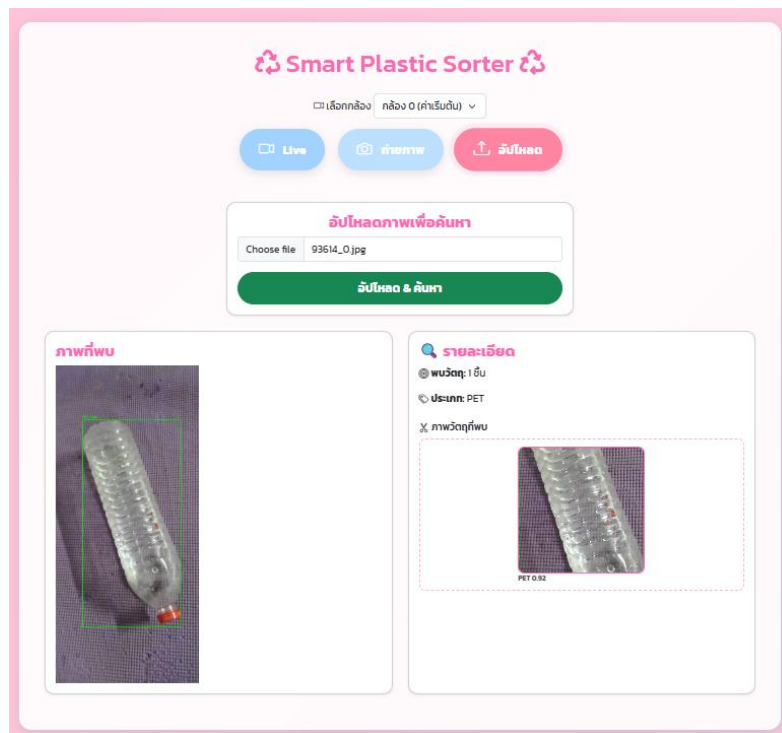
ส่วนที่ 2 คือ Live (รูปที่ 3) ส่วนนี้สามารถทำนายประเภทของพลาสติกได้ในขณะนั้น (real time) ส่วนกลางของหน้าจอเป็นการแสดงผลจากกล้อง (Live Camera Detection) ภายในกรอบภาพ กล้องตรวจจับวัตถุที่เป็น ขวดพลาสติกสีขาว โดยมีกรอบสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบวัตถุ



รูปที่ 4 หน้าระบบสำหรับถ่ายภาพ

ส่วนที่ 3 คือ ถ่ายภาพ (รูปที่4) ส่วนนี้สามารถกดปุ่มถ่ายภาพจากกล้องที่กำลังเปิดอยู่จากนั้นส่งข้อมูลไปประมวลผลได้ ส่วนการประมวลผลภาพ แสดงภาพจากกล้องจริง (ด้านซ้าย) แสดงผลรูปที่ระบบตรวจจับแล้ว (ตรงกลาง) โดยในภาพนี้ตรวจพบ ขวดพลาสติกใส และระบบใส่กรอบสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบ พร้อมข้อความกำกับว่า PET 0.93 ซึ่งหมายถึงตรวจพบว่าเป็นพลาสติกประเภท PET (Polyethylene Terephthalate) ด้วยค่าความมั่นใจ 93% 3) ส่วนสรุปผลการตรวจจับ (ด้านขวา) แสดงรายละเอียดการตรวจพบ เช่น พบวัตถุ: 1 ชิ้น ประเภท: PET แสดงภาพย่อ (thumbnail) ของวัตถุที่ตรวจพบเพื่อยืนยันผลการประมวลผล

ส่วนที่ 4 อัปโหลด (รูปที่5) ส่วนนี้สามารถนำรูปที่ถ่ายไว้หรือนำมาจากที่อื่นเพื่อนำมาประมวลผลได้ ประกอบด้วย กล้องเลือกไฟล์ ปุ่ม อัปโหลด & ค้นหา เพื่อส่งภาพให้ระบบวิเคราะห์ ผลการตรวจจับ (แบ่งเป็น 2 ฝั่ง) รูปที่พบ (ซ้าย) : แสดงวัตถุที่ถูกตรวจจับจากรูปที่อัปโหลด โดยระบบใส่กรอบสี่เหลี่ยมสีเขียวล้อมรอบวัตถุ (ซึ่งเป็น ขวดพลาสติกใส) รายละเอียด (ขวา) : จำนวนที่ตรวจพบ: 1 ชิ้น ประเภทพลาสติก: PET ภาพย่อที่ตรวจจับได้ พร้อมระบุผลว่า PET 0.93 (ค่าความมั่นใจ 93%)



รูปที่ 5 หน้าระบบสำหรับอัปโหลด

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการทำนายภาพ

หมวดหมู่	ภาพการทำนายที่ถูกต้อง	ภาพการทำนายผิด
HDPE		
PET		

หมวดหมู่	ภาพการทำนายที่ถูกต้อง	ภาพการทำนายผิด
PP		
PS		

จากตารางที่ 2 การวิเคราะห์ภาพกรณีทำนายผิด สาเหตุที่โมเดล YOLOv11 ทำนายผิดเกิดจากมุมกล้อง การวางวัตถุ พื้นหลัง และแสงที่แตกต่างจากข้อมูลฝึก ทำให้ลักษณะเด่นของพลาสติก เช่น รูปร่างและพื้นผิว เปลี่ยนไปจนโมเดลสับสน โดยเฉพาะเมื่อวัตถุเอียง หมุน หรืออยู่บนพื้นหลังสีใกล้เคียง ส่งผลให้จำแนกชนิดพลาสติกผิดพลาด เช่น HDPE ถูกทำนายเป็น PET หรือ PP

5.2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการคัดแยกขยะพลาสติก

โมเดล YOLOv11 ประมวลผลโดยใช้ GPU ของ Google Colab ปัจจุบัน (Tesla T4) ได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ Latency 22 ms ต่อภาพ FPS 55 fps ประสิทธิภาพของการคัดแยกขยะพลาสติกโดยใช้แบบจำลอง You Only Look Once ได้ใช้ค่าความถูกต้อง (Accuracy), ความแม่นยำ (Precision), การเรียกคืน (Recall) และความสมดุลของความแม่นยำกับการเรียกคืน (F1-score) [8] คือ

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของการคัดแยกขยะพลาสติก

ประเภทพลาสติก	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
HDPE	0.983	0.958	1	0.978
PET	0.994	0.999	0.97	0.984
PP	0.958	0.943	0.898	0.92
PS	0.976	0.971	0.918	0.944
เฉลี่ยทั้งหมด	0.954	0.967	0.946	0.957

จากตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของการคัดแยกขยะพลาสติก 4 ประเภท ได้แก่ HDPE, PET, PP และ PS โดยใช้แบบจำลอง YOLOv11 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) PET มีความค่าถูกต้องสูงสุดที่ 0.994 รองลงมาคือ HDPE 0.983 PP และ PS ที่ 0.958, 0.976 ตามลำดับ ค่าความแม่นยำ (Precision) พบว่า PET มีค่าสูงสุดถึง 0.999 HDPE, PP และ PS มีค่าความแม่นยำ (Precision) อยู่ที่ 0.958, 0.943 และ 0.971 ตามลำดับ การเรียกคืน (Recall) HDPE คือ 1 PET อยู่ที่ 0.97 ส่วน PP และ PS อยู่ที่ 0.898 และ 0.918 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา F1-score ซึ่งเป็นตัววัดความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall พบว่า PET และ HDPE มีค่า F1-score สูงสุดที่ 0.984 และ 0.978 ตามลำดับ ส่วน PS อยู่ที่ 0.944 และ PP อยู่ที่ 0.92

6. สรุป

เว็บแอปพลิเคชัน Smart Plastic Sorter พัฒนาด้วย Python และ Flask โดยใช้โมเดล YOLOv11 สำหรับตรวจจับและจำแนกประเภทขยะพลาสติก ระบบมี 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนควบคุม (เลือกกล้องและโหมด), Live (ตรวจจับแบบเรียลไทม์), ถ่ายภาพ (กดถ่ายและประมวลผลทันที), และ อัปโหลด (นำไฟล์ภาพมาตรวจสอบ) ผลลัพธ์จะแสดงกรอบตรวจจับ ประเภทพลาสติก ค่าความมั่นใจ และรายละเอียดวัตถุที่พบ เพื่อสนับสนุนการคัดแยกและรีไซเคิลขยะพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ

โมเดลสามารถคัดแยกขยะพลาสติก 4 ประเภท (HDPE, PET, PP, PS) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยเฉลี่ยมีเวลาแฝง (Latency) 22 ms ต่อภาพ และความเร็วในการประมวลผล 55 FPS เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการจำแนกตามประเภทพลาสติก พบว่า PET มีความถูกต้อง (Accuracy) สูงสุด 0.994 และค่าความแม่นยำ (Precision) สูงสุด 0.999 ตามด้วย HDPE ที่ Accuracy 0.983, Precision 0.958 ส่วน PP และ PS มี Accuracy 0.958 และ 0.976, Precision 0.943 และ 0.971 ตามลำดับ สำหรับการเรียกคืน (Recall) HDPE มีค่า 1.0, PET 0.97, PP 0.898 และ PS 0.918 ส่วน F1-score ของ PET และ HDPE สูงสุดที่ 0.984 และ 0.978 ตามลำดับ ขณะที่ PS และ PP มีค่า 0.944 และ 0.92 แสดงให้เห็นว่า YOLOv11 สามารถจำแนกขยะพลาสติกได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และสมดุลระหว่าง Precision และ Recall ทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงในระบบคัดแยกขยะแบบเรียลไทม์

7. อภิปรายผล

จากการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน พบว่าระบบสามารถตรวจจับและจำแนกขยะพลาสติก 4 ประเภท (HDPE, PET, PP, PS) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้โมเดล YOLOv11 รองรับทั้งการทำงานแบบเรียลไทม์ การถ่ายภาพ และการอัปโหลดภาพ ทำให้ผู้ใช้มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน โครงสร้างระบบแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนควบคุม, Live, ถ่ายภาพ และอัปโหลด ช่วยให้เข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ง่าย ผลการทดลองแสดงว่า PET และ HDPE มี Accuracy สูงสุดที่ 0.994 และ 0.983, Precision 0.999 และ 0.958, Recall 0.97 และ 1.0, F1-score 0.984 และ 0.978 ตามลำดับ ขณะที่ PS และ PP มีตัวชี้วัดต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับประเภทอื่น การแสดงกรอบวัตถุ ค่าความมั่นใจ จำนวน และประเภทของพลาสติกช่วยสนับสนุนการคัดแยกขยะและการรีไซเคิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าความแม่นยำอาจลดลงในสภาพแสงไม่เหมาะสมหรือขยะซ้อนกัน

ผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดล YOLOv11 แสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถจำแนกขยะพลาสติก 4 ประเภท (HDPE, PET, PP, PS) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดย PET และ HDPE มีค่าตัวชี้วัด Accuracy, Precision, Recall และ F1-score สูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของโมเดลในการเรียนรู้ลักษณะทางกายภาพที่เด่นชัดและแตกต่าง เช่น ขวด PET สีและรูปทรงมาตรฐาน หรือเกลลอน HDPE ที่บีบและหนา ทำให้ตรวจจับและจำแนกได้ง่าย ส่วน PP และ PS มีความซับซ้อนในการจำแนกมากกว่า เนื่องจากรูปร่างและพื้นผิวคล้ายกับประเภทอื่น ผลลัพธ์นี้

สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับ YOLOv5 และ YOLOv8 ที่ชี้ว่า YOLO สามารถจำแนกพลาสติกได้แม่นยำ โดยขึ้นอยู่กับความชัดเจนของลักษณะวัสดุและคุณภาพของภาพ

ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้า เช่น ธนโชติ ภาชนะนัย และคณะ [3] ที่ใช้ YOLOv5 คัดแยกขยะรีไซเคิลได้ Accuracy เฉลี่ย 98.33% และ สุขสันต์ พรหมบุญเรือง และคณะ [4] K. Soumya et al. [11] et al. และ J. R. Yasiri et al. [12] ที่พบว่า YOLOv5 มี Precision สูง รวมถึงงานของ Unni et al. [13] ที่ใช้ YOLOv8 ได้ค่า mAP50 0.983 แสดงให้เห็นว่า YOLO สามารถจำแนกพลาสติกได้อย่างแม่นยำ ขึ้นอยู่กับความชัดเจนของลักษณะวัสดุและคุณภาพภาพ

เมื่อเปรียบเทียบ YOLOv11 กับ YOLOv5 และ YOLOv8 พบว่า YOLOv11 มีความเหนือกว่าในหลายด้าน ได้แก่ ความเร็ว (Latency 22 ms ต่อภาพ, ประมวลผล 55 FPS), ความทนทาน (Accuracy, Precision, F1-score สูงกว่า โดยเฉพาะ PET และ HDPE) และประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ทำให้เหมาะกับการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IoT หรือ สายพานคัดแยกขยะแบบเรียลไทม์

ในเชิงประยุกต์ โมเดลนี้สามารถนำไปใช้งานจริงในโรงงานรีไซเคิล คัดแยกขยะพลาสติก 4 ประเภทแบบเรียลไทม์ ร่วมกับแขนกลอัตโนมัติหรือสายพานลำเลียง ลดการพึ่งพาแรงงานคน เพิ่มความแม่นยำและความเร็ว และสามารถขยายไปสู่ชุมชนหรือจุดรับรีไซเคิลเพื่อสนับสนุนการแยกขยะตั้งแต่ต้นทาง

ในระดับนโยบายและสังคม การใช้ YOLOv11 ช่วยลดปริมาณขยะที่ฝังกลบและมลพิษ สนับสนุน circular economy โดยทำให้ทรัพยากรถูกนำกลับมาใช้ซ้ำ ลดการใช้วัตถุดิบใหม่และพลังงาน สนับสนุนการวางแผนจัดการขยะระดับเมืองและชาติ สร้างความตระหนักและการมีส่วนร่วมของประชาชน ส่งผลต่อความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม และคุณภาพชีวิตโดยรวม

8. ข้อเสนอแนะ

8.1 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้

1. ระบบเว็บแอปพลิเคชันต้องใช้งานร่วมกับ อินเทอร์เน็ตเพื่อให้สามารถประมวลผลและแสดงผลการจำแนกขยะได้ทันที

2. ควรมีพื้นที่หลังที่โล่งเมื่อต้องถ่ายภาพขยะ เพื่อช่วยให้โมเดล YOLO ตรวจจับวัตถุได้แม่นยำมากขึ้น

8.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรขยายการทดลองไปยังขยะประเภทอื่นๆ เช่น โลหะ แก้ว หรือกระดาษ เพื่อให้ครอบคลุมมากขึ้น

2. ควรเพิ่มปริมาณและความหลากหลายของข้อมูลภาพทั้งในแง่ของแสง มุมมอง พื้นหลัง และรูปแบบขยะที่หลากหลายเพื่อให้โมเดลเรียนรู้ได้หลากหลายสถานการณ์

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thai PBS, "ขยะล้นเมือง คนไทยสร้างขยะเฉลี่ย 7.3 หมื่นตัน/วัน," *Thai PBS*, 5 มิ.ย. 67. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://www.thaipbs.or.th/news/content/340722>
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, "ขยะพลาสติก," สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. เข้าถึงเมื่อ: 1 ส.ค. 68. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://www.onep.go.th/ขยะพลาสติก>
- [3] ธนโชติ ภาชนะนัย, จักรกริช ปานเงิน, กรรณิการ์ คณงาม, วรชัย ศรีสมุดคำ และ วาสนา วงศ์ษา, "เครื่องคัดแยกขยะรีไซเคิลด้วยการประมวลผลภาพ," *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราช*

- ภัญญิบลสงคราม, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 242–253, พ.ค.–ส.ค. 65. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/psru-jite/article/view/247342>
- [4] S. Promboonruang, T. Boonrod, and R. Yongyut, “Efficient waste detection and classification based on YOLOv5 models,” *Engineering Access*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58, Jan.–Jun. 2024, doi: 10.14456/mijet.2024.7.
- [5] ปาณิสรา หาดขุนทด, ภัครพล อาจอาษา และ ธนากร แสงกุดเลาะ, “การพัฒนาระบบคัดแยกขยะหวนด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ,” *วารสารวิทยาสารสนเทศและเทคโนโลยี*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 47–61, ก.ค.–ธ.ค. 66. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://so09.tci-thaijo.org/index.php/jait_ssru/article/view/3036
- [6] Ultralytics, “Ultralytics YOLO11,” Ultralytics. Accessed: Jul. 10, 2025. [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/>
- [7] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi, “You only look once: Unified, real-time object detection,” *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 779–788, doi: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [8] K. M. Ting, “Confusion matrix,” in *Encyclopedia of Machine Learning*, C. Sammut, and G. I. Webb, Eds., Boston, MA, USA: Springer, 2011, doi: 10.1007/978-0-387-30164-8_157.
- [9] R. Khanam and M. Hussain, “YOLOv11: An overview of the key architectural enhancements,” ARXIV. Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2410.17725>
- [10] J. Brownlee, “Generative adversarial networks with python,” *Machine Learning Mastery*. Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: https://machinelearningmastery.com/generative_adversarial_networks/
- [11] K. Soumya, K. Kushala, K. Y. Varshini, K. B. Jahnavi, and K. L. Swetha, “Plastic waste detection using YOLOv5 deep learning object detection algorithm”, *International Journal of Novel Research and Development (IJNRD)*, vol.8, no. 3, pp. 226–238, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://www.ijnrd.org/papers/IJNRD2303103.pdf>
- [12] J. R. Yasiri, R. Prathivi, and Susanto. “Detection of plastic bottle waste using YOLO version 5 algorithm”, *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, vol. 9, no. 1, pp. 20–30, Jan. 2025, doi: 10.33395/sinkron.v9i1.14242.
- [13] A. P. Unni, N. A. Alimon, M. Gowri, S. N. A. Krishna, and S. Livera, “Waste segregation using YOLO v8 based object detection and robotics,” *Journal of emerging technologies and innovative research (JETIR)*, vol. 11, no. 4, pp. 591–595, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2404F83.pdf>

การจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทางสำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ
ด้วยสัญญาณวิทยุ

A Simulation of Directional Antenna System for UAV Detection
Using Radio Frequency Signals

วัชรพงศ์ เกตุปาน^{1*} และ ครองบุญ สิงหนาท¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กองวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

Watcharapong Ketpan^{1*} and Krongboon Singhanat¹

¹Electrical Engineering Department, Electrical and Civil Engineering Division, Academic Faculty,
Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy

Corresponding Author Email : watcharapong_ketpan@rtaf.mi.th

Received 20 July 2025

Revised 02 February 2025

Accepted 04 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทางเพื่อการตรวจจับและระบุตำแหน่งอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ด้วยสัญญาณวิทยุ โดยใช้เทคนิคการจำลองรูปแบบการแพร่กระจาย (Radiation Pattern) บนโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างและวิเคราะห์คุณสมบัติการรับสัญญาณของสายอากาศ ผลการจำลองได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจจับและระบุทิศทางของ UAV ได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถยืนยันตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ผ่านการวิเคราะห์ความเข้มของสัญญาณ (Signal Strength) ที่สัมพันธ์กับการหมุนของสายอากาศจำลอง การวิเคราะห์ดำเนินการในสี่รูปแบบการจำลองหลัก ได้แก่ การใช้สายอากาศชนิดเดียวกันในสภาวะคงที่ (Static Homogeneous), การใช้สายอากาศชนิดเดียวกันในสภาวะเคลื่อนไหวน (Dynamic Homogeneous), การใช้สายอากาศต่างชนิดกันในสภาวะคงที่ (Static Heterogeneous) และการใช้สายอากาศต่างชนิดกันในสภาวะเคลื่อนไหวน (Dynamic Heterogeneous) ผลการจำลองจากการทดสอบ 100 ครั้งในแต่ละรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าโมเดล Static Homogeneous มีประสิทธิภาพสูงสุดด้วยค่าเฉลี่ยความสามารถในการตรวจจับอยู่ที่ 34.9755% ในขณะที่โมเดล Dynamic Heterogeneous มีประสิทธิภาพสูงสุดในกลุ่มสายอากาศต่างชนิดกันที่ 24.5276% ผลการศึกษานี้สรุปได้ว่า การจัดวางสายอากาศชนิดเดียวกันในรูปแบบคงที่ที่มีการกำหนดค่าอย่างเหมาะสม เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มโอกาสการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับตามพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง งานวิจัยนี้จึงเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการออกแบบและประเมินระบบป้องกันภัยทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับในอนาคตและมีประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนา ระบบเฝ้าระวังหรือระบบเตือนภัยในพื้นที่สำคัญ เช่น สนามบิน หรือพื้นที่ทางทหาร

คำสำคัญ: การตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ, สายอากาศแบบระบุทิศทาง, การประมวลผลสัญญาณ, การจำลอง

Abstract

This research presented a directional antenna system model for the detection and localization of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) using radio frequency signals. The study employed MATLAB-based simulation techniques for Radiation Pattern analysis to construct and evaluate the antenna's reception characteristics. The simulation results demonstrated the system's precise capability in detecting and determining the direction of a UAV. The location of the signal source was confirmed through the analysis of Signal Strength relative to the rotation of the simulated antenna. The analysis was conducted across four primary simulation scenarios: Static Homogeneous, Dynamic Homogeneous, Static Heterogeneous, and Dynamic Heterogeneous antenna configurations. Simulation results from 100 trials for each model indicated that the Static Homogeneous model achieved the highest average detection efficiency at 34.9755%, while the Dynamic Heterogeneous model performed best among heterogeneous types with an efficiency of 24.5276%. The study concluded that an appropriately configured static arrangement of homogeneous antennas was the most effective approach to enhance the probability of UAV detection under the simulated parameters. This research provided a crucial foundation for the future design and evaluation of anti-drone defense systems and was highly beneficial for developing surveillance or alert systems in critical areas, such as airports or military installations.

Keywords: UAV Detection, Directional Antenna, Signal Processing, Simulation

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมา

การเติบโตอย่างรวดเร็วและการยอมรับอย่างแพร่หลายของอากาศยานไร้คนขับในประเทศไทยมีจุดเริ่มต้นที่สำคัญจากนโยบายของภาครัฐ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากการประกาศของคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) เรื่อง หลักเกณฑ์และเงื่อนไขการอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับประเภทโดรน สำหรับใช้งานเป็นการทั่วไป ซึ่งประกาศในราชกิจจานุเบกษาเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน 2563 [1] ประกาศนี้ได้ปรับปรุงหลักเกณฑ์เพื่ออำนวยความสะดวกให้ประชาชนทั่วไปสามารถใช้โดรนในลักษณะต่างๆ ได้อย่างถูกกฎหมาย ซึ่งครอบคลุมวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย ตั้งแต่การเล่นเป็นงานอดิเรกเพื่อความบันเทิง การกีฬา การรายงานข่าวและจราจร ไปจนถึงการถ่ายภาพยนตร์ การถ่ายทำรายการโทรทัศน์ และการวิจัยและพัฒนา การกำหนดกรอบทางกฎหมายที่ชัดเจนเช่นนี้ได้ช่วยส่งเสริมให้เกิดการใช้งานโดรนในลักษณะต่างๆ อย่างกว้างขวาง แสดงให้เห็นถึงการผนวกรวมเทคโนโลยีโดรนเข้ากับวิถีชีวิตและกิจกรรมทางเศรษฐกิจของสังคมไทยอย่างมีนัยสำคัญ อาทิกายานไร้คนขับสำหรับการเกษตรและในการกักกันหาและช่วยชีวิต [2] นอกจากนี้ การประกาศดังกล่าวยังได้กำหนดให้ผู้ครอบครองโดรนมีหน้าที่ต้องขึ้นทะเบียนภายใน 30 วันนับจากวันที่ได้มาครอบครอง โดยผู้ที่มีหน้าที่ขึ้นทะเบียนครอบคลุมตั้งแต่เจ้าของโดรนและผู้ใช้งานทั่วไป นักท่องเที่ยวชาวต่างชาติที่นำโดรนเข้ามาใช้ในประเทศ ไปจนถึงหน่วยงานของรัฐทั้งหมด ยกเว้นหน่วยงานด้านความมั่นคง การกำหนดให้มีการลงทะเบียนอย่างเป็นระบบ

มาใช้งานให้ครอบคลุมทุกฐานทัพอากาศซึ่งมีสถานที่ที่ต้องป้องกันเป็นจำนวนมากนั้นอาจสิ้นเปลืองงบประมาณมหาศาล เพื่อแก้ไขข้อจำกัดนี้ กองทัพอากาศจึงจำเป็นต้องพึ่งพาการวิจัยและพัฒนาภายในเพื่อสร้างระบบต้นแบบที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

โครงการวิจัยนี้ดำเนินขึ้นภายใต้กรอบความร่วมมือระหว่างกระทรวงกลาโหมแห่งราชอาณาจักรไทยและกระทรวงกลาโหมสหรัฐอเมริกา ในความตกลงว่าด้วยการแลกเปลี่ยนข้อมูลในการวิจัยและพัฒนา (Memorandum of Information Exchange Agreement: MIEA) ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการส่งเสริมความร่วมมือด้านกิจการกลาโหมและเปิดโอกาสให้เกิดการแลกเปลี่ยนข้อมูลเชิงลึกในระดับสากล ภายใต้ความตกลงนี้ โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และโรงเรียนนายเรืออากาศสหรัฐอเมริกาได้จัดทำแผนการแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านการวิจัยและพัฒนาในหัวข้อ "การตรวจจับจากระยะไกลสำหรับการป้องกันพื้นที่รอบฐานทัพ" ซึ่งเป็นการร่วมมือในด้านการรับรู้จากระยะไกลและการประมวลผลสัญญาณ ความร่วมมือนี้แสดงให้เห็นถึงความสนใจร่วมกันของทั้งสองประเทศในการพัฒนาเทคโนโลยีป้องกันฐานทัพ และยังเป็นช่องทางสำคัญในการแสวงหาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการกิจของกองทัพอากาศ โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะสร้างระบบป้องกันอากาศยานไร้คนขับต้นแบบสำหรับการป้องกันฐานบินของกองทัพอากาศเพื่อลดผลกระทบจากอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก โดยเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการออกแบบระบบสื่อสารด้วยอุปกรณ์วิทยุซอฟต์แวร์ (Software-Defined Radio) การประมวลผลสัญญาณ และความรู้ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ที่สำคัญที่สุดคือการสร้างองค์ความรู้และขีดความสามารถด้านเทคโนโลยีระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับให้เกิดขึ้นในองค์กร การที่กองทัพอากาศเลือกที่จะวิจัยและพัฒนาเองแทนที่จะพึ่งพาการจัดซื้อจากต่างประเทศนั้นเป็นยุทธศาสตร์ระยะยาวที่มุ่งมั่นในการสร้างบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ ทั้งนักเรียนนายเรืออากาศและข้าราชการ เพื่อให้สามารถบำรุงรักษา พัฒนาต่อยอด และปรับปรุงระบบได้อย่างอิสระในอนาคต ลดการพึ่งพิงซัพพลายเออร์จากภายนอก ซึ่งถือเป็นการลงทุนในทุนมนุษย์และอธิปไตยทางเทคโนโลยีที่สำคัญอย่างยิ่ง

1.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ใน [5] เป็นการสำรวจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์เทคโนโลยีต่อต้านโดรนที่ไม่ใช่การใช้อาวุธทางทหาร และได้จำแนกเทคโนโลยีดังกล่าวออกเป็นสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ การตรวจจับ (Detection), การระบุตัวตน (Identification) และ การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอแบบจำลองระบบต่อต้านโดรนในอุดมคติที่สามารถปรับใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการป้องกันสถานที่สาธารณะและเอกชน งานวิจัยนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการกำหนดกรอบความคิดและแนวทางการวิเคราะห์สำหรับระบบต่อต้านโดรน และยังได้กล่าวถึงความท้าทายในอนาคตที่อาจเกิดขึ้นจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีโดรนเอง เช่น กลไกด้านความปลอดภัยและมาตรการป้องกันที่อาจทำให้ระบบต่อต้านโดรนแบบปัจจุบันใช้การไม่ได้ ในขณะที่ [6] เป็นการศึกษาที่เน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการตรวจจับโดรนในทางปฏิบัติ งานวิจัยนี้นำเสนอเทคนิคการตรวจจับและติดตามโดรนโดยใช้การตรวจสอบสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency: RF) เพื่อถอดรหัสและดึงข้อมูล telemetry ของโดรนแบบเรียลไทม์ผ่านการถอดรหัสแพ็กเก็ต Drone ID ระบบที่นำเสนอในรายงานสามารถติดตามตำแหน่งของโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้งานได้จริงผ่านการทดสอบกับโดรนเชิงพาณิชย์ยอดนิยมหลายรุ่น เช่น DJI Mavic Air, DJI Mavic 2 Pro และ DJI Mavic 3 ซึ่งเป็นรุ่นที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในหมู่ผู้ใช้งานทั่วไปและมีชื่อเสียง งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำเทคโนโลยีการตรวจจับด้วยสัญญาณวิทยุมาใช้ในการจัดการกับภัยคุกคามจากโดรนในภาคพลเรือนได้อย่างเป็นรูปธรรม ในงานของ [7] ได้นำเสนอสองแนวทางแก้ไขปัญหาคritical ในด้านการประมวลผลสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งที่แม่นยำของโดรนในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน งานวิจัยหนึ่งมุ่งเน้นที่การพัฒนาอัลกอริทึมการประมาณทิศทางมาถิมาถึงของสัญญาณ (Direction of Arrival: DOA) สำหรับสัญญาณที่มีความ

สอดคล้องกัน (coherent signals) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในสภาพแวดล้อมที่มีการสะท้อนของสัญญาณหลายเส้นทาง (multi-path propagation) เพื่อแก้ปัญหานี้ งานวิจัยได้นำเสนอวิธีการที่ใช้การแยกส่วนประกอบแบบ QR decomposition เพื่อมาแทนที่การคำนวณที่ต้องใช้ทรัพยากรสูงอย่าง EVD/SVD ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณและเพิ่มความเร็วในการประมวลผล อีกทั้งนำเสนออัลกอริทึมที่รวดเร็วและมีความแม่นยำสูงสำหรับการประมาณค่าความแตกต่างของเวลาที่มาถึงของสัญญาณ (Time Difference of Arrival: TDOA) และความแตกต่างของความเร็ว (Velocity Difference of Arrival: VDOA) สำหรับสัญญาณกระโดดความถี่แบบกว้าง (wideband frequency hopping signals) ซึ่งเป็นเทคนิคที่โดรนใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนและเพิ่มความปลอดภัยในการสื่อสาร อัลกอริทึมนี้สามารถแก้ไขปัญหาวีธีแบบดั้งเดิมต้องการข้อมูลความถี่พาหะล่วงหน้าและมีความซับซ้อนในการคำนวณสูง โดยใช้วิธีการแบ่งสัญญาณออกเป็นช่วงย่อยตามช่วงเวลา และประเมินค่าความแตกต่างของเวลาในแต่ละส่วนด้วยอัลกอริทึม generalized cross-correlation ก่อนจะนำมาหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ least squares fitting มุ่งเน้นการออกแบบและนำระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับที่ใช้สัญญาณ RF ไปใช้งานจริงระบบนี้ใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ RF เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่ส่งออกมาจากคอนโทรลเลอร์ของโดรน โดยใช้ Universal Software Radio Peripheral (USRP) ที่ติดตั้งโปรแกรมเฉพาะ หลังจากตรวจจับได้ ระบบจะส่งสัญญาณรบกวนที่มีกำลังสูงมาก เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศยานไร้คนขับเชื่อมต่อกับคอนโทรลเลอร์ได้ การทำความเข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบนี้เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบระบบจำลองที่ครอบคลุมขั้นตอนการตรวจจับและการตอบโต้ [8] ศึกษาและวิเคราะห์วิธีการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับต่าง ๆ โดยเน้นการรับสัญญาณคลื่นวิทยุ (RF) งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นข้อดีของการตรวจจับด้วย RF ที่สามารถเข้าถึงอุปกรณ์ได้ง่าย ไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม และสามารถใช้เซ็นเซอร์ได้ตามต้องการ ใช้เทคโนโลยี SDR ในการตรวจจับ RF แบบผ่านทางที่ไม่ใช่พลังงานเพื่อตรวจจับสัญญาณในย่านความถี่ ISM (2.400-2.483 GHz และ 5.725-5.850 GHz) ที่โดรนเชิงพาณิชย์ใช้งาน เป็นแนวทางที่สำคัญ การวิเคราะห์ที่เน้นย้ำถึงศักยภาพของ SDR ในการพัฒนาโซลูชันที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่า ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญสำหรับงานวิจัยปัจจุบัน และ [9] ศึกษาการรับ-ส่งข้อมูลไร้สายระยะไกล และเน้นความสำคัญของการใช้สายอากาศที่มีการขยายสัญญาณสูงสำหรับการสื่อสารระยะไกล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การเพิ่มความแม่นยำในการติดตามคลื่นโดยการเลื่อนทิศทางของสายอากาศให้เข้ากับตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับอย่างแม่นยำ (Beam Steering) การปรับอัตราขยายสัญญาณสามารถทำให้ความกว้างของบีมเล็กลง ซึ่งนำไปสู่ความแม่นยำในการติดตามคลื่นที่สูงขึ้น งานวิจัยนี้ได้ทดสอบการใช้ Tracking Antenna โดยวางห่างจากอากาศยานไร้คนขับ 10 กิโลเมตร และพบว่าสามารถรับข้อมูลได้ตลอดเวลา แต่มีบางช่วงที่สัญญาณภาพขาดหาย การศึกษาเรื่องนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความท้าทายและโอกาสในการขยายระยะการตรวจจับ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบตรวจจับที่มีประสิทธิภาพในสถานการณ์จริง

งานวิจัยนี้ได้เน้นเข้าไปในส่วนของการ Detection จากกรอบทฤษฎีระบบต่อต้านโดรน 3 องค์ประกอบ (Detection-Identification-Neutralization) โดยเฉพาะการจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทาง เป็นการจำลองล่วงหน้าก่อนการใช้งานจริง โดยได้พัฒนาแพลตฟอร์มจำลองด้วย MATLAB เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ต่อยอดทฤษฎี DOA และ TDOA algorithms ด้วยการเปรียบเทียบระบบสายอากาศในคุณลักษณะต่างๆ การสร้างระบบจำลองนี้ช่วยลดความเสี่ยงและต้นทุนในการทดสอบ อีกทั้งยังได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการจัดวางสายอากาศแบบต่างๆ อย่างเป็นระบบ ผ่านการใช้เทคโนโลยี Software-Defined Radio มาใช้ในการสร้างต้นแบบฮาร์ดแวร์ โดยใช้ USRP NI-2901 และ E312 ที่ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz ซึ่งเป็นความถี่หลักที่โดรนเชิงพาณิชย์ใช้ ร่วมกับแนวคิด tracking antenna มาพัฒนาเป็นระบบสายอากาศแบบที่มีการหมุน แพลตฟอร์มจำลอง MATLAB ที่ใช้สร้างโมดูลการจำลองที่ครอบคลุมทั้ง UAV Model, Antenna Model, Simulation และ Processing เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ในการวิจัยต่อไป

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 สร้างระบบต้นแบบในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่มีข้อมูลด้านสัญญาณในฐานะข้อมูล ด้วยการดักจับสัญญาณวิทยุและเปรียบเทียบอัตลักษณ์ของสัญญาณ โดยมีวิทยุซอฟต์แวร์เป็นอุปกรณ์ศูนย์กลางในภาครับ-ส่ง

2.2 ตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบต้นแบบ ในด้านระยะการตรวจจับและความแม่นยำในการตรวจจับ นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพ และวิเคราะห์สัดส่วนของต้นทุนและประสิทธิภาพของระบบ

2.3 ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการพัฒนาต่อยอดสู่อุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้จริง ด้วยการใช้อุปกรณ์ทางสัญญาณที่มีราคาไม่แพงและสามารถผลิตได้ในราคาถูก รวมถึงการบูรณาการเข้ากับระบบตรวจจับ

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ

3.1.1 องค์ประกอบของระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ [10]

ระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 4 ส่วน [11] ได้แก่

- *RF Signal* คือสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 GHz ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างโดรนและอุปกรณ์ควบคุม [12]

- *Antenna* อุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุ

- *SDR (Software-Defined Radio)* แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลเพื่อประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ SDR เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยให้ระบบมีต้นทุนต่ำและยืดหยุ่น ตัวอย่างที่ใช้คือ USRP NI-2901 และ USRP E312

- *Processing* วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณ RF เพื่อตรวจจับและระบุตำแหน่ง UAVs

3.2 ทฤษฎีสายอากาศและพารามิเตอร์

สายอากาศทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการส่งและกลับกันสำหรับการรับ การเลือกและออกแบบสายอากาศที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับ สามารถแบ่งสายอากาศตามรูปแบบการรับ-ส่งคลื่นได้ดังนี้ [13]

1. สายอากาศแบบรอบตัว (Omni-Directional) รับ-ส่งคลื่นได้ดีในทุกทิศทางโดยเฉลี่ย กระจายสัญญาณในแนวนอน 360 องศา ส่วนแนวตั้งขึ้นอยู่กับการขยาย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ที่ 2-18 dBi

2. สายอากาศแบบกึ่งทิศทาง (Semi-Directional) เช่น Dipole, Patch Panel, Sector รับ-ส่งคลื่นได้ดีเกือบรอบตัวแต่มีอัตราขยายสูงกว่าแบบรอบตัว การแพร่กระจายคลื่นเน้นไปในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ

3. สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Directional) เช่น Yagi-Uda, Helical, Grid รับ-ส่งคลื่นได้ดีในทิศทางที่กำหนด มีอัตราขยายสูงกว่าประเภทอื่น (ส่วนใหญ่สูงกว่า 20 dBi) การแพร่กระจายสัญญาณด้านหลังและด้านข้างจะน้อยมาก

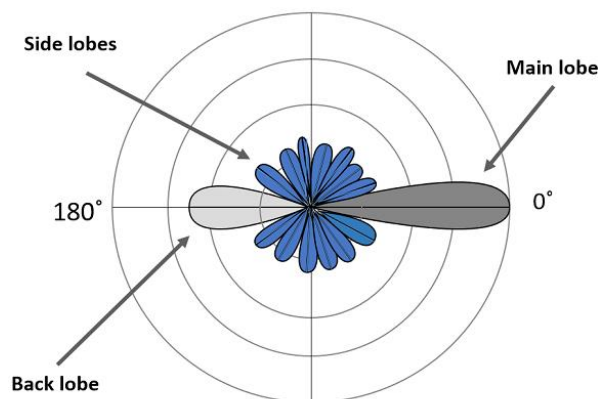
3.2.1 พารามิเตอร์สำคัญของสายอากาศมีดังนี้ [14], [15], [16], [17]

- (1) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Antenna Radiation Pattern) แสดงการกระจายพลังงานของสายอากาศ ประกอบด้วย โลบหลัก (Main Lobe) โลบด้านหลัง (Back Lobe) และโlobด้านข้าง (Side Lobe) การลดขนาดของโlobด้านข้างและด้านหลัง (น้อยกว่า -20 dB) เป็นสิ่งสำคัญเพื่อลดการรบกวน

- (2) ตำแหน่งมุมกวาดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่กำลังครึ่งหนึ่ง (HPBW) คือมุมที่ค่าความเข้มของสัญญาณลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด HPBW ที่แคบลงบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการระบุทิศทางที่สูงขึ้น

(3) อัตราขยาย (Gain) ความสามารถของสายอากาศในการรับหรือส่งคลื่นวิทยุ การเพิ่มอัตราขยายช่วยเพิ่มระยะการตรวจจับและความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง

(4) บริเวณรอบตัวสายอากาศ แบ่งเป็น สนามระยะใกล้เชิงรีแอกทีฟ สนามแพร่กระจายระยะใกล้และสนามแพร่กระจายระยะไกล สนามระยะใกล้ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศ



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ

3.3 สมการการส่งผ่านของ Friis (Friis Transmission Equation)

สมการ Friis Transmission Equation ถูกค้นพบโดย Harold T. Friis [18] ในปี ค.ศ. 1946 ใช้ในการคำนวณแรงสัญญาณที่ได้รับในระบบสื่อสารไร้สาย สมการนี้พิจารณาค่ากำลังส่งของสัญญาณ RF ค่าความเข้มของสัญญาณที่ตัวรับสัญญาณได้รับ ความถี่ของสัญญาณ RF ค่าความเร็วของแสงในสภาวะที่ว่างเปล่าและระยะทางระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (1)$$

โดยที่ P_r คือ กำลังของสัญญาณที่ได้รับที่อุปกรณ์รับสัญญาณ ในหน่วยวัตต์ P_t คือ กำลังของสัญญาณที่ส่งออกจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ในหน่วยวัตต์ G_t คือ อัตราขยายของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ G_r คือ อัตราขยายของอุปกรณ์รับสัญญาณ λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ ในหน่วยเมตร (m) และ d คือ ระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ส่งและอุปกรณ์รับ ในหน่วยเมตร (m) สมการ Friis Transmission Equation เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่สำคัญในวิศวกรรมสื่อสารไร้สาย ใช้สำหรับคำนวณกำลังสัญญาณที่ได้รับ โดยอาศัยการพิจารณาปัจจัยหลักหลายประการเพื่อทำความเข้าใจการสูญเสียพลังงานของสัญญาณในห้วงอากาศอิสระ (Free Space Path Loss) โดยละเอียด การแปรผันในแต่ละตัวแปรของสมการส่งผลโดยตรงต่อความแรงของสัญญาณที่เครื่องรับจะได้รับ กำลังส่งและอัตราขยายของสายอากาศส่งทำหน้าที่เป็นตัวแปรเชิงบวก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าเหล่านี้จะช่วยให้สัญญาณเดินทางไปได้ไกลขึ้นหรือมีความเข้มข้นในทิศทางที่กำหนดมากขึ้น ทำให้กำลังที่ได้รับที่เครื่องรับสูงขึ้น ในทำนองเดียวกัน อัตราขยายของสายอากาศรับก็มีบทบาทสำคัญในการดึงดูดพลังงานจากสัญญาณที่เดินทางมาถึง ยิ่งค่าอัตราขยายสูงเท่าไรสายอากาศก็จะยังสามารถแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีขึ้นเท่านั้น ในทางกลับกัน ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองและความยาวคลื่นจะส่งผลต่อกำลังที่ได้รับในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระยะห่างที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กำลังสัญญาณที่ได้รับลดลงอย่างรวดเร็วเป็นสัดส่วนผกผันกับกำลังสองของระยะทาง ($1/d^2$) ซึ่งหมายความว่าหากระยะทางเพิ่มขึ้นสองเท่า กำลังที่ได้รับจะลดลงเหลือเพียงหนึ่งในสี่เท่านั้น นอกจากนี้ การแปรผันของความยาวคลื่นยังส่งผลต่อการสูญเสียสัญญาณอีกด้วย โดยสมการแสดงให้เห็นว่ายิ่งความยาวคลื่นของสัญญาณยาว

เท่าไร การสูญเสียพลังงานในอากาศก็จะยิ่งน้อยลงเท่านั้น ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่ความถี่ต่ำ (ความยาวคลื่นยาว) ที่เหนือกว่าในระยะทางไกลเมื่อเทียบกับความถี่สูง

3.4 การเปรียบเทียบวิธีการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ

ตารางที่ 1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจจับอากาศยานในรูปแบบต่าง ๆ [19]

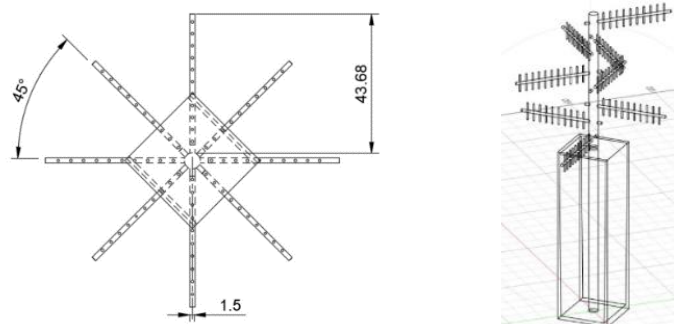
วิธีการ	ประสิทธิภาพ	ข้อจำกัด
การตรวจจับด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF Detection)	-ระยะหวังผลประมาณ 3.5 กม. สามารถบอกพิกัดทั้งผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับและตัวอากาศยานไร้คนขับ ง่ายต่อการถูกรบกวน	-ต้องการสัญญาณความถี่วิทยุที่ครอบคลุม มีการปรับปรุงระบบให้ทันสมัยต่ออากาศยานไร้คนขับ
เรดาร์ (Radar)	-ตรวจจับได้ไกล 9 กม. ทำงานได้ตลอด 24 ชม.	-ยากต่อการตรวจจับอากาศยานที่ใช้เพดานบินต่ำ ปัญหาในการจำแนกวัตถุขนาดเล็กที่ใกล้เคียงกับอากาศยานไร้คนขับ
ตรวจจับด้วยเสียง (Acoustic)	-สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ นอกเหนือสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ	-ระยะตรวจจับที่จำกัด (100 ม.) เสียงรบกวนจากบริเวณที่มีเสียงดัง
อินฟราเรด (Infrared)	-สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ นอกเหนือสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ ระยะหวังผล 3 กม.	-อากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กส่วนใหญ่แผ่ความร้อนน้อย ถูกรบกวนได้ด้วยหมอก ฝน
มองเห็นด้วยสายตา (eye's vision)	-สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ นอกเหนือสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ พิสัยน์ทราบได้ในระยะที่สามารถมองเห็น	-คนต้องเฝ้าตรวจท้องฟ้าอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถมองได้ในเวลากลางคืนหรือในที่ที่มีทัศนวิสัยต่ำ

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์และการติดตั้งเพื่อทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สายอากาศแบบระบุทิศทางจำนวน 2 แบบคือ สายอากาศแบบยาگی-ยูดา และสายอากาศแบบ Microstrip patch โดยมีคุณสมบัติดังนี้ 1) แบบยาگی-ยูดา ความถี่ 2.4 GHz กำลังขยาย 18 dBi ความกว้างลำคลื่น 15 องศา และ 2) แบบ Microstrip patch ความถี่ 2.4 GHz และ 5.8 GHz กำลังขยาย 8 dBi และ 12 dBi ตามลำดับ โดยมีความกว้างลำคลื่น 60 องศา โดยคณะผู้วิจัยทำการออกแบบให้ติดตั้งสายอากาศบนเสาซึ่งมีความสูง 1.8 เมตร โดยสามารถติดตั้งสายอากาศให้ครอบคลุมพื้นที่ตรวจการณ์ทั้งหมดตามแนวระนาบ ได้ตั้งแต่ 1 – 8 หน่วย ซึ่งรูปที่ 4.1 ได้แสดงการติดตั้งสายอากาศแบบยาگیจำนวน 8 หน่วย สำหรับการติดตั้งสายอากาศแบบ patch antenna จะสามารถติดตั้งได้สูงสุด 4 หน่วยเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซ้อนทับของลำคลื่น อีกทั้งการลดจำนวนในขั้นตอนนี้ยังลดความซับซ้อนของระบบ การใช้สายอากาศและตัวรับสัญญาณน้อยลงส่งผลให้ความซับซ้อนในขั้นตอนการติดตั้ง การเชื่อมต่อสายสัญญาณและการประมวลผลข้อมูลเบื้องต้นลดลงอย่างมาก ซึ่งช่วยให้การวิจัยสามารถมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและปรับปรุงอัลกอริทึมการจำลองได้อย่างเต็มที่ มีประสิทธิภาพเชิงต้นทุน การลดจำนวนอุปกรณ์ลงช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านฮาร์ดแวร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้โครงการวิจัยสามารถดำเนินการได้ภายในงบประมาณที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับงานวิจัยในระยะเริ่มต้นและเพียงพอต่อการทดสอบแนวคิด ระบบ 4 หน่วย เพียงพอที่จะสาธิตการทำงานของอัลกอริทึม Triangulation ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดย

ระบบยังคงสามารถรับสัญญาณจากเป้าหมายในแนวระนาบได้อย่างน้อยสองจุดที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของเป้าหมายได้ตามหลักการที่วางไว้



รูปที่ 2 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์เบื้องต้น



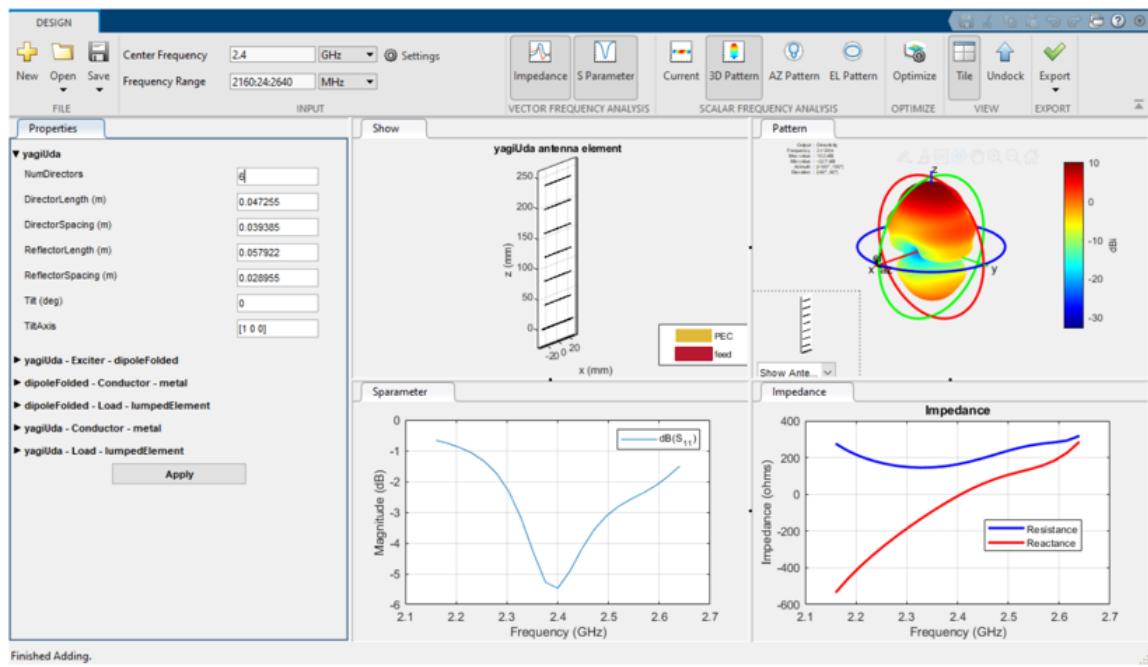
รูปที่ 3 การทดสอบสายอากาศ

การตัดสินใจเลือกชนิดของสายอากาศเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อความแม่นยำและประสิทธิภาพในการตรวจจับและการระบุตำแหน่ง ในขั้นตอนการศึกษาเบื้องต้น คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศหลายชนิด ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการทดสอบสายอากาศชนิดแพทช์แบบเดี่ยว (Single Patch Antenna) และสายอากาศชนิดยาคีแบบเดี่ยว (Single Yagi Antenna) การพิจารณาเชิงเทคนิคของสายอากาศทั้งสองชนิดพบว่าสายอากาศชนิดแพทช์มีข้อได้เปรียบในเรื่องของขนาดที่กะทัดรัดและน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับการติดตั้งในพื้นที่จำกัด แต่มีข้อจำกัดด้านอัตราขยาย (Gain) ที่ค่อนข้างต่ำและมีค่ามุมป้อมที่กว้าง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ทำให้ความสามารถในการระบุทิศทางเฉพาะเจาะจงของสัญญาณลดลง ในทางกลับกัน สายอากาศชนิดยาคี (Yagi-Uda antenna) แม้จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าและมีขนาดใหญ่กว่า แต่ให้ข้อได้เปรียบเชิงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยมีอัตราขยายที่สูงกว่าและมีค่ามุมป้อมที่แคบกว่า ทำให้สามารถเน้นการรับสัญญาณจากทิศทางที่เฉพาะเจาะจงได้ดีเยี่ยม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องอาศัยการระบุทิศทางของเป้าหมายด้วยความแม่นยำสูงและยังได้ใช้เป็นแบบจำลองหลักในการพัฒนาโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองการระบุทิศทางด้วยวิธี Triangulation เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงสุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ การติดตั้งระบบฮาร์ดแวร์เพื่อทดสอบ การทดสอบสายอากาศชนิดต่าง ๆ และการทดสอบระบบโดยรวม การทดสอบเหล่านี้มีความสำคัญในการยืนยันประสิทธิภาพของส่วนประกอบแต่ละชิ้นและการทำงานร่วมกันของระบบก่อนนำไปใช้ในการจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

4.2 การสร้างโปรแกรมจำลองสายอากาศและการระบุทิศทางของเป้าหมาย

4.2.1 โปรแกรมจำลองระบบสายอากาศ

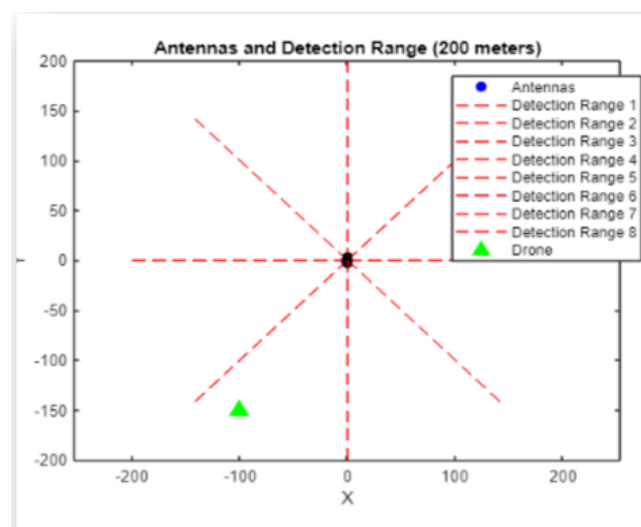
การจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทางดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 4 โปรแกรมนี้ช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองพฤติกรรมการแผ่คลื่นของสายอากาศในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้



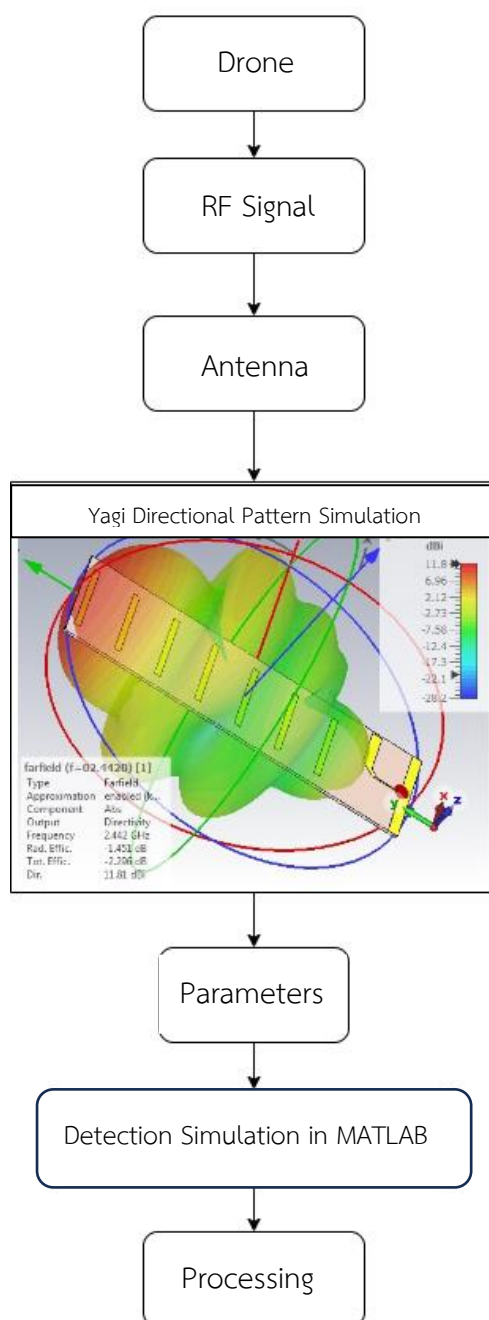
รูปที่ 4 การจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทางด้วยโปรแกรม MATLAB

4.2.2 การจำลองการระบุทิศทางด้วยสายอากาศแบบระบุทิศทางโดยวิธี Triangulation

การระบุทิศทางของเป้าหมายใช้ระเบียบวิธี Triangulation ซึ่งมีการออกแบบระบบจำลองการระบุทิศทางสองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5 วิธีนี้อาศัยการวัดสัญญาณจากหลายตำแหน่งเพื่อหาพิกัดของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานในการระบุตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 5 การออกแบบระบบจำลองการระบุทิศทาง



รูปที่ 6 แผนการสร้างโปรแกรมจำลองสำหรับระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ

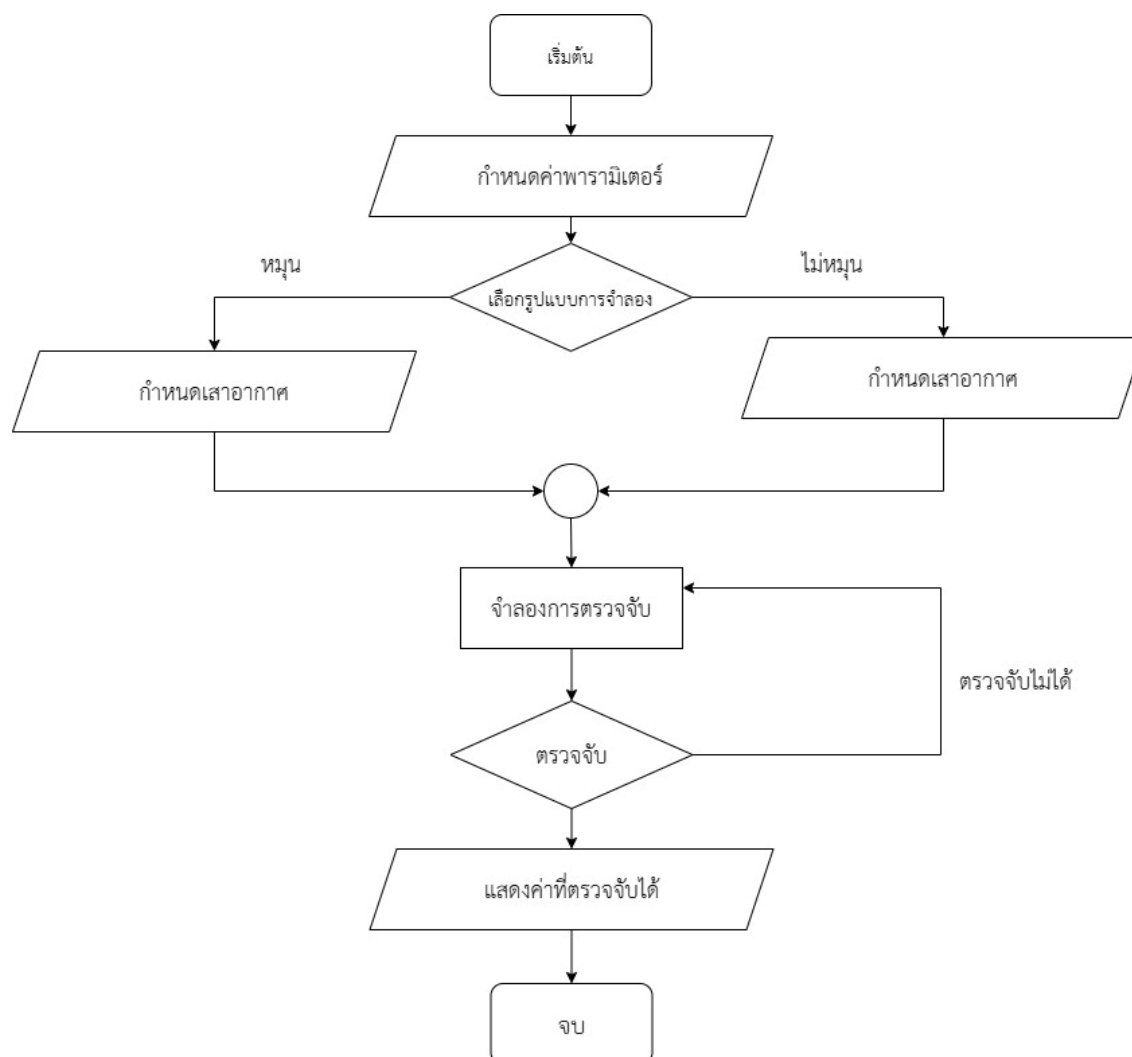
4.3 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมการจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทาง สำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ

จากรูปที่ 6 ซึ่งแสดงกระบวนการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ คณะผู้วิจัยให้ความสำคัญในส่วนของการประมวลผล จึงเลือกที่จะพัฒนาโปรแกรมจำลองสำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ การมุ่งเน้นที่การจำลองการประมวลผลนี้ช่วยให้สามารถทดสอบและปรับปรุงอัลกอริทึมการตรวจจับได้อย่างละเอียดก่อนนำไปใช้กับระบบฮาร์ดแวร์จริง ตามกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย 1) แหล่งกำเนิดสัญญาณ — การสื่อสารของโดรน โดรนเกือบทุกประเภทในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นโดรนเพื่อการพาณิชย์ หรืองานอดิเรก ล้วนต้องพึ่งพาการสื่อสารแบบไร้สายด้วยคลื่นวิทยุเพื่อรับคำสั่งและส่งข้อมูลกลับมายังรีโมทควบคุม สัญญาณเหล่านี้แบ่งออกเป็นประเภทหลักตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ การควบคุม (Control) เป็นสัญญาณที่ส่งจากรีโมทควบคุมไปยังโดรน เพื่อสั่งการบิน, การเคลื่อนที่,

หรือการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมต่างๆ โดรนจะรับคำสั่งจากสัญญาณนี้และตอบสนองตามที่คุณต้องการ การส่งข้อมูล (Telemetry) โดรนจะส่งข้อมูลสถานะการบินกลับมายังรีโมทควบคู่อย่างต่อเนื่อง ข้อมูลเหล่านี้รวมถึงพิกัดตำแหน่ง (จาก GPS/GNSS) ความเร็ว ระดับความสูง และสถานะของแบตเตอรี่ การส่งภาพวิดีโอ (First Person View - FPV) สำหรับโดรนที่มีกล้องติดตั้ง จะมีการส่งสัญญาณวิดีโอแบบสดกลับมาเพื่อให้ผู้ควบคุมมองเห็นภาพจากมุมมองของโดรนได้แบบเรียลไทม์ 2) ส่วนรับสัญญาณ — บทบาทของสายอากาศระบุทิศทาง การเลือกใช้สายอากาศระบุทิศทางในระบบตรวจจับโดรนมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากคุณสมบัติทางเทคนิคที่ตอบโจทย์ความต้องการของระบบโดยตรง อาทิ กำลังขยาย (Gain) และทิศทาง (Directivity) ซึ่งหมายถึงความสามารถในการเพิ่มความแรงของสัญญาณที่รับหรือส่งในทิศทางเฉพาะ ค่า Gain ที่สูงนี้จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการตรวจจับสัญญาณที่อ่อนมากๆ จากโดรนที่อยู่ห่างไกลออกไปหลายกิโลเมตร นอกจากนี้ คุณสมบัติในการมีทิศทางยังช่วยให้ระบบสามารถแยกแยะแหล่งกำเนิดสัญญาณได้แม่นยำขึ้น และความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) Gain ที่สูงของสายอากาศจะมาพร้อมกับความกว้างลำคลื่นที่แคบลง การที่ลำคลื่นแคบนี้ทำให้ระบบสามารถระบุทิศทางของโดรนได้แม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของเทคนิคการระบุตำแหน่งแบบ Angle of Arrival (AoA) 3) การวิเคราะห์พารามิเตอร์และการจำลองทางวิศวกรรม ก่อนที่จะทำการทดลองกับระบบจริง การจำลองด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะทาง เป็นขั้นตอนที่ขาดไม่ได้ในกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม การจำลองช่วยให้นักออกแบบสามารถทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพของเสาอากาศในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการสร้างชิ้นงานต้นแบบทางกายภาพลงได้อย่างมาก พารามิเตอร์ต่างๆ นั้นเป็นมาตรวัด "คุณภาพ" ของสายอากาศที่ใช้ในการตรวจจับโดรนอย่างแท้จริง ค่าที่เหมาะสมจะรับประกันได้ว่าเสาอากาศมีประสิทธิภาพในการ "ฟัง" สัญญาณที่เข้ามาและบ่งบอกถึงความสามารถในการ "ได้ยิน" สัญญาณที่อ่อนมากๆ จากโดรนที่อยู่ห่างไกลในทิศทางที่เจาะจงได้ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio - SNR) ได้อย่างมีนัยสำคัญ และขยายระยะการตรวจจับให้กว้างขึ้น 4) การจำลองการตรวจจับโดรนใน MATLAB หลังจากที่ได้ออกแบบและวิเคราะห์เสาอากาศในระดับขั้นสูงแล้ว ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการจำลองในระดับระบบที่ซับซ้อนขึ้นด้วยซอฟต์แวร์เช่น MATLAB ขั้นตอนนี้คือจุดที่การจำลองเสาอากาศมาบรรจบกับการจำลองการทำงานของโดรนและระบบตรวจจับทั้งหมด MATLAB และ Simulink มีเครื่องมือเฉพาะทางที่ช่วยให้สามารถจำลองการทำงานของระบบตรวจจับโดรนได้อย่างครอบคลุม การรวมกันของ RF Blockset และ UAV Toolbox ใน MATLAB แสดงให้เห็นถึงแนวคิดของการจำลองในหลายระดับ (Multi-Fidelity Simulation) นักวิจัยสามารถเริ่มต้นด้วยการจำลองแบบง่ายๆ ที่ใช้ทรัพยากรน้อยเพื่อทดสอบอัลกอริทึมพื้นฐานได้อย่างรวดเร็ว (Low-Fidelity) จากนั้นจึงค่อยพัฒนาไปสู่การจำลองที่ซับซ้อนและสมจริงสูง (High-Fidelity) โดยใช้สภาพแวดล้อมที่เหมือนจริงจาก Unreal Engine ขั้นตอนนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการทดสอบความแข็งแกร่งของระบบในสถานการณ์ที่ไม่คาดคิดก่อนที่จะนำไปใช้จริง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและค่าใช้จ่ายในการพัฒนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ 5) การประมวลผลสัญญาณขั้นสูงเพื่อการระบุตำแหน่ง ขั้นตอน "Processing" ในไดอะแกรมไม่ได้หมายถึงเพียงการตรวจจับสัญญาณว่ามีหรือไม่มีเท่านั้น แต่คือกระบวนการแปลงข้อมูลคลื่นวิทยุดิบที่ได้รับจากเสาอากาศให้กลายเป็นข้อมูลที่มีความหมายและนำไปใช้ในการระบุตัวตนและตำแหน่งของโดรนได้ หัวใจสำคัญของขั้นตอนนี้คือการแยกแยะสัญญาณของโดรนออกจากสัญญาณรบกวนจำนวนมากที่ลอยอยู่ในอากาศ การทำ FFT (Fast Fourier Transform) การวิเคราะห์ลายเซ็น (Signature Analysis) การระบุตำแหน่ง (Localization) ด้วย Angle of Arrival (AoA) Triangulation และการใช้ Time Difference of Arrival (TDoA)

4.4 การออกแบบโปรแกรมการจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทาง สำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ

การออกแบบโค้ดในโปรแกรม MATLAB แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลักตามโมเดล ดังต่อไปนี้ *UAV Model* ส่วนนี้จำลองการบินของอากาศยานไร้คนขับตามพิกัดของจุดที่กำหนด (Waypoints) โดยรับข้อมูลเวลาที่ใช้ในการบิน ความเร็วของอากาศยาน และอัตราการสุมตัวอย่างในการจำลอง (เฟรมเรท) มีการใช้ Cell Array เพื่อเก็บข้อมูลการบินและพิกัดของอากาศยานไร้คนขับที่แตกต่างกันในแต่ละ Waypoint *Antenna Model* ส่วนนี้ทำหน้าที่กำหนดค่าและตำแหน่งของสายอากาศ มีการคำนวณค่ารัศมีของสายอากาศ กำหนดมุมของสายอากาศทั้งหมดเป็น 45 องศา และคำนวณตำแหน่งของสายอากาศทั้งสี่ตัวโดยใช้ฟังก์ชันตรีโกณมิติเพื่อกำหนดค่า X และ Y *Simulate* ส่วนนี้จำลองเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดขนาดของพื้นที่จำลองเป็น 30x30 หน่วย และเริ่มต้นการจำลองโดยใช้โมดูล SimInitiator *WaypointsArray* การจำลองแบ่งเป็นสถานะนิ่ง (Static Simulation) โดยตั้งค่าการหมุนของวัตถุเป็น 0 และสถานะเคลื่อนไหว (Dynamic Simulation) โดยตั้งค่าการหมุนของวัตถุเป็น 90 องศา *Processing* ส่วนนี้ประมวลผลเพื่อนับจำนวนการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ โดยเตรียมตัวแปร found เพื่อนับจำนวนการตรวจจับที่พบและวนลูปตามจำนวนเฟรม มีการอัปเดตตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับในกราฟิกหาก visual เป็น true



รูปที่ 7 Flowchart ขั้นตอนการสร้างโปรแกรมจำลองสำหรับระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ

4.5 แผนการสร้างโปรแกรมการจำลองระบบสายอากาศแบบระบุทิศทาง สำหรับการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสัญญาณวิทยุ

รูปที่ 7 แสดงแผนการสร้างโปรแกรมจำลองสำหรับระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับเพื่ออธิบายขั้นตอนการดำเนินงานอย่างเป็นระบบ ซึ่งช่วยให้การพัฒนาโปรแกรมจำลองเป็นไปอย่างมีทิศทางและมีประสิทธิภาพ แผนภาพนี้นำเสนอแสดงถึงระเบียบวิธีที่ครอบคลุมสำหรับการพัฒนาโปรแกรมจำลองเพื่อการวิเคราะห์ระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เริ่มต้นด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของสถานการณ์จำลอง ซึ่งครอบคลุมทั้งลักษณะของระบบตรวจจับและคุณสมบัติของเป้าหมาย โดยมีการระบุค่าต่างๆ เช่น ระยะการตรวจจับ มุมปมวัดทิศทางและทิศทางของเสาอากาศ รวมถึงพลศาสตร์การบินของโดรน อันได้แก่ ระยะเวลา ความเร็ว เส้นทาง และจำนวนของโดรน จากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการเลือกรูปแบบการจำลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือแบบคงที่ (Non-Rotation) และแบบหมุน (Rotation) ซึ่งการเลือกรูปแบบนี้จะส่งผลต่อการกำหนดพิกัดของเสาอากาศที่ใช้ในกระบวนการจำลองต่อไป

เมื่อเข้าสู่กระบวนการจำลองหลัก ระบบจะดำเนินงานแบบวนซ้ำ (iterative) เพื่อจำลองการตรวจจับโดรนอย่างต่อเนื่อง ในแต่ละรอบการจำลอง โปรแกรมจะตรวจสอบว่าเสาอากาศสามารถตรวจจับสัญญาณของโดรนได้หรือไม่ หากไม่พบสัญญาณ ระบบจะทำการปรับปรุงพิกัดของโดรนและเสาอากาศเพื่อดำเนินการในรอบถัดไป แต่หากมีการตรวจจับที่สำเร็จ ระบบจะแสดงผลข้อมูลการตรวจจับที่ได้ พร้อมทั้งบันทึกผลลัพธ์ในแต่ละเฟรมที่เพิ่มขึ้น การวนซ้ำนี้จะดำเนินต่อไปจนกว่าโดรนจะบินถึงตำแหน่งสุดท้ายตามที่กำหนดไว้ในสถานการณ์จำลอง ซึ่งกระบวนการที่ถูกออกแบบมาอย่างเป็นระบบนี้ช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบตรวจจับได้อย่างละเอียดในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงที่ถูกควบคุมอย่างแม่นยำ

5. ผลการวิจัย

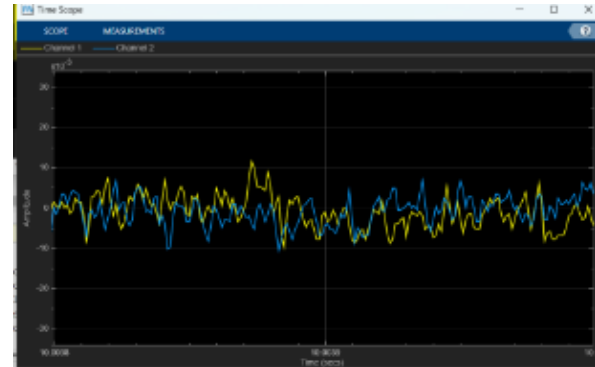
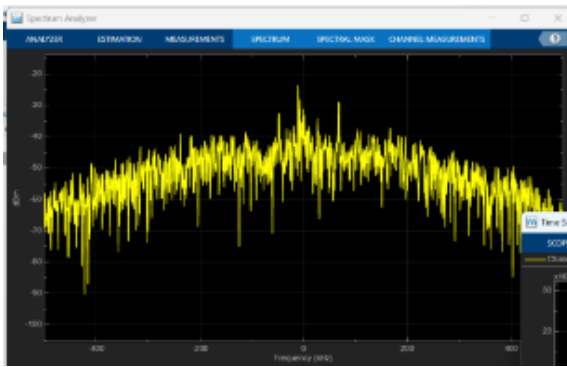
การวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการจำลองและทดสอบระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ โดยการจำลองสภาพแวดล้อมที่หลากหลายและใกล้เคียงกับสภาพจริง เพื่อให้สามารถทดสอบและปรับปรุงระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในสถานการณ์ต่าง ๆ

5.1 ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1.1 ผลการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ต้นแบบ

การทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ต้นแบบได้ดำเนินการในสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อประเมินความสามารถในการตรวจจับสัญญาณ ดังรูปที่ 8 ผลการทดสอบฮาร์ดแวร์เหล่านี้ยืนยันความสามารถพื้นฐานของระบบในการรับและประมวลผลสัญญาณจาก UAVs ในระยะและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาแบบจำลองซอฟต์แวร์ เริ่มต้นด้วยการทดสอบระบบฮาร์ดแวร์ต้นแบบเพื่อยืนยันความสามารถพื้นฐานในการรับและประมวลผลสัญญาณวิทยุจาก UAV ในระยะและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน การทดสอบได้ดำเนินการในสถานการณ์ที่หลากหลาย โดยมีทั้งการใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง (omnidirectional antenna) และแบบระบุทิศทาง (directional antenna)

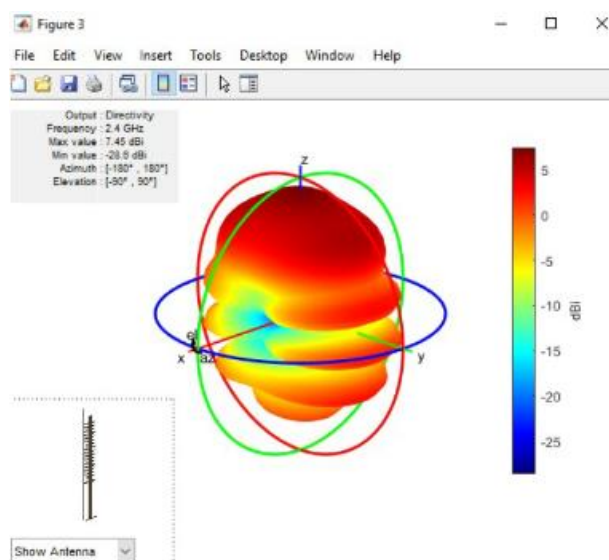
ผลการทดสอบเชิงประจักษ์แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแบบรอบทิศทางสามารถตรวจจับสัญญาณได้จากทุกทิศทาง โดยไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ UAV หรือผู้ควบคุม ในขณะที่การใช้สายอากาศแบบระบุทิศทางแสดงให้เห็นว่าการตรวจจับสัญญาณจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณ (UAV หรือผู้ควบคุม) อยู่ในแนวลำคลื่นหลัก (main lobe) ของสายอากาศเท่านั้น ผลการทดสอบเหล่านี้จึงยืนยันว่าฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพพื้นฐานที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน และเป็นรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาแบบจำลองเชิงซอฟต์แวร์เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในสถานการณ์ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นต่อไป



รูปที่ 8 แสดงการตรวจจับสัญญาณด้วยสายอากาศแบบรอบทิศทางและแบบระบุทิศทาง

5.1.2 การจำลองสายอากาศและการระบุทิศทางของเป้าหมาย

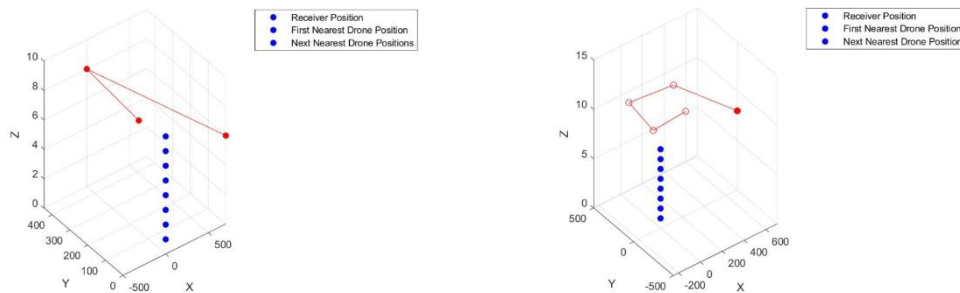
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบการจำลองสายอากาศแบบระบุทิศทาง ซึ่งแสดงค่า Directivity ที่ความถี่ 2.4 GHz โดยมีค่าสูงสุด 7.45 dBi และค่าต่ำสุด -28.6 dBi ค่า Azimuth อยู่ระหว่าง -180 ถึง 180 องศา และ Elevation อยู่ระหว่าง -90 ถึง 90 องศา การจำลองนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมของการแผ่คลื่นของสายอากาศได้อย่างแม่นยำในสภาพแวดล้อมเสมือนจริง ค่า Directivity สูงสุดที่สูงถึง 7.45 dBi บ่งชี้ว่าสายอากาศมีการรวมพลังงานในทิศทางเฉพาะที่สูงมาก ซึ่งส่งผลให้มีลำคลื่นหลักที่แคบและมีอัตราขยายสูง เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการระบุและติดตามเป้าหมายในทิศทางที่เฉพาะเจาะจง ในขณะที่ค่า Directivity ต่ำสุดที่ -28.6 dBi สะท้อนให้เห็นถึงระดับของลำคลื่นข้าง (side lobes) ที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับลำคลื่นหลัก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการลดการรับสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่อยู่นอกพื้นที่เป้าหมาย การจำลองนี้จึงยืนยันว่าการออกแบบสายอากาศมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานตรวจจับแบบระบุทิศทางและมีความสามารถในการแยกแยะสัญญาณเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 9 ผลการทดสอบการจำลองสายอากาศแบบระบุทิศทาง

รูปที่ 10 แสดงผลการตรวจจับตำแหน่งของเป้าหมายจากระบบสายอากาศที่ได้จำลองไว้ การจำลองนี้ยืนยันว่าระบบสามารถระบุตำแหน่งของ UAVs ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบตรวจจับ

เพื่อตรวจสอบความสามารถของระบบในการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย ได้มีการจำลองกระบวนการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลจากระบบสายอากาศที่ได้จำลองไว้ก่อนหน้านี้ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการกำหนดตำแหน่งของผู้รับ (Receiver Position) และตำแหน่งของ UAV (Drone Position) ได้อย่างชัดเจน การจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถใช้ข้อมูลเชิงทิศทางที่ได้จากสายอากาศเพื่อระบุพิกัดของ UAV ในพื้นที่การตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการพัฒนาเป็นระบบตรวจจับที่สมบูรณ์แบบในอนาคต



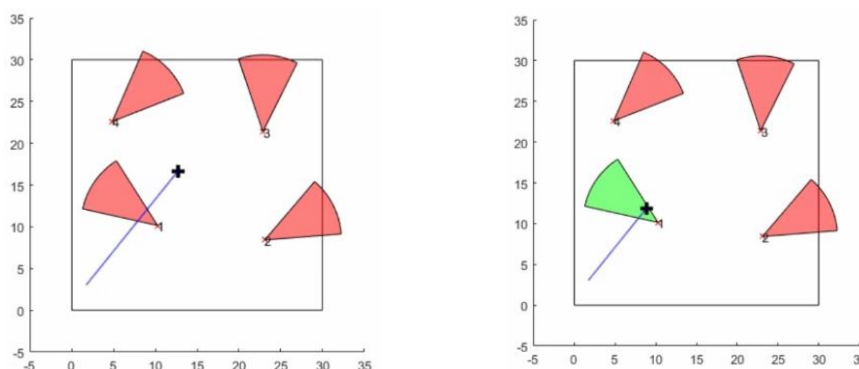
รูปที่ 10 ผลการตรวจจับตำแหน่งของเป้าหมายจากระบบสายอากาศที่ได้จำลองไว้

5.1.3 การจำลองระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับด้วยสายอากาศแบบระบุทิศทาง

การวิจัยได้ดำเนินการจำลองเชิงลึกเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การทำงานที่ต่างกันต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานร่วมกันสำหรับทุกโมเดล ได้แก่ ระยะเวลาตรวจจับ (Radius) 250 เมตร, พื้นที่การตรวจจับ (Field of Interest) 1,000×1,000 เมตร และพารามิเตอร์ของ UAV ที่กำหนดให้มีความเร็ว 10 เมตร/วินาที และระยะเวลาบิน 16 วินาที การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละโมเดลจะจำกัดเฉพาะพารามิเตอร์ของสายอากาศเท่านั้น เพื่อให้สามารถแยกแยะผลกระทบของปัจจัยแต่ละอย่างได้อย่างชัดเจน โดยมุ่งเน้นการสร้างและทดสอบโมเดลที่สามารถจำลองพารามิเตอร์ของระบบสายอากาศ พารามิเตอร์ของอากาศยานไร้คนขับ และพื้นที่ของการตรวจจับ โมเดลการทดลองแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ Static Homogeneous, Static Heterogeneous, Dynamic Homogeneous และ Dynamic Heterogeneous

5.1.3.1 Static Homogeneous

รูปที่ 11 แสดงโมเดลเมื่อสายอากาศไม่สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้และเมื่อสามารถตรวจจับได้ โมเดลนี้จำลองการตรวจจับในสภาวะคงที่และสภาพแวดล้อมคล้ายกันทั้งหมด พารามิเตอร์ของระบบสายอากาศดังนี้ Radius 250 เมตร Angle 45 องศา Position สุ่มตำแหน่ง X = ระหว่าง 250 ถึง 750 เมตร สุ่มตำแหน่ง Y = ระหว่าง 250 ถึง 750 เมตร Direction สุ่ม และ Rotation 0 องศา/วินาที พารามิเตอร์ของอากาศยานไร้คนขับดังนี้ Way points สุ่มตำแหน่ง x = ระหว่าง 1 ถึง 1,000 เมตร สุ่มตำแหน่ง Y = ระหว่าง 1 ถึง 1,000 เมตร Time of Flight 16 วินาที Speed of UAV 10 เมตร/วินาที และพื้นที่ของการตรวจจับ Field of Interest ตำแหน่ง X = 1,000 เมตร ตำแหน่ง Y = 1,000 เมตร โมเดลนี้จำลองระบบที่ใช้สายอากาศแบบระบุทิศทางที่เหมือนกันทั้งหมด (ค่า Beamwidth 45 องศา) และไม่มีภาระหมุน จากผลการจำลองพบว่าโมเดลนี้ให้ประสิทธิภาพในการตรวจจับสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความสม่ำเสมอของสายอากาศและสภาวะการทำงานที่คงที่ทำให้สามารถกำหนดพื้นที่การตรวจจับได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่อง ส่งผลให้ความน่าจะเป็นในการตรวจจับสูงสุด ผลการจำลองของ Static Homogeneous ได้ค่าเฉลี่ยความสามารถในการตรวจจับทั้งหมด 34.9755%

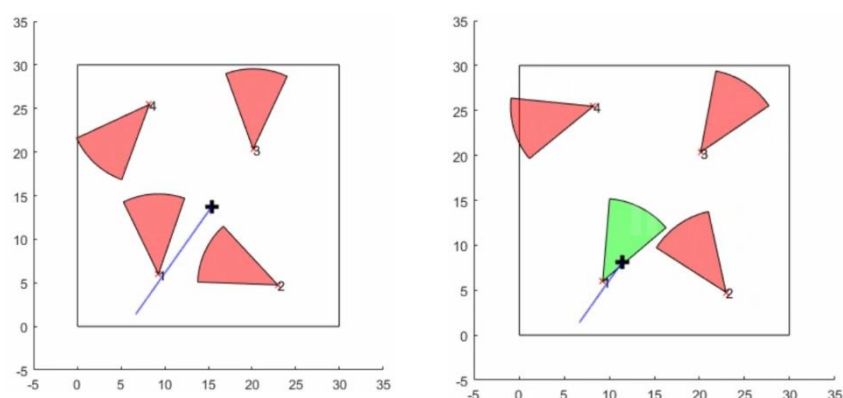


รูปที่ 11 โมเดลสายอากาศในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับแบบ Static Homogeneous

5.1.3.2 Dynamic Homogeneous

โมเดลนี้ตรวจสอบผลกระทบของการหมุนอย่างต่อเนื่องต่อระบบที่ประกอบด้วยสายอากาศแบบระบุทิศทางที่เหมือนกัน การกำหนดค่าการตั้งค่าสายอากาศเพิ่มเติมดังนี้ *Rotation* 45 องศา/วินาที การตั้งค่าอากาศยานไร้คนขับเหมือนกับ Static Homogeneous และการตั้งค่าการจำลอง เหมือนกับ Static Homogeneous

จากรูปที่ 12 สำหรับระบบหมุนนี้ ความสามารถในการตรวจจับเฉลี่ย 12.0284% ความแตกต่างอย่างชัดเจนในความสามารถในการตรวจจับเฉลี่ยระหว่าง Static Homogeneous (34.9755%) และ Dynamic Homogeneous (12.0284%) เป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญ ความแตกต่างที่สำคัญเพียงอย่างเดียวระหว่างสองโมเดลนี้คือการนำการหมุนสายอากาศอย่างต่อเนื่องที่ 45 องศา/วินาทีมาใช้ในการตั้งค่า Dynamic Homogeneous การลดประสิทธิภาพการตรวจจับอย่างรุนแรง (ลดลงกว่า 22 เปอร์เซ็นต์) ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วในการหมุนนี้เป็นอันตรายต่อการตรวจจับที่สม่ำเสมอ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะลำคลื่นของสายอากาศแบบระบุทิศทางกวาดผ่านพื้นที่เป้าหมายเร็วเกินไป ทำให้ลด *เวลาคงที่* (dwell time) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่สัญญาณของอากาศยานไร้คนขับยังคงอยู่ในลำคลื่นหลักของสายอากาศ การหมุนสายอากาศที่รวดเร็วเกินไปทำให้ลำคลื่นกวาดผ่านเป้าหมายอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลาคงที่สั้นลงอย่างมาก และระบบไม่สามารถประมวลผลสัญญาณได้อย่างต่อเนื่องและเชื่อถือได้ ความน่าจะเป็นในการตรวจจับจึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

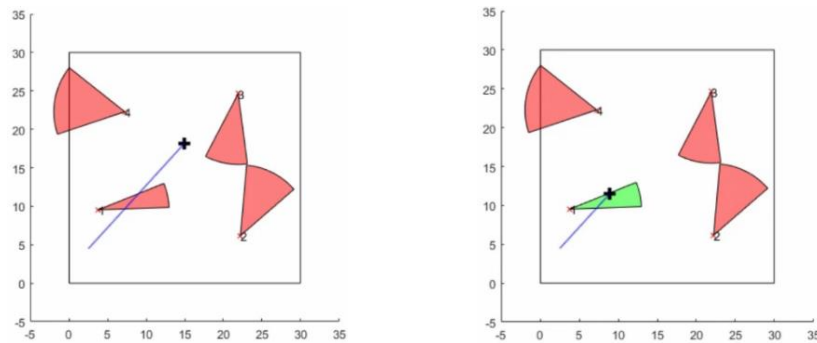


รูปที่ 12 โมเดลสายอากาศในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับแบบ Dynamic Homogeneous

5.1.3.2 Static Heterogeneous

โมเดลนี้สำรวจระบบตรวจจับแบบคงที่ที่ใช้สายอากาศประเภทต่าง ๆ ซึ่งจำลองโดยการสุ่มค่า Beamwidth ของสายอากาศ การกำหนดค่า การตั้งค่าสายอากาศเพิ่มเติมดังนี้ *Angle* สุ่ม *Rotation* 0 องศา/วินาที

การตั้งค่าอากาศยานไร้คนขับ เหมือนกับ Static Homogeneous การตั้งค่าการจำลอง เหมือนกับ Static Homogeneous จากรูปที่ 13 ความสามารถในการตรวจจับเฉลี่ย 14.016% โมเดล Static Heterogeneous (14.016%) มีประสิทธิภาพต่ำกว่าโมเดล Static Homogeneous (34.9755%) อย่างมีนัยสำคัญ และดีกว่าโมเดล Dynamic Homogeneous (12.0284%) เพียงเล็กน้อย ความแตกต่างที่สำคัญจาก Static Homogeneous คือการ

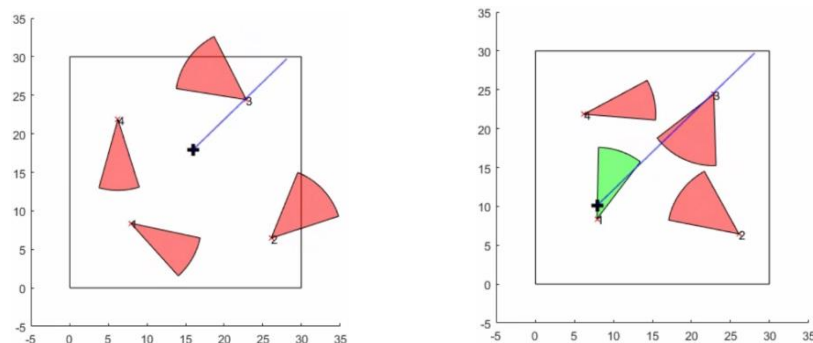


รูปที่ 13 โมเดลสายอากาศในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับแบบ Static Heterogeneous

สุมค่า Beamwidth ของสายอากาศ (Angle Random) ในขณะที่ยังคงรักษาระบบที่อยู่กับที่ ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าการนำสายอากาศประเภทต่าง ๆ (ซึ่งแสดงโดย Beamwidth ที่แตกต่างกัน) มาใช้โดยไม่มีแนวทางเหมาะสมสำหรับการรวมกันนั้นไม่ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการตรวจจับ แม้จะไม่มีภาระที่ส่งผลเสียต่อเวลาคงที่ แสดงให้เห็นว่าการนำสายอากาศที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาใช้งานโดยไม่ได้ออกแบบให้ทำงานร่วมกันอย่างเหมาะสมจะทำให้เกิด "จุดบอด" ในพื้นที่การตรวจจับ ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.3.4 Dynamic Heterogeneous

โมเดลนี้แสดงถึงสถานการณ์ที่ซับซ้อนที่สุด โดยรวมทั้งความแปรปรวนของประเภทสายอากาศ (Beamwidth สุ่ม) และการหมุนอย่างต่อเนื่อง การกำหนดค่า การตั้งค่าสายอากาศเพิ่มเติมดังนี้ Angle สุ่ม Rotation 45 องศา/วินาที การตั้งค่าอากาศยานไร้คนขับเหมือนกับ Static Homogeneous การตั้งค่าการจำลอง เหมือนกับ Static Homogeneous จากรูปที่ 14 ความสามารถในการตรวจจับเฉลี่ย 24.5276% ซึ่งเป็นโมเดลที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในหมวดการกำหนดค่าสายอากาศแบบ Heterogeneous โมเดล Dynamic Heterogeneous (24.5276%) แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความสามารถในการตรวจจับเมื่อเทียบกับทั้ง Dynamic Homogeneous (12.0284%) และ Static Heterogeneous (14.016%) สิ่งนี้บ่งชี้ว่าเมื่อสายอากาศแบบ Heterogeneous (Beamwidth สุ่ม) ถูกรวมเข้ากับการหมุน การหมุนอาจช่วยชดเชยความรู้ประสิทธิภาพของ Beamwidth แบบสุ่มได้บางส่วน การกวาดลำคลื่นที่ต่อเนื่องช่วยเพิ่มความน่าจะเป็นที่เป้าหมายจะถูกตรวจจับโดยลำคลื่นใดลำคลื่นหนึ่งจากสายอากาศที่หลากหลายได้ อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการปรับปรุงนี้ โมเดลนี้ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าโมเดล Static Homogeneous



รูปที่ 14 โมเดลสายอากาศในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับแบบ Dynamic Heterogeneous

(34.9755%) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้การหมุนจะสามารถลดปัญหาบางอย่างของความแตกต่างแบบสุ่มได้ เนื่องจากความท้าทายพื้นฐานจากการลดลงของเวลาคงที่ยังคงมีผลกระทบอยู่

ในงานวิจัยนี้ การจำลองการตรวจจับเป็นการใช้พื้นที่การตรวจจับแบบเรขาคณิตที่สร้างขึ้นจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ ในแบบจำลองดังกล่าว แต่ละสายอากาศจะถูกจำลองให้มีพื้นที่การรับสัญญาณเป็นรูปทรงกรวย (cone-shaped) หรือเซกเมนต์ของวงกลม (circular segment) ซึ่งกำหนดโดย "มุม Beamwidth" และ "ระยะการตรวจจับ" การตรวจจับจะเกิดขึ้นเมื่อเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ (ซึ่งเป็นเส้นตรงที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ 1,000x1,000 เมตร) ตัดกับพื้นที่การรับสัญญาณของเสาอากาศเหล่านี้ พื้นที่การตรวจจับของแต่ละเสาอากาศคือ "มุมมอง" ที่ตายตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการจำลองทั้งแบบเสาอากาศที่ตั้งอยู่กับที่ (Static) และแบบที่หมุนไปมาแบบสุ่ม (Dynamic) ในกรณีของแบบ Dynamic พื้นที่การตรวจจับแบบเซกเมนต์วงกลมนี้อาจหมุนตามแกนของมัน ทำให้มุมมองการตรวจจับเปลี่ยนไปตลอดเวลา นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการตรวจจับจะเกิดขึ้นเมื่อจุดที่แทนตำแหน่งของโดรนอยู่ในพื้นที่การรับสัญญาณที่ถูกกำหนดด้วยมุมและรัศมีนั้น

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการดำเนินงานวิจัย

ส่วนนี้ให้การสังเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับเฉลี่ยในสี่โมเดลการจำลองทั้งหมด ซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปโดยรวมเกี่ยวกับประสิทธิภาพสัมพัทธ์ของแต่ละโมเดล สรุปประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบพบว่าความสามารถในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับโดยเฉลี่ยของทั้งสี่โมเดลได้ผลดังนี้ Static Homogeneous 34.9755% Dynamic Homogeneous 12.0284% Static Heterogeneous 14.016% และ Dynamic Heterogeneous 24.5276%

ผลการวิจัยสรุปว่าโมเดล Static Homogeneous แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจจับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในบรรดาสถานการณ์ที่จำลองไว้ เมื่อได้เปรียบเทียบแล้วนั้น ปัจจัยสำคัญหลายประการก็ปรากฏชัดเจน ประการแรก การลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก Static Homogeneous (34.9755%) ไปยัง Dynamic Homogeneous (12.0284%) บ่งชี้โดยตรงว่าการลดลงของประสิทธิภาพเกิดจากการนำการหมุนอย่างต่อเนื่องที่ 45 องศา/วินาทีมาใช้ สิ่งนี้เน้นย้ำว่าแม้การหมุนอาจเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมเมื่อเวลาผ่านไป แต่ก็ลดความน่าจะเป็นของการตรวจจับแบบทันทีภายในกรอบเวลาการสุ่มตัวอย่างอย่างรุนแรง ประการที่สอง ประสิทธิภาพของ Static Heterogeneous (14.016%) ที่ต่ำกว่า Static Homogeneous (34.9755%) มาก แสดงให้เห็นว่าการสุ่มค่า Beamwidth ของสายอากาศในระบบที่อยู่กับที่นั้นไม่เป็นผลดี ซึ่งหมายความว่า Beamwidth ที่สม่ำเสมอและเหมาะสมที่สุดนั้นเหนือกว่าการผสมผสานแบบสุ่มหากระบบอยู่กับที่ ประการที่สาม ข้อเท็จจริงที่ว่า Dynamic Heterogeneous (24.5276%) มีประสิทธิภาพเหนือกว่าทั้ง Dynamic Homogeneous (12.0284%) และ Static Heterogeneous (14.016%) นั้นน่าสนใจ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อสายอากาศแบบ Heterogeneous ถูกรวมเข้ากับการหมุน การหมุนอาจช่วย กวาด ผ่าน Beamwidth ที่หลากหลาย ทำให้เพิ่มโอกาสที่ลำคลื่นบางลำจะกระทบเป้าหมาย ซึ่งช่วยลดความไร้ประสิทธิภาพบางอย่างของความแตกต่างแบบสุ่ม อย่างไรก็ตาม มันยังไม่สามารถเอาชนะความท้าทายพื้นฐานที่เกิดจากการหมุนอย่างรวดเร็วได้ เนื่องจากประสิทธิภาพยังคงต่ำกว่า Static Homogeneous ที่เหมาะสมที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ

นัยยะหลักคือ เพื่อเพิ่มความน่าจะเป็นในการตรวจจับภายในพื้นที่ที่กำหนด อาร์เรย์สายอากาศที่อยู่กับที่ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบระบุทิศทางที่เหมือนกันและมีการกำหนดค่าอย่างดีในปัจจุบันเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด สิ่งนี้ชี้ให้เห็นถึงปรัชญาการออกแบบที่ให้ความสำคัญกับการครอบคลุมที่สม่ำเสมอและมุ่งเน้นมากกว่าการสแกนแบบไดนามิกที่กว้างแต่เชื่อถือได้น้อยกว่า หากจะพัฒนาระบบไดนามิก จะต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนมากขึ้นสำหรับการปรับทิศทางลำคลื่นแบบปรับเปลี่ยนได้หรือการหมุนอย่างชาญฉลาด (เช่น การหยุดหรือลดความเร็วเมื่อตรวจพบเป้าหมาย) เพื่อเอาชนะการลดลงของประสิทธิภาพที่สังเกตได้ ผลลัพธ์ยังเน้นย้ำว่าความแตกต่าง

(Heterogeneity) หากนำมาใช้ จะต้องได้รับการออกแบบและปรับให้เหมาะสมอย่างระมัดระวัง ไม่ใช่เพียงการสุ่ม แม้ว่า Static Homogeneous จะมีเปอร์เซ็นต์การตรวจจับสูงสุดที่ 34.9755% แต่อาจมีค่ากำลังรับสัญญาณเฉลี่ย (Pr) ที่ต่ำกว่า Dynamic Heterogeneous (24.5276%) การเปรียบเทียบนี้จะนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า โมเดล Static Homogeneous อาจมีความอ่อนไหวสูงกว่าในการตรวจจับสัญญาณระยะไกล แต่ความแรงของสัญญาณที่ได้อาจไม่เสถียร หรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการตรวจจับผิดพลาดชนิดบวกในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง การนำเสนอข้อมูลด้วย RSSI ควบคู่กับค่าเฉลี่ยการตรวจจับผิดพลาดและค่าเฉลี่ยการตรวจไม่พบ จะช่วยให้สามารถอธิบายได้ว่า เหตุใดโมเดล Dynamic Homogeneous จึงมีเปอร์เซ็นต์การตรวจจับที่ลดลงเมื่อเทียบกับแบบ Static Homogeneous โดยอาจเป็นเพราะการหมุนของเสาอากาศทำให้เกิดช่วงเวลาที่พลาดการตรวจจับไป (False Negative) ซึ่งจะช่วยให้การตัดสินใจว่าโมเดลใดเหมาะสมกับภารกิจใด เช่น หากต้องการระบบที่ตรวจจับสัญญาณได้ แม้ในระยะไกล โมเดล Static Homogeneous อาจเหมาะสมกว่า แต่หากต้องการระบบที่มั่นใจได้ว่าเมื่อตรวจจับแล้ว สัญญาณที่ได้จะมีความแรงสูงและมีความเสถียร Dynamic Heterogeneous อาจตอบโต้มากกว่า

6. สรุป

6.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาเชิงทฤษฎีและปฏิบัติเกี่ยวกับระบบตรวจจับ UAV โดยใช้ SDR เพื่อวางรากฐานสำหรับการพัฒนาระบบต้นแบบ การออกแบบครอบคลุมทั้งส่วนประกอบซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ รวมถึงการกำหนดคุณลักษณะของโปรแกรมจำลอง การเตรียมซอฟต์แวร์ควบคุม SDR และการพัฒนาอัลกอริทึมการตรวจจับ จุดแข็งที่สำคัญคือการพัฒนาแบบคู่ขนาน โดยมีการพัฒนาโปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองสถานการณ์การตรวจจับสายอากาศ และโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ SDR สำหรับการทดสอบจริง การตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบจำลองอย่างเข้มงวดผ่านการทดสอบทางกายภาพ โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับฮาร์ดแวร์จริง ข้อมูลทั้งหมดได้รับการรวบรวม วิเคราะห์ทางสถิติ และนำไปจัดทำรายงานที่ครอบคลุม ระเบียบวิธีที่ซ้ำและคู่ขนานนี้ ซึ่งการจำลองให้ข้อมูลแก่การทดลองทางกายภาพและในทางกลับกัน ได้เพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการนำไปใช้จริงของผลการวิจัยอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มุ่งหมายสำหรับการใช้งานด้านการป้องกันที่สำคัญ ความสำเร็จในการบูรณาการการจำลองและการทดสอบในโลกแห่งความเป็นจริงได้สร้างแผนงานที่ชัดเจนสำหรับการวิจัยและพัฒนาในอนาคตในระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับ ทำให้มั่นใจได้ว่าโครงการในอนาคตสามารถใช้ประโยชน์จากกระบวนการและเครื่องมือที่ได้รับการจัดตั้งและตรวจสอบแล้ว

6.2 การวิเคราะห์โมเดลแบบจำลอง

วัตถุประสงค์หลักคือการระบุแบบจำลองการจำลองที่มีประสิทธิภาพการตรวจจับสูงสุดสำหรับการใช้งานจริง แบบจำลองทั้งสี่แบบแสดงประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน แต่การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับบริบทจากการทดสอบ 100 ครั้ง แบบจำลอง Static Homogeneous (สายอากาศ Homogeneous) แสดงประสิทธิภาพสูงสุดที่ 34.9755% ในขณะที่แบบจำลอง Dynamic Heterogeneous (สายอากาศ Heterogeneous) มีประสิทธิภาพสูงสุดในหมวดหมู่ของตนที่ 24.5276% ความแตกต่าง 10 เปอร์เซ็นต์ระหว่างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยรวม (Static Homogeneous) และแบบจำลอง Heterogeneous ที่ดีที่สุด (Dynamic Heterogeneous) มีนัยสำคัญในทางปฏิบัติสำหรับความน่าจะเป็นในการตรวจจับ สำหรับผู้มีอำนาจตัดสินใจ การเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจึงไม่ตายตัว แต่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างเมตริกประสิทธิภาพกับข้อจำกัดในการปฏิบัติงาน เช่น โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่และการติดตั้งจริง ในงานวิจัยฉบับนี้ ความแม่นยำเชิงมุมถูกกำหนดโดยวิธีการระบุตำแหน่งแบบ Triangulation ซึ่งเป็นการคำนวณตำแหน่งโดยใช้มุมที่วัดจากเสาอากาศหลายต้น วิธีนี้ทำงานได้ดีในแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลสมบูรณ์แบบ แต่ในสภาพแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยรบกวนและความไม่สมบูรณ์ของข้อมูล วิธีนี้อาจ

ขาดความแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแบบจำลอง Dynamic Homogeneous ที่ใช้สายอากาศหมุนแบบสุ่ม ซึ่งมีประสิทธิภาพการตรวจจับต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบบ Static Homogeneous ที่ใช้สายอากาศแบบคงที่ การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนไหวแบบสุ่มของสายอากาศอาจทำให้พลาดเป้าหมายได้ง่ายกว่าการใช้สายอากาศที่ครอบคลุมพื้นที่อย่างคงที่ การวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าแม้การจำลองจะให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจน แต่การนำไปใช้งานจริงยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา ระบบจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานของสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุด (ideal conditions) โดยไม่คำนึงถึงปัจจัยสำคัญในโลกแห่งความเป็นจริง เช่น การแพร่กระจายหลายเส้นทาง (Multipath Propagation) และ สิ่งรบกวน (Clutter) การสะท้อนของสัญญาณจากสิ่งปลูกสร้างและภูมิประเทศ ซึ่งอาจทำให้การระบุตำแหน่งผิดพลาดได้ สัญญาณรบกวน (Noise) ทั้งสัญญาณรบกวนทางความร้อน (Thermal Noise) และสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ที่อาจทำให้ประสิทธิภาพการตรวจจับลดลง และสภาพการมองเห็นโดยตรง (Line-of-Sight - LOS) การจำลองนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ามี LOS ระหว่าง UAV และระบบตรวจจับ ซึ่งในโลกจริงอาจมีสิ่งกีดขวางได้ นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจจับอื่น ๆ เช่น เรดาร์ ระบบเสียง อินฟราเรด และการมองเห็นด้วยสายตา แสดงให้เห็นว่าการตรวจจับด้วย RF มีข้อได้เปรียบด้านต้นทุนและสามารถระบุพิกัดผู้บังคับได้ แต่มีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมของคลื่นและอาจถูกรบกวนได้ ดังนั้น ระบบตรวจจับด้วย RF จึงควรถูกมองว่าเป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันหลายชั้น (multi-layered defense system) ที่ผสมผสานเทคโนโลยีหลายประเภทเข้าด้วยกันเพื่อเสริมจุดแข็งและชดเชยจุดอ่อนของแต่ละวิธี

6.3 แนวโน้มเชิงประสิทธิภาพ

ผลการวิจัยชี้ว่าประสิทธิภาพการตรวจจับ UAV ได้รับอิทธิพลโดยตรงจาก Beamwidth ของสายอากาศและความเร็วในการหมุน Beamwidth ที่สูงขึ้นสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการตรวจจับ เนื่องจากครอบคลุมพื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น แต่ก็อาจลดอัตราขยายและระยะการตรวจจับสูงสุดลง ในทางกลับกัน ความเร็วในการหมุนที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่จะลดประสิทธิภาพการตรวจจับลงอย่างมาก เนื่องจากลด "เวลาคงที่" ของลำคลื่นบนเป้าหมาย ซึ่งเพิ่มโอกาสในการพลาดการตรวจจับ นี่คือเหตุผลที่ระบบ Static Homogeneous ซึ่งไม่มีการหมุน แสดงประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีที่สุด การวิเคราะห์นี้ให้หลักการออกแบบที่นำไปปฏิบัติได้ สำหรับการติดตั้งแบบตายตัว การปรับ Beamwidth ให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับระบบไดนามิก จำเป็นต้องมีกลยุทธ์การหมุนที่ชาญฉลาด เช่น การสแกนแล้วหยุด หรือการปรับทิศทางลำคลื่นแบบปรับเปลี่ยนได้ นอกจากนี้ แนวทางแบบหลายชั้นที่รวมสายอากาศ Beamwidth กว้างสำหรับการตรวจจับเบื้องต้นและสายอากาศ Beamwidth แคบสำหรับการติดตามที่แม่นยำ อาจเป็นกลยุทธ์ Heterogeneous ที่มีประสิทธิภาพ ข้อมูลเชิงลึกเหล่านี้จัดเตรียมเส้นทางที่ชัดเจนสำหรับการพัฒนาระบบต่อต้าน UAV ให้ก้าวหน้าไปจากขั้นตอนต้นแบบปัจจุบัน ควรเพิ่มการคำนวณค่า RSSI และกำลังรับสัญญาณสะท้อนความเข้าใจอย่างลึกซึ้งถึงช่องว่างระหว่างแบบจำลองกับความเป็นจริงทางกายภาพ แบบจำลองการตรวจจับแบบปัจจุบันจะไม่สามารถสร้างข้อมูลค่ากำลังรับสัญญาณหรือ RSSI ได้ ต้องปรับปรุงกลไกหลักของแบบจำลอง โดยเปลี่ยนมาเป็นการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่ง อัตราขยายของสายอากาศและระยะทาง เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะนำมาซึ่งความสมจริงและคุณค่าทางวิศวกรรมที่สูงขึ้นอย่างยิ่ง นอกเหนือจากตัวชี้วัดเชิงฟิสิกส์แล้ว อัตราการตรวจจับผิดพลาดก็มีความสำคัญไม่แพ้กัน แบบจำลองปัจจุบันวัดผลในรูปของ "เปอร์เซ็นต์จำนวนการตรวจจับ" ซึ่งเป็นการนับจำนวนครั้งที่ UAV อยู่ภายในขอบเขตการตรวจจับที่กำหนด และถูก "พบ" อย่างไรก็ตาม ตัวชี้วัดนี้เพียงสะท้อนความสามารถในการค้นหาเป้าหมายที่แท้จริง แต่ไม่ได้ประเมินความสามารถในการแยกแยะเป้าหมายออกจากสัญญาณอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ในสถานการณ์จริง ระบบตรวจจับอาจเผชิญกับสัญญาณรบกวนจากแหล่งอื่น ๆ เช่น สัญญาณ Wi-Fi สัญญาณวิทยุอื่น ๆ หรือโดรนที่ไม่ใช่ภัยคุกคาม หากระบบตรวจจับสัญญาณเหล่านี้แล้วรายงานว่าเป็นภัยคุกคาม จะเกิด "การตรวจจับผิดพลาดชนิดบวก" (False Positive) ในทางกลับกัน หากมี UAV ที่เป็นภัยคุกคามบินเข้ามาในพื้นที่แต่ระบบกลับไม่สามารถตรวจจับได้ จะเกิด

"การตรวจจับผิดพลาดชนิดลบ" (False Negative) การนำตัวชี้วัดเหล่านี้มาพิจารณาจะทำให้การประเมินประสิทธิภาพของระบบเป็นไปอย่างครบถ้วนตามมาตรฐานระบบรักษาความปลอดภัย

6.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบจำลองการตรวจจับ UAV ที่มีคุณค่า ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินการออกแบบสายอากาศต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและคุ้มค่า ลดความจำเป็นในการติดตั้งทางกายภาพที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลา โครงการนี้ยังได้สร้างองค์ความรู้ที่สำคัญและแนวทางปฏิบัติสำหรับการใช้อุปกรณ์ Software-Defined Radio (SDR) ซึ่งมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบความปลอดภัยในอนาคต ประโยชน์ที่สำคัญคือความสามารถในการใช้ระบบจำลองสำหรับการทดสอบและตรวจสอบอย่างเข้มงวดก่อนการติดตั้งจริง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงและปรับปรุงวงจรการพัฒนา ระบบจำลองได้รับการออกแบบโดยคำนึงถึงความสามารถในการปรับขนาด เพื่อรองรับการจำลองการมีอยู่ของ UAV หลายลำ ซึ่งจำเป็นสำหรับการเตรียมพร้อมสำหรับสภาพแวดล้อมการปฏิบัติงานที่ซับซ้อน การวิจัยยังระบุแบบจำลองการจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการตรวจจับ UAV ซึ่งให้แนวทางที่ชัดเจนสำหรับการออกแบบและการนำระบบต่อต้านโดรนในอนาคตไปใช้ โดยรวมแล้ว ประโยชน์เหล่านี้สอดคล้องโดยตรงกับเป้าหมายเชิงกลยุทธ์ของกองทัพอากาศไทยในการพัฒนายุทธโศปกรณ์ทางเลือกและเพิ่มขีดความสามารถด้านการป้องกัน ระบบจำลองเองเป็นผลผลิตหลัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแพลตฟอร์มแบบไดนามิกสำหรับการสร้างสรรค์นวัตกรรมและการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องในโดเมนความมั่นคงที่สำคัญนี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานแบ่งได้เป็น การเฝ้าระวังและการรักษาความปลอดภัย (Security Surveillance) สามารถนำระบบนี้มาใช้ในการตรวจจับและติดตามอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ได้รับอนุญาตที่บินเข้ามาในพื้นที่อ่อนไหว เช่น สนามบิน ค่ายทหาร หรือสถานที่ราชการ การที่ระบบสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งของทั้งตัวอากาศยานและผู้ควบคุมได้ จะช่วยเพิ่มความปลอดภัยและป้องกันการจารกรรมข้อมูล หรือการกระทำผิดกฎหมายได้ การบริหารจัดการจราจรทางอากาศในระดับต่ำ (Low-altitude Air Traffic Management) ระบบตรวจจับนี้สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามอากาศยานไร้คนขับในระดับความสูงต่ำเพื่อป้องกันอุบัติเหตุหรือการชนกันในพื้นที่ที่มีการใช้งานโดรนหนาแน่น เช่น ในเขตเมืองหรือเขตอุตสาหกรรม และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมและการทหาร (Industrial and Military Applications) ระบบนี้สามารถใช้สนับสนุนการปฏิบัติงานของโดรนที่ได้รับอนุญาตในภาคอุตสาหกรรม เช่น โลจิสติกส์และการส่งสินค้า สำหรับการใช้งานทางการทหาร ระบบตรวจจับสามารถเป็นส่วนหนึ่งของระบบสงครามอิเล็กทรอนิกส์ ที่ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณวิทยุ (RF) และระบุลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ (RF Fingerprinting) เพื่อทำการจำแนกและระบุการทำงานของโดรนที่ผิดกฎหมาย

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยและโอกาสในการปรับปรุง ขอแนะนำแนวทางปฏิบัติสำหรับการพัฒนาและการนำระบบไปใช้งานในอนาคตดังนี้

(1) การเพิ่มขีดความสามารถของระบบจำลอง ควรบูรณาการอัลกอริทึมการตรวจจับขั้นสูง เช่น การเรียนรู้ของเครื่องจักร เพื่อปรับปรุงความแม่นยำและความสามารถในการประมวลผลแบบเรียลไทม์ ขยายขีดความสามารถในการจำลองปัจจัยแวดล้อมที่ซับซ้อน เช่น สัญญาณรบกวนและสภาพอากาศ และพัฒนาขีดความสามารถในการจำลองหลายโดรน เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับภัยคุกคามจากฝูงโดรน

(2) การออกแบบฮาร์ดแวร์และกลยุทธ์การนำไปใช้งานที่เหมาะสมที่สุด ดำเนินการวิจัยและพัฒนา "กลยุทธ์การหมุนที่ชาญฉลาด" สำหรับระบบสายอากาศแบบไดนามิก เช่น การปรับทิศทางลำคลื่นแบบปรับเปลี่ยนได้ หรือระเบียบวิธีสแกนแล้วหยุด ควรสำรวจและสร้างต้นแบบระบบสายอากาศแบบหลายชั้นที่แตกต่างกัน ซึ่งรวมสายอากาศ Beamwidth กว้างสำหรับการตรวจจับเบื้องต้นและสายอากาศ Beamwidth แคบสำหรับการติดตามที่แม่นยำ ควรให้

ความสำคัญกับการนำการกำหนดค่าสายอากาศ Static Homogeneous ไปใช้สำหรับการติดตั้งแบบตายตัวที่ต้องการความน่าจะเป็นในการตรวจจับสูงสุด

(3) การตรวจสอบในโลกแห่งความเป็นจริงและการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องดำเนินการทดสอบภาคสนามอย่างกว้างขวางของต้นแบบทางกายภาพในสภาพแวดล้อมความปลอดภัยจริงที่แตกต่างกัน เพื่อตรวจสอบผลการจำลองและปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ สร้างวงจรการปรับปรุงที่แข็งแกร่งและต่อเนื่อง เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลการทดสอบในโลกแห่งความเป็นจริงได้รับการบูรณาการกลับเข้าไปในแบบจำลองการจำลองอย่างสม่ำเสมอ

(4) การบูรณาการเชิงกลยุทธ์และการวิจัยและพัฒนาในอนาคต ใช้ประโยชน์จากความเชี่ยวชาญด้าน SDR ที่ได้รับและแพลตฟอร์มการจำลองที่จัดตั้งขึ้น เป็นสินทรัพย์ที่เป็นรากฐานสำหรับการริเริ่มการวิจัยและพัฒนาต่อต้านอากาศยานไร้คนขับในอนาคตทั้งหมด เพื่อให้มั่นใจถึงการตอบสนองที่เชิงรุก คล่องตัว และก้าวหน้าทางเทคโนโลยีต่อภัยคุกคามทางอากาศที่เกิดขึ้นใหม่

(5) เพิ่มการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงลึก ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์สัดส่วนของต้นทุนและประสิทธิภาพของระบบอย่างละเอียด ซึ่งจะช่วยยืนยันความสามารถในการผลิตและนำไปใช้งานจริงในราคาที่เข้าถึงได้ ตามวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย

(6) การใช้งานเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น เช่น

a. การเปลี่ยนผ่านจากระบบจำลองสู่ระบบจริงอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องพิจารณาการใช้เทคโนโลยีสายอากาศแบบเรียงเฟส (Phased Array) ซึ่งเป็นสายอากาศที่ประกอบด้วยสายอากาศขนาดเล็กหลายตัว (Array) ที่สามารถควบคุมเฟสของสัญญาณที่ส่งหรือรับจากแต่ละตัวได้ การควบคุมเฟสนี้ทำให้สามารถ "หักเห" หรือ "ชี้นำ" ลำคลื่นหลักได้โดยไม่ต้องอาศัยการหมุนเชิงกล ทำให้สามารถแก้ไขปัญหาคอขวดในการจำลองแบบ เทคโนโลยีเหล่านี้ใช้หลักการประเมินทิศทางมาถึงของสัญญาณ (Direction-of-Arrival หรือ DoA) ซึ่งเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูลความแตกต่างของเฟสและแอมพลิจูดจากเสาอากาศหลายตัวเพื่อคำนวณทิศทางที่สัญญาณเดินทางมาถึง ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าวิธี Triangulation แบบเดิม ด้วยการใช้เทคโนโลยีแบบเรียงเฟส ระบบจะสามารถปรับเปลี่ยนทิศทางการส่งหรือรับสัญญาณได้ในระดับไมโครวินาทีโดยไม่ต้องหมุนเชิงกล และยังสามารถสร้างลำคลื่น (Beamforming) ที่มีความเข้มข้นสูงและแคบไปยังทิศทางเป้าหมายที่ตรวจพบ ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามเป้าหมายหลายลำพร้อมกันได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น บางงานวิจัยสามารถทำได้ถึงระดับความละเอียดเชิงมุมที่ 1 องศา อย่างไรก็ตาม การพัฒนาให้ได้ความแม่นยำสูงในสภาพแวดล้อมจริงเป็นความท้าทาย เนื่องจากสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นๆ (เช่น Wi-Fi และ Bluetooth) สามารถทำให้ความแม่นยำลดลงอย่างมาก ทำให้จำเป็นต้องมีการประมวลผลสัญญาณที่ซับซ้อนและใช้โมเดลการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อกรองและจำแนกสัญญาณที่ถูกต้อง

b. การเปลี่ยนผ่านสู่ระบบแบบ Real-time ไม่ใช่เพียงแค่การเพิ่มความเร็วในการประมวลผล แต่เป็นความเปลี่ยนแปลงทางสถาปัตยกรรมขั้นพื้นฐาน จากการประมวลผลแบบลำดับ (Sequential) ที่ใช้ในโปรแกรม MATLAB สู่การประมวลผลแบบขนาน (Parallel) ที่ใช้ฮาร์ดแวร์อย่าง FPGA โครงสร้างนี้จะช่วยให้ระบบสามารถจัดการกับปริมาณข้อมูลมหาศาลที่เข้ามาจาก SDR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบจะสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง

c. การสกัดคุณลักษณะและการเลือกโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกหรือการเรียนรู้ของเครื่อง [20] จำเป็นต้องมีกระบวนการสกัดคุณลักษณะ (Feature engineering) ที่เหมาะสม คุณลักษณะเหล่านี้เป็นค่าเชิงตัวเลขที่สะท้อนถึงลักษณะเฉพาะของสัญญาณแต่ละตัว คุณลักษณะที่สำคัญที่ควรนำมาพิจารณาได้แก่ ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัมของกำลัง (Power Spectral Density - PSD) การแปลงฟูเรียร์ระยะสั้น (Short-Time Fourier Transform - STFT) คุณลักษณะเชิงวัฏจักร (Cyclostationary Features) คุณลักษณะเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ฝึกฝนโมเดลการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถาปัตยกรรมการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) เช่น Convolutional Neural Networks

(CNNs) ซึ่งโมเดลเหล่านี้มีความสามารถในการเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อนจากข้อมูลดิบหรือข้อมูลคุณลักษณะที่สกัดออกมาแล้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคการเรียนรู้แบบถ่ายโอนความรู้ (Transfer Learning) ยังสามารถนำมาใช้เพื่อปรับโมเดลที่ฝึกมาแล้วกับข้อมูลขนาดใหญ่ให้สามารถจำแนกสัญญาณของอากาศยานไร้คนขับได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณการทำงานในส่วนสำคัญจาก ร.ต.กัลยกฤต สุขเกษม ร.ต.ธนวิษฐ์ ขุนพิลิกลือเดช และ ร.ต.อัศวกร แยมกลิ่น รวมทั้งนักเรียนนายเรืออากาศรุ่นก่อนหน้าทั้งสองรุ่นที่เริ่มดำเนินงานวิจัยนี้ อีกทั้งงบประมาณจาก กองทัพอากาศในปีงบประมาณ 2566 และคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้การสนับสนุนองค์ความรู้ คำแนะนำและการช่วยเหลือเป็นอย่างดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.), “ประกาศ กสทช. เรื่อง หลักเกณฑ์และเงื่อนไขการอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับประเภท โดรน สำหรับใช้งานเป็นการทั่วไป,” กสทช. เข้าถึงเมื่อ: 22 เมษายน 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://shorturl.at/bYuOg>
- [2] K. Thana and J. Sangsiri, "The most efficient route analysis using 3D maps for assistance to aircraft accident victims," *Sci. Tech. J. NKRAFA*, vol. 19, no. 2, pp. 58–71, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/251204>
- [3] กองทัพอากาศ, “ยุทธศาสตร์กองทัพอากาศ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580),” กองทัพอากาศ. เข้าถึงเมื่อ: 22 เม.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://welcome-page.raf.mi.th/blog/e-ksaarephyaepr-11/yuththsaastk-ngthaph-aakaas-20-pii-ph-s-2561-2580-38>
- [4] K. Thana, J. Sangsiri, K. Jitt-Aer, and T. Buaphiban, "Development of a GIS-based bird map application for the Royal Thai Air Force's aviation safety management," *Eng. Technol. Horiz.*, vol. 42, no. 1, Mar. 2025, Art. no. 420108, doi: 10.55003/ETH.420108.
- [5] S. Park, H. T. Kim, S. Lee, H. Joo, and H. Kim, “Survey on anti-drone systems: Components, designs, and challenges,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 42635–42659, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
- [6] A. H. Abunada, A. Y. Osman, A. Khandakar, M. E. H. Chowdhury, T. Khattab, and F. Touati, “Design and implementation of a RF based anti-drone system,” in *2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT)*, Doha, Qatar, 2020, pp. 35–42, doi: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089515.
- [7] Y. Huang, C. Li, and C. Qiao, “A fast TDOA estimation algorithm for UAV signals,” in *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2018, pp. 1208–1212, doi: 10.1109/CompComm.2018.8780867.
- [8] P. Flak, “Drone detection sensor with continuous 2.4 GHz ISM band coverage based on cost-effective SDR platform,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114574–114586, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9513316>

- [9] G. Nugroho and D. Dectaviansyah, "Design, manufacture and performance analysis of an automatic antenna tracker for an unmanned aerial vehicle (UAV)," *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 32–40, 2018, doi: 10.14203/j.mev.2018.v9.32-40.
- [10] D. T. Gillins, C. Parrish, M. N. Gillins, and C. Simpson, "Eyes in the sky: Bridge inspections with unmanned aerial vehicles," Oregon Department of Transportation, Salem, OR, USA, Tech. Rep. SPR 787, Feb. 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/323521367_EYES_IN_THE_SKY_BRIDGE_INSPECTIONS_WITH_UNMANNED_AERIAL_VEHICLES_Final_Report_SPR_787
- [11] A. Martian, F. -L. Chipier, R. Craciunescu, C. Vladeanu, O. Fratu and I. Marghescu, "RF based UAV detection and defense systems: Survey and a novel solution," *2021 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Bucharest, Romania, 2021, pp. 1–4, doi: 10.1109/BlackSeaCom52164.2021.9527871.
- [12] Craigi, "Basics of radio frequencies for FPV quadcopter drones." Droneflyers. Accessed: 12 Jul. 2023. [Online]. Available: <https://www.droneflyers.com/basics-radio-frequencies-fpv-quadcopter-drones/>
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons, 2005. [Online]. Available: <https://ia800501.us.archive.org/30/items/AntennaTheoryAnalysisAndDesign3rdEd/Antenna%20Theory%20Analysis%20and%20Design%203rd%20ed.pdf>
- [14] J. Wang. 2015. 2D radiation pattern: Lecture notes in antenna theory and design [PowerPoint slides]. Available: https://is.buaa.edu.cn/_local/3/33/4C/1F4302A046B7FD33140ACF16957_D01288D7_3A1F7C.pdf
- [15] N. Minhas, A. Kumar, and S. Singh, "Performance analysis of ISM band antennas: A survey," *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no. 8, pp. 371–375, Sep.-Oct. 2017, doi: 10.26483/ijarcs.v8i8.4705.
- [16] A. Arbabi and S. Safavi-Naeini, "Maximum gain of a lossy antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 1, pp. 2–7, Jan. 2012, doi: 10.1109/TAP.2011.2167934.
- [17] G. R. DeJean, T. T. Thai, S. Nikolaou, and M. M. Tentzeris, "Design and analysis of microstrip bi-Yagi and quad-Yagi antenna arrays for WLAN applications," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, vol. 6, pp. 244–248, Jun. 2007, doi: 10.1109/LAWP.2007.893104.
- [18] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," in *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946, doi: 10.1109/JRPROC.1946.234568.
- [19] Robin Radar, "Why traditional radar isn't effective at tracking Drones," Robin Radar. [Accessed: 12 Sep. 2025]. [Online]. Available: <https://www.robinradar.com/why-traditional-radar-isnt-effective-at-tracking-drones>

- [20] K. Jitt-Aer, K. Thana, D. Chunsuparer, P. Vejchasarn, and Y. Phansenee, "Applying normalized difference vegetation index from UAV for fertilizer cost reduction in rice RD33 cultivation," *Sripatum Rev. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 101–114, Jan.–Dec. 2023. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/spurst/article/view/248431>

ระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม A Real-Time Sales Data Management System for Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs)

กฤษณการณ วังอัคร¹, อีรวัดน์ เลปนถิรางกูร¹, เบญญาภา มัศยามา¹,
สุระเจตน์ อ่อนฤทธิ์¹ และ เอกรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Kitsanakan Wongorakha¹, Theerawat Lapanathirangkoon¹, Benyapha Matsayamat¹,
Surajate On-rit¹ and Egkarin Watanyulertsakul^{1*}

¹Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

Corresponding Author Email : Egkarin.w@ubru.ac.th

Received 31 October 2025

Revised 07 February 2026

Accepted 16 February 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรวบรวม ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลยอดขายจากหลายสาขาได้อย่างถูกต้องและทันเวลา กรณีศึกษาที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นร้านค้าชุมชนประเภทคลังสินค้าในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีสาขาย่อยจำนวน 23 สาขา ครอบคลุม 4 จังหวัด ได้แก่ อุบลราชธานี ยโสธร ศรีสะเกษ และอำนาจเจริญ ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันด้วยเครื่องมือวิชวลสตูดิโอโค้ดร่วมกับภาษาพีเอชพีและจาวาสคริปต์ที่มีการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลมายเอสคิวแอลบนโครงสร้างของระบบคลาวด์ รองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์จากหลายสาขา และออกแบบสิทธิการใช้งาน 4 ระดับ ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้บริหาร โดยพัฒนาโดยใช้กระบวนการพัฒนาแบบแอไจล์ เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงของธุรกิจ ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามมาตราส่วนการใช้งานระบบกับกลุ่มผู้ใช้งานจำนวน 70 คน จากประชากรทั้งหมด 257 คน คิดเป็นร้อยละ 27.24 ผลการประเมินพบว่าระบบมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 84.78 จาก 100 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับ “มากที่สุด” ทั้งในด้านความง่ายในการใช้งาน ความถูกต้องของข้อมูล และความสามารถในการสนับสนุนการปฏิบัติงานจริง สะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการระบบแบบเรียลไทม์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการข้อมูลเชิงกลยุทธ์ และส่งเสริมให้ผู้ประกอบการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อยกระดับความสามารถในการแข่งขัน รวมทั้งต่อยอดสู่การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพยากรณ์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ระบบจัดการข้อมูล, ยอดขาย, ธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, เว็บแอปพลิเคชัน

Abstract

This research aimed to design and develop a real-time sales data management system for small and medium-sized enterprises (SMEs) to enhance the efficiency of collecting, processing, and visualizing sales data from multiple branches accurately and in a timely manner. The case study employed in this research was a community-based warehouse-type retail business located in the northeastern region of Thailand, comprising 23 branch stores across four provinces: Ubon Ratchathani, Yasothon, Sisaket, and Amnat Charoen. The developed system was implemented as a web-based application using Visual Studio Code, PHP, and JavaScript, integrated with a MySQL database deployed on a cloud-based infrastructure. The system was developed using an agile development methodology to ensure alignment with actual business operating contexts. System performance evaluation was conducted using a system usability scale questionnaire administered to 70 users from a total population of 257 users, representing 27.24% of the population. The evaluation results indicated that the system achieved an average score of 84.78 out of 100, corresponding to the “highest” level. High ratings were observed in terms of ease of use, data accuracy, and the system’s capability to effectively support actual operational tasks. These findings demonstrated that the integration of a real-time system significantly enhanced the efficiency of strategic data management and encouraged entrepreneurs to adopt digital technologies to strengthen their competitive capabilities. Furthermore, the system provided a foundation for future predictive data analytics to support effective decision-making.

Keywords: Data Management System, Sales, Small and Medium Enterprises, Web Application

1. บทนำ

ธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม หรือ SMEs มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสามารถสร้างผลิตภัณฑ์มวลรวมของประเทศ ภาครัฐจึงได้กำหนดนโยบายและมาตรการสนับสนุนให้ธุรกิจ SMEs ให้สามารถแข่งขันได้มากขึ้นและเตรียมพร้อมเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน ด้วยการอบรม บ่มเพาะธุรกิจ และสร้างเครือข่าย [1] อย่างไรก็ตาม การเติบโตและพัฒนาของผู้ประกอบการ SMEs ยากที่จะสำเร็จได้หากขาดการบริหารจัดการที่ดี [2] โดยเฉพาะด้านการบริหารจัดการทางการเงิน ซึ่งมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อธุรกิจมีหลายสาขาหรือกระจายอยู่ในพื้นที่ต่าง ๆ การบริหารจัดการดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีสารสนเทศที่สามารถจัดเก็บ ประมวลผล และแสดงผลข้อมูลได้อย่างถูกต้องและทันเวลา เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ด้านสภาพคล่องทางการเงิน การบัญชี และการควบคุมสินค้าคงคลังให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ในงานวิจัยนี้เลือกร้านค้าชุมชนของ SMEs แห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ดำเนินธุรกิจในลักษณะคลังสินค้าและจำหน่ายสินค้าอุปโภคบริโภค และมีสาขาย่อยภายใต้การดูแล 23 สาขา ครอบคลุมจังหวัดอุบลราชธานี

ยโสธร ศรีสะเกษ และอำนาจเจริญ การดำเนินงานของแต่ละสาขาใช้ระบบโปรแกรมขายหน้าร้าน (POS) ในการบันทึกข้อมูลการขาย ซึ่งมีรูปแบบการชำระเงินที่หลากหลาย ได้แก่ ชำระเงินสด การโอนเงินผ่านธนาคาร บัตรเครดิต บัตรสวัสดิการแห่งรัฐ และส่วนลดโปรโมชั่นต่าง ๆ ส่งผลทำให้เกิดความไม่สอดคล้องกันระหว่างยอดเงินสด ยอดเงินโอน และยอดขายที่บันทึกในระบบ POS ในบางกรณี สาเหตุมาจากการแบ่งชำระยอดซื้อเดียวกันผ่านหลายช่องทางที่ไม่เชื่อมโยงกัน เช่น การตัดยอดชำระบางส่วนด้วยบัตรสวัสดิการแห่งรัฐ และชำระส่วนที่เหลือผ่านแอปพลิเคชันธนาคาร เป็นต้น

แม้ว่าระบบ POS จะมีบทบาทสำคัญในการบันทึกข้อมูลธุรกรรม ณ จุดขาย แต่โดยทั่วไปถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานในระดับสาขาเป็นหลัก และมุ่งเน้นการจัดเก็บข้อมูลเชิงธุรกรรมรายรายการ มากกว่าการบริหารจัดการข้อมูลเชิงบูรณาการในระดับองค์กร โดยเฉพาะในบริบทของ SMEs ที่มีหลายสาขา ระบบ POS ทั่วไปยังขาดกลไกในการรวบรวม ตรวจสอบ และเชื่อมโยงข้อมูลยอดขายจากหลายช่องทางการชำระเงินให้มีความสอดคล้องกันในภาพรวม รวมทั้งไม่สามารถแสดงข้อมูลในลักษณะภาพรวมเชิงบริหารแบบเรียลไทม์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจของผู้บริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผู้ประกอบการยังคงต้องพึ่งพาการรวบรวมและตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมนอกเหนือจาก POS ประกอบกับ ร้านค้าชุมชนของ SMEs ในเขตพื้นที่ไกลมีลักษณะเฉพาะหลากหลาย ได้แก่ (1) ข้อจำกัดด้านโครงสร้างพื้นฐาน ความไม่มั่นคงของสัญญาณอินเทอร์เน็ต อาจทำให้ระบบ POS แบบคลาวด์เต็มรูปแบบใช้งานไม่ราบรื่น (2) ข้อกังวลด้านความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูล ผู้ประกอบการ SMEs ส่วนใหญ่มักไม่มั่นใจในการจัดเก็บข้อมูลทางการเงินที่ละเอียดอ่อนบนระบบคลาวด์ของบุคคลที่สาม โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกระแสเงินสดรายวัน และยอดขายที่แท้จริง (3) วัฒนธรรมองค์กรและความไว้วางใจในบุคลากร การบริหารจัดการแบบครอบครัวให้ความสำคัญกับหัวหน้าสาขาเป็นอย่างมาก โดยต้องการให้หัวหน้าสาขามีส่วนร่วมในการตรวจสอบและยืนยันข้อมูลก่อนส่งไปยังสำนักงานใหญ่ เพื่อสร้างความรับผิดชอบและความโปร่งใส (4) ความหลากหลายของช่องทางการชำระเงิน รวมถึงมาตรการส่งเสริมใหม่ ๆ จากภาครัฐ ซึ่งระบบ POS ทั่วไปไม่สามารถรองรับการจับคู่และตรวจสอบยอดเงินจากหลายช่องทางได้อย่างยืดหยุ่น ทำให้ยังคงต้องใช้กระบวนการตรวจสอบด้วยมือ ด้วยเหตุนี้ร้านค้าจึงต้องรายงานสรุปผ่านโปรแกรมสเปรดชีต เช่น ไมโครซอฟท์เอ็กเซลแล้วจัดเก็บบนเซิร์ฟเวอร์กลาง แม้วิธีการดังกล่าวจะรวบรวมข้อมูลจากหลายสาขาได้ แต่ยังมีข้อจำกัด เช่น ความหลากหลายของไฟล์ ความผิดพลาดในการบันทึก และข้อจำกัดในการใช้งานพร้อมกันจากหลายผู้ใช้ ส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการรวบรวมและประมวลผลข้อมูล และลดประสิทธิภาพการบริหารจัดการโดยรวม

จากข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีและรูปแบบการบริหารงานของร้านค้าชุมชนดังที่กล่าวมา คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบและพัฒนาระบบที่สามารถรวบรวมและแสดงผลข้อมูลยอดขายจากทุกสาขาได้แบบเรียลไทม์ ช่วยลดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล เพิ่มความรวดเร็วในการสรุปรายงานยอดขาย เพื่อส่งเสริมการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการท้องถิ่น [3] และเป็นต้นแบบให้หน่วยงานภาครัฐหรือเอกชนสามารถนำไปปรับใช้ในการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากอย่างยั่งยืน

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ด้านกลุ่มประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษากรณีของร้านค้าชุมชนประเภทคลังสินค้าภายใต้การบริหารของผู้ประกอบการ SMEs ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีจำนวนทั้งสิ้น 23 สาขา จำนวน 257 คน ครอบคลุมพื้นที่

จังหวัดอุบลราชธานี ยโสธร ศรีสะเกษ และอำนาจเจริญ โดยกลุ่มผู้ใช้งานระบบประกอบด้วย พนักงานขาย พนักงานบัญชี ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้บริหาร

2.2 ด้านเนื้อหาและระบบที่พัฒนา

ระบบสามารถบันทึกข้อมูลยอดขายแยกตามประเภทการชำระเงิน สามารถบันทึกข้อมูลยอดขายในระดับรายบุคคล รายสาขา และรายวัน พร้อมทั้งจัดทำรายงานสรุปยอดขายในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยกำหนดสิทธิ์การใช้งานแยกตามบทบาทของผู้ใช้ 4 ระดับ ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้บริหาร

2.3 ด้านเทคโนโลยี

การพัฒนากระบวนงานดำเนินการบนสถาปัตยกรรมเว็บแอปพลิเคชันที่เชื่อมต่อกับฐานข้อมูลซึ่งประมวลผลบนระบบคลาวด์ของบริษัท ไทคอมเนคตแห่งชาติ โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานแบบบริการ เพื่อรองรับการประมวลผลแบบหลายผู้ใช้งานและการเข้าถึงข้อมูลแบบเรียลไทม์จากทุกสาขา เซิร์ฟเวอร์ถูกกำหนดค่าด้วยระบบปฏิบัติการ Windows Server 2022 พร้อมหน่วยประมวลผล vCPU 4 คอร์ หน่วยความจำ 16 GB และพื้นที่จัดเก็บข้อมูล 200 GB ซึ่งสามารถรองรับปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นและรองรับการขยายระบบในอนาคต ทั้งในด้านประสิทธิภาพการประมวลผลและความยืดหยุ่นของโครงสร้างพื้นฐาน

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดเกี่ยวกับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

ธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม หมายถึง กิจการที่ดำเนินการโดยเอกชนซึ่งมีลักษณะการบริหารจัดการอย่างอิสระ โดยทั่วไปจะมีจำนวนพนักงานไม่มาก มีต้นทุนการดำเนินงานในระดับต่ำ และสามารถปรับตัวให้สอดคล้องกับสภาวะทางเศรษฐกิจและความต้องการของตลาดได้อย่างรวดเร็ว กิจการประเภทนี้ครอบคลุมในสามภาคส่วนหลัก ได้แก่ ภาคการผลิต ภาคการค้า และภาคการบริการ [4]

การส่งเสริมการพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมในประเทศ เป็นแนวทางการช่วยลดช่องว่างด้านการพัฒนาเศรษฐกิจและเสริมสร้างขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ ดังนั้น SMEs จึงเป็นยุทธศาสตร์สำคัญในการสร้างสมดุลทางเศรษฐกิจของภูมิภาค และเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจฐานรากอย่างยั่งยืน

3.2 ทฤษฎีระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ

ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการ คือ กระบวนการรวบรวม จัดเก็บ ประมวลผล และเผยแพร่ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวางแผน การควบคุม และการตัดสินใจของผู้บริหาร โดยทั่วไปแล้ว ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญห้าประการ ได้แก่ บุคลากร ฮาร์ดแวร์ ซอฟต์แวร์ ข้อมูล และกระบวนการ ซึ่งแต่ละส่วนทำหน้าที่สนับสนุนซึ่งกันและกันอย่างเป็นระบบ บุคลากรเป็นผู้ใช้และผู้บริหารระบบ ฮาร์ดแวร์คือเครื่องมือและอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล ซอฟต์แวร์เป็นชุดคำสั่งหรือโปรแกรมที่ช่วยจัดการและควบคุมการทำงานของระบบ ข้อมูลเป็นทรัพยากรหลักที่ใช้ในการตัดสินใจ ส่วนกระบวนการคือวิธีการดำเนินงานที่ทำให้ระบบสามารถประมวลผลข้อมูลและสร้างสารสนเทศได้อย่างถูกต้องครบถ้วน ซึ่งการใช้ระบบสารสนเทศกับงานด้านธุรกิจจะทำให้หน่วยงานหรือองค์กรต่าง ๆ สามารถเพิ่มผลผลิต และช่วยในกระบวนการผลิตหรืองานบริการนั้นสามารถสร้างข้อได้เปรียบในการแข่งขันทางการค้าได้ [5]

3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการจัดการระบบสารสนเทศด้านการบริหาร จากผลงานวิจัยของ พิรัช คิดการ และคณะ ในเรื่อง “ระบบจัดการข้อมูลคลังอาวุธ กองพันปฏิบัติการสงครามอิเล็กทรอนิกส์กรมการสื่อสารทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย” พบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเพิ่มความสะดวก ความรวดเร็ว และความถูกต้องในการจัดการงานซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลการซ่อมผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ทุกที่ทุกเวลา และรองรับการใช้

งานบนอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบ แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเว็บมีส่วนช่วยยกระดับการบริหารจัดการสารสนเทศภายในองค์กรได้อย่างเป็นรูปธรรม [6]

ชูพงษ์ พันธุ์แดง และคณะ ได้ศึกษาเรื่อง “ระบบการจัดการสารสนเทศของการลงทุนธุรกิจ SMEs ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย” พบว่า ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการที่ได้พัฒนาขึ้น โดยมีผู้ประกอบการธุรกิจ SMEs จำนวน 384 ราย ได้เข้าร่วมทดลองและใช้งาน มีผลการทดสอบสมมติฐานที่ชี้ให้เห็นว่า องค์ประกอบด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ คุณภาพการให้บริการ และประสิทธิภาพการดำเนินงานภายในองค์กร มีอิทธิพลทางตรงเชิงบวกต่อผลการดำเนินงานของธุรกิจ SMEs ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบการจัดการสารสนเทศที่ส่งผลต่อความสำเร็จของธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการลงทุนในภูมิภาค ซึ่งต้องอาศัยการจัดการข้อมูลที่มีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน [7]

บุญยพรรณ คงแก้ว และคณะ ได้ศึกษาเรื่อง “ประสิทธิภาพระบบสารสนเทศทางการบัญชีและคุณลักษณะองค์กรธุรกิจที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริหารธุรกิจ SMEs เขตภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย” พบว่า ผู้ใช้งานระบบสารสนเทศที่ได้พัฒนาขึ้น มีความคิดเห็นต่อประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศทางการบัญชีในระดับสูง โดยเฉพาะในด้าน ความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของการตัดสินใจทางธุรกิจ นอกจากนี้ คุณลักษณะขององค์กร โดยเฉพาะ นโยบายองค์กรที่ชัดเจนและสนับสนุนการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ มีผลเชิงบวกต่อประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศและการตัดสินใจของผู้บริหาร ผลการทดสอบสมมติฐานยืนยันว่า ทั้งประสิทธิภาพของระบบสารสนเทศทางการบัญชีและคุณลักษณะองค์กรมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการตัดสินใจของผู้บริหารธุรกิจ SMEs อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 [8]

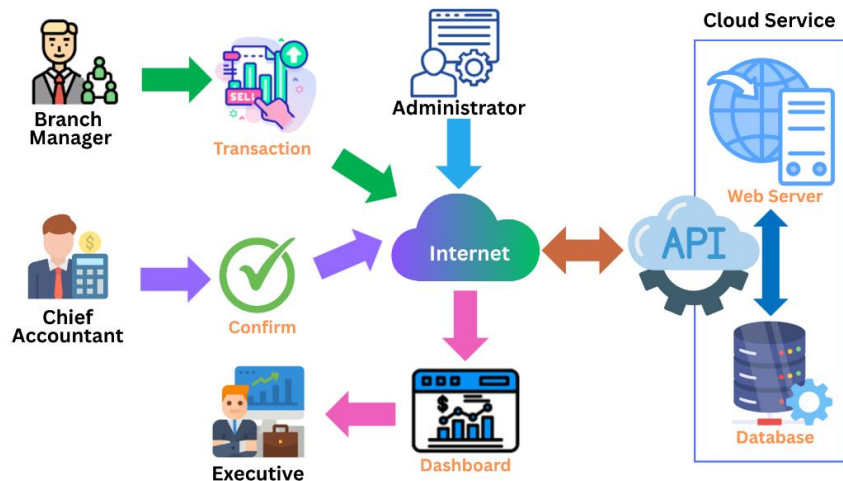
ณัชพัฒน์ สิทธิวิวัฒน์ และกฤษฎา เขียววัฒนสุข ได้ศึกษาเรื่อง “นวัตกรรมดิจิทัลมีบทบาทสำคัญต่อการเสริมความสามารถทางการแข่งขันของ SMEs” พบว่า นวัตกรรมดิจิทัลเป็นกลไกสำคัญที่ช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของ SMEs และสนับสนุนการเติบโตอย่างยั่งยืน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงาน สร้างมูลค่าให้สินค้าและบริการ และขยายโอกาสทางการตลาด ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้เกิดผลจำเป็นต้องมีความพร้อมด้านทรัพยากร บุคลากร และโครงสร้างธุรกิจ รวมถึงภาวะผู้นำ วิสัยทัศน์ดิจิทัล การจัดการการเปลี่ยนแปลง การพัฒนาทักษะ และเครือข่ายความร่วมมือ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความสำเร็จในการเปลี่ยนผ่านสู่ดิจิทัลของ SMEs. [9]

3.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

การพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมได้รับการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการข้อมูลยอดขายขององค์กร โดยมุ่งเน้นให้ผู้ใช้งานทุกระดับสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างถูกต้อง ทันเวลา และมีความปลอดภัยสูง ระบบได้รับการพัฒนาบนสถาปัตยกรรมแบบที่ทำงานอยู่บนเซิร์ฟเวอร์ในระบบคลาวด์ ซึ่งใช้การเชื่อมต่อผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตที่เป็นศูนย์กลางในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานและฐานข้อมูลบนบริการคลาวด์ เพื่อสนับสนุนการทำงานร่วมกันระหว่างหน่วยงานในรูปแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 1 เป็นแนวคิดของระบบประกอบด้วยผู้ใช้งานหลักสี่กลุ่ม ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้บริหาร ซึ่งแต่ละกลุ่มมีบทบาท หน้าที่ และสิทธิ์การใช้งานที่แตกต่างกันตามลำดับชั้นการดำเนินงานดังนี้

1) ผู้ดูแลระบบ (Administrator) เป็นผู้รับผิดชอบในการจัดการข้อมูลผู้ใช้ทั้งหมดภายในระบบ เช่น การเพิ่ม แก้ไข หรือลบข้อมูลผู้ใช้งาน รวมถึงการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลของแต่ละบุคคล เพื่อให้การใช้งานเป็นไปตามมาตรการควบคุมสิทธิ์และความมั่นคงปลอดภัยของระบบ



รูปที่ 1 แนวคิดการพัฒนาการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

2) ผู้บริหาร (Executive) สามารถเข้าสู่ระบบเพื่อเข้าถึงข้อมูลสรุปยอดขายที่ผ่านการอนุมัติแล้วได้ในรูปแบบของ แดชบอร์ด (Dashboard) หรือรายงานเชิงวิเคราะห์ (Analytical Report) ที่นำเสนอข้อมูลเชิงสถิติ เช่น ยอดขายรายเดือน รายไตรมาส รายปี รวมถึงการเปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่างสาขา ข้อมูลดังกล่าวช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหารให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับสถานการณ์ทางธุรกิจในปัจจุบัน

3) หัวหน้าฝ่ายบัญชี (Chief Accountant) ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลยอดขายของแต่ละสาขาที่ได้รับมาจากผู้จัดการสาขา หากข้อมูลถูกต้องจะดำเนินการอนุมัติรายการ (Approve) และบันทึกข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูลหลักที่จัดเก็บอยู่บนบริการคลาวด์ แต่หากพบข้อผิดพลาดจะปฏิเสธรายการ (Reject) นั้นและส่งกลับไปยังผู้จัดการสาขาให้ตรวจสอบและทำการแก้ไขในลำดับถัดไป กระบวนการนี้จะช่วยให้ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในระบบมีความถูกต้อง สมบูรณ์ และเชื่อถือได้

4) ผู้จัดการสาขา (Branch Manager) เป็นผู้รวบรวมและบันทึกข้อมูลยอดขายของพนักงานแต่ละคนเป็นประจำทุกวัน โดยสามารถแนบหลักฐานประกอบการขาย เช่น เอกสารยืนยันการชำระเงิน หรือใบเสร็จ เพื่อส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบกลางผ่านอินเทอร์เน็ต

ในส่วนของโครงสร้างระบบนั้น การประมวลผลข้อมูลทั้งหมดดำเนินการผ่านเครื่องแม่ข่ายที่ให้บริการเว็บไซต์และการจัดการฐานข้อมูลที่อยู่ภายใต้บริการคลาวด์ โดยมีการเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลผ่านส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ประชากรกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย พนักงานขาย พนักงานบัญชี ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และ ผู้บริหารในร้านค้าชุมชนจำนวน 23 สาขา รวมทั้งสิ้น 257 คน การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างใช้วิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยกำหนดกลุ่มตัวอย่างจำนวน 70 คน คิดเป็นร้อยละ 27.24 ของประชากรทั้งหมด ทั้งนี้ได้แบ่งกลุ่มตัวอย่างตามตำแหน่งหน้าที่และบทบาทในการปฏิบัติงาน ได้แก่ 1) พนักงานขาย จำนวน 30 คน 2) พนักงานบัญชี จำนวน 10 คน 3) หัวหน้าฝ่ายบัญชี จำนวน 10 คน 4) ผู้จัดการสาขา จำนวน 10 คน 5) ผู้ดูแลระบบ จำนวน 5 คน และ 6) ผู้บริหาร จำนวน 5 คน กลุ่มตัวอย่างดังกล่าวได้รับการคัดเลือกโดยพิจารณาจากความเกี่ยวข้องกับการใช้งานระบบในแต่ละระดับ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงาน ความถูกต้อง ความสะดวกใน

การใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบ ทั้งในระดับปฏิบัติการ ระดับบริหารจัดการ และระดับกำหนดนโยบาย เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานในทุกระดับได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิผล

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

4.2.1 ประเมินประสิทธิภาพของระบบ

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือแบบประเมินมาตราส่วนการใช้งานระบบ (System Usability Scale: SUS) ซึ่งเป็นมาตรวัดเชิงมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายสำหรับใช้ในการประเมินระดับ ความพึงพอใจและความง่ายต่อการใช้งานของระบบสารสนเทศ สามารถสรุปภาพรวมของความสามารถในการใช้งานของระบบทั้งในด้านความสะดวก ความสอดคล้อง ความซับซ้อน และความมั่นใจในการใช้งานของผู้ใช้ โดยพิจารณาผ่านองค์ประกอบหลัก 3 ด้าน ได้แก่ 1) ประสิทธิภาพ โดยพิจารณาว่าผู้ใช้งานสามารถดำเนินการภายในระบบได้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่ 2) ประสิทธิภาพ พิจารณาระดับความพยายาม เวลา และทรัพยากรที่ผู้ใช้งานต้องใช้เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และ 3) ความพึงพอใจ ประเมินระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อประสบการณ์การใช้งานระบบ โดยพิจารณาความสะดวก ความเข้าใจง่าย และการตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ [10]

แบบสอบถามมาตราส่วนการใช้งานระบบ ประกอบด้วย คำถามจำนวน 10 ข้อ อยู่ในรูปแบบของมาตราส่วนลิเคิร์ต 5 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 1 = น้อยที่สุด ถึง 5 = มากที่สุด คะแนนที่ได้จากการตอบแบบสอบถามจะถูกนำมาคำนวณตามเกณฑ์มาตรฐานของมาตราส่วนการใช้งานระบบ โดยการรวมคะแนนและคูณด้วย 2.5 เพื่อปรับให้อยู่ในช่วงคะแนนเต็ม 100 คะแนน ซึ่งสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบและตีความผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบได้ตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เกณฑ์วัดและประเมินผลด้วยมาตราส่วนการใช้งานระบบ

4.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ และพัฒนาระบบ ได้แก่ วิชวลสตูดิโอโค้ด โดยใช้ภาษาพีเอชพี จาวาสคริปต์ และโปรแกรมจัดการฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล

4.3 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

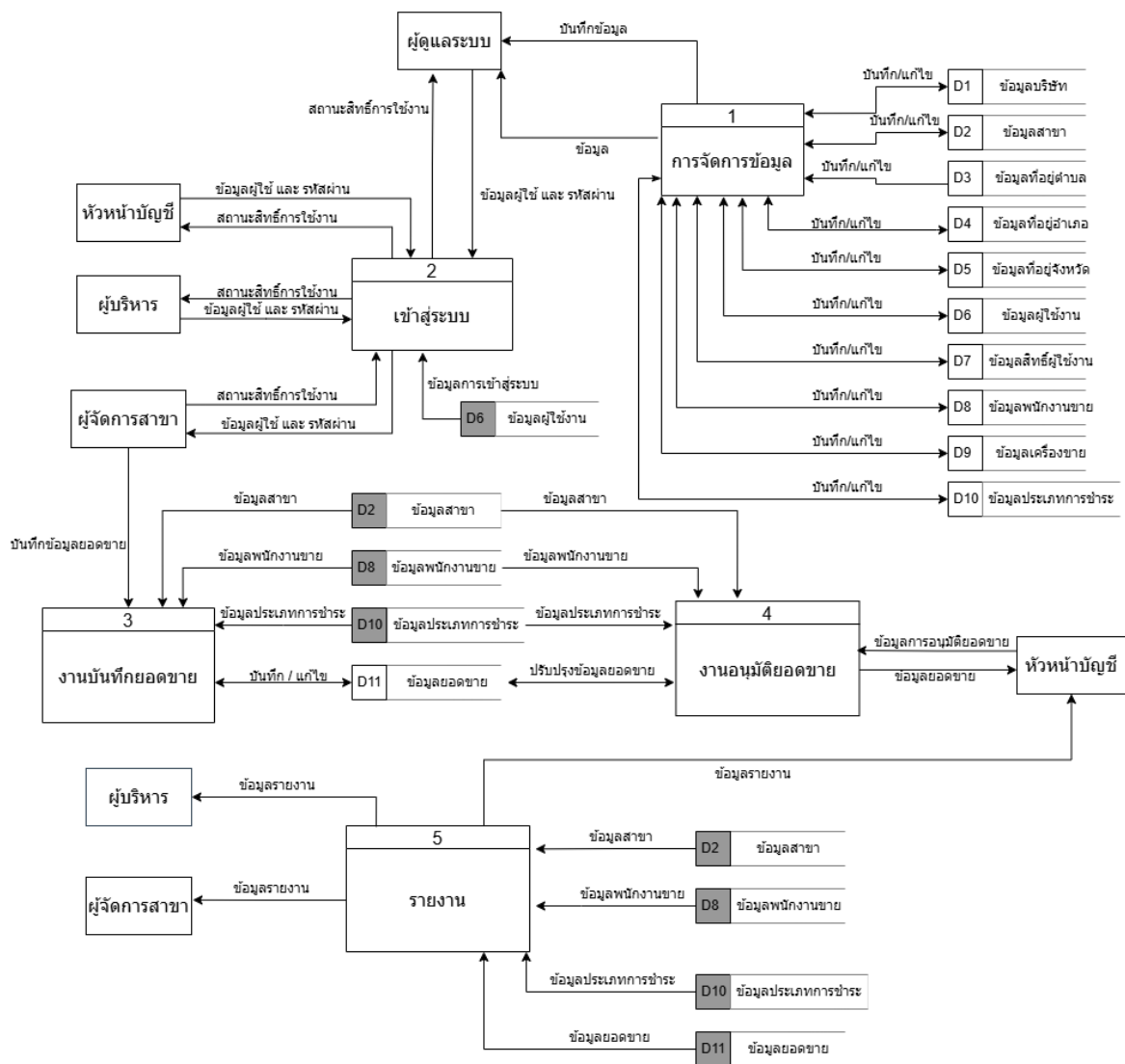
การดำเนินงานวิจัยนี้อ้างอิงแนวทางการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบแอจิล (Agile Methodology) ที่เน้นการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงและความไม่แน่นอนระหว่างการพัฒนา โดยใช้รูปแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบปรับตัว (Adaptive Software Development: ASD) เพื่อให้คณะผู้วิจัยสามารถสร้างซอฟต์แวร์ที่ตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ [11] โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้

4.3.1 ขั้นตอนคาดการณ์และกำหนดแนวทางเบื้องต้น (Speculate) ผู้วิจัยได้ร่วมกับผู้จัดการสาขาและพนักงานของร้านค้าชุมชน เพื่อทำการระบุปัญหาและข้อจำกัดของระบบเดิม ผ่านการสัมภาษณ์และเก็บข้อมูลจากการดำเนินงานจริง เช่น ความล่าช้าในการรวมข้อมูลยอดขาย ความคลาดเคลื่อนระหว่างสาขา และข้อจำกัดของรายงาน

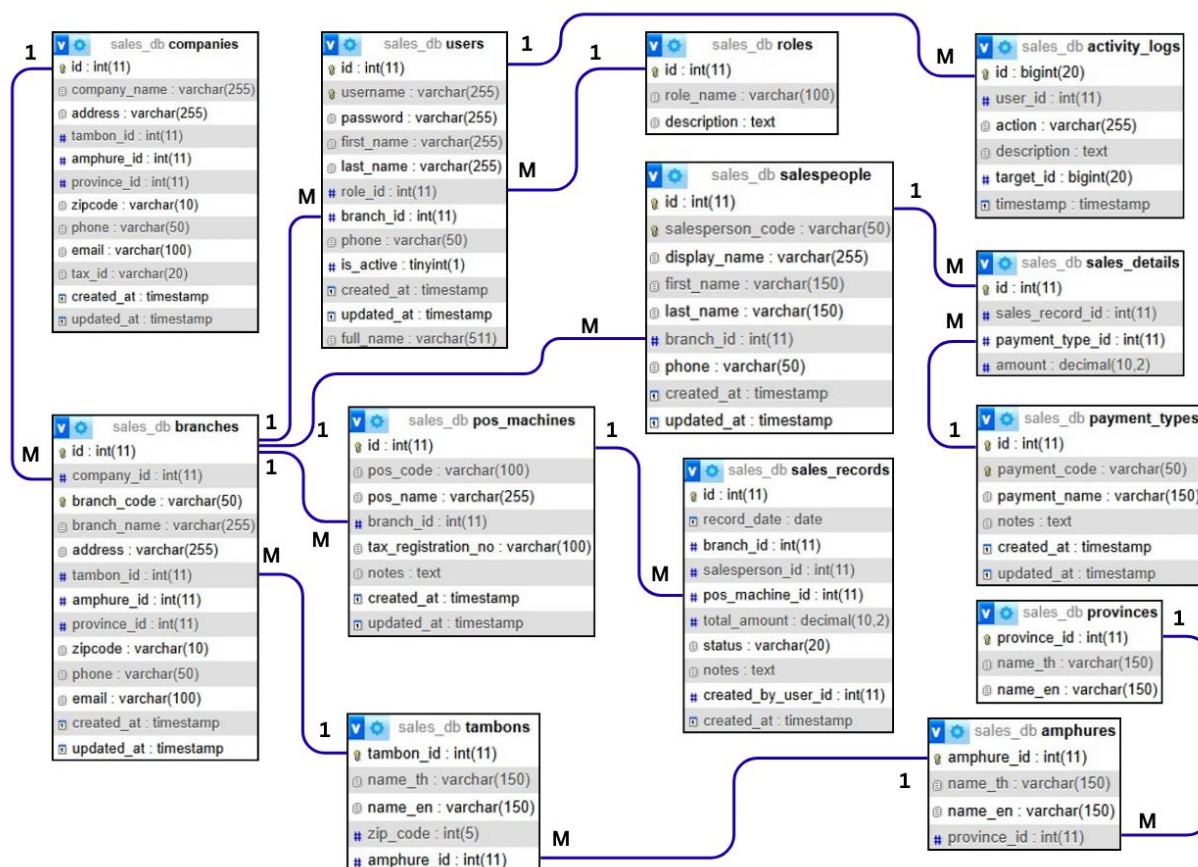
ยอดขาย พร้อมทั้งได้มีการกำหนดเป้าหมายเบื้องต้นและแนวทางการพัฒนาระบบโดยไม่กำหนดแผนตายตัว แต่เปิดโอกาสให้สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามผลลัพธ์และข้อเสนอแนะที่เกิดขึ้นในระยะต่อไป

4.3.2 ขั้นตอนทำงานร่วมกันและพัฒนาต้นแบบ (Collaborate) ผู้วิจัยได้ร่วมมือกับผู้ใช้งานจริง (ผู้จัดการสาขาและพนักงาน) เพื่อทำการออกแบบแนวทางแก้ไขปัญหาและพัฒนาต้นแบบระบบ อย่างต่อเนื่อง โดยเน้นการสื่อสารและการปรับปรุงฟังก์ชันร่วมกัน มีการสร้างแบบจำลองการทำงานและแผนภาพกระแสข้อมูล เพื่อให้เข้าใจภาพรวมระบบ ดำเนินการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ และฐานข้อมูล บนแนวคิดของการใช้งานจริง แล้วทำการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบด้วยภาษาพีเอชพีและจาวาสคริปต์ เพื่อเชื่อมต่อฐานข้อมูลมายเอสคิวแอล และทดสอบการใช้งานต้นแบบเบื้องต้นกับผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อปรับปรุงความถูกต้องของฟังก์ชันและรับข้อเสนอแนะเพื่อนำไปพัฒนารอบต่อไป

คณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแผนภาพกระแสข้อมูลของระบบ โดยมีกระบวนการหลัก ๆ ทั้งหมด 4 กระบวนการ ได้แก่ 1) การจัดการข้อมูลผู้ใช้ 2) การบันทึกข้อมูลยอดขาย 3) การตรวจสอบและอนุมัติยอดขาย และ 4) การรายงานยอดขาย ดังรายละเอียดในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพกระแสข้อมูล DFD ระดับที่ 1 ของระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์



รูปที่ 4 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล

จากรูปที่ 3 กระบวนการทั้ง 4 นี้ได้รับการออกแบบให้สามารถเชื่อมโยงข้อมูลถึงกันได้อย่างเป็นระบบ โดยเขียนแสดงโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (ER Diagram) ของระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์ได้ดังรูปที่ 4

จากกระบวนการออกแบบฐานข้อมูลที่ได้จากแผนภาพความสัมพันธ์ของข้อมูล สามารถนำมาพัฒนาเป็นต้นแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ของระบบได้โดยใช้โปรแกรม Canva ทั้งนี้ การออกแบบดังกล่าวได้กำหนดรูปแบบการทำงานแยกตามสิทธิ์ของผู้ใช้งานทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ ผู้บริหาร ผู้ดูแลระบบ หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้จัดการสาขา เพื่อให้การใช้งานเป็นไปอย่างเหมาะสมกับบทบาทของแต่ละประเภทผู้ใช้ ดังตัวอย่างการออกแบบหน้าจอระบบในรูปที่ 5

4.3.3 ขั้นตอนเรียนรู้และปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ทีมพัฒนาและผู้ใช้งานได้ นำระบบต้นแบบที่พัฒนาในเฟสแรกไปทดลองใช้งานจริงในสถานการณ์ปฏิบัติการของร้านค้าชุมชน 2 แห่งก่อน เพื่อเรียนรู้จากการใช้งานจริง วิเคราะห์พฤติกรรมของผู้ใช้ และระบุปัญหาที่เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งผลการใช้งานและข้อเสนอแนะจากผู้ใช้งานนำมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบให้มีความถูกต้องและสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้นในเฟสต่อไป พร้อมเพิ่มฟังก์ชันหรือฟีเจอร์ที่ได้พัฒนากลายหลังขยายการใช้งานไปยังสาขาอื่น ๆ ที่มีบริบทใกล้เคียงกันในรอบถัดไปของวงจร ASD การดำเนินงานในลักษณะนี้ช่วยให้ทีมพัฒนาสามารถ เรียนรู้และปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง ลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดในวงกว้าง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างครบถ้วน จนกระทั่งขยายการใช้งานครอบคลุมครบทั้ง 23 สาขา

ก) งานจัดการสิทธิ์ผู้ใช้

ข) งานจัดการยอดขาย

ค) งานตรวจสอบยอดขาย



ง) สรุปรายงานยอดขาย

รูปที่ 5 ตัวอย่างการออกแบบหน้าจอด้วยโปรแกรม Canva

5. ผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม มีผลการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

5.1 ผลการพัฒนาระบบ

การออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ประกอบด้วยผู้ใช้งาน 4 ระดับ พัฒนาโดยใช้โปรแกรมภาษาพีเอชพี จาวาสคริปต์ และฐานข้อมูลมาเยสคิวแอล มีการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบแอพลิเคชัน โดยใช้รูปแบบการพัฒนาซอฟต์แวร์แบบปรับตัว โดยมีผลการออกแบบดังนี้

5.1.1 ผู้ดูแลระบบ สิทธิ์ผู้ดูแลระบบประกอบด้วยฟังก์ชันการตั้งค่าหลักของข้อมูล เช่น ข้อมูลผู้มีสิทธิ์ใช้งาน ระบบ ข้อมูลสาขา ประเภทการชำระเงิน ข้อมูลเครื่องบันทึกยอดขาย รายงาน และประวัติการใช้งาน เป็นต้น ตัวอย่างหน้าจอระบบที่พัฒนาในสิทธิ์ผู้ดูแลระบบ แสดงดังรูปที่ 6

ก) การจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งานระบบ

ข) การจัดการข้อมูลสาขา

รูปที่ 6 หน้าจอสิทธิ์ผู้ดูแลระบบ

5.1.2 ผู้จัดการสาขา การพัฒนาระบบงานสำหรับสิทธิ์ผู้จัดการสาขาประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การบันทึกยอดขายเพื่อสรุปยอดรายรับประจำวันของสาขา โดยระบบจะจัดเก็บข้อมูลรายการขายจากโปรแกรมขายหน้าร้านของพนักงานแต่ละเครื่อง และจำแนกประเภทการชำระเงินตามรูปแบบการขายที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ ระบบงานในส่วนนี้ยังประกอบด้วยแดชบอร์ดแสดงยอดขายรายวัน ฟังก์ชันการบันทึกยอดขาย ประวัติการขาย และรายงานการส่งยอดขายของสาขา ตัวอย่างหน้าจอระบบที่พัฒนาในสิทธิ์ผู้จัดการสาขา แสดงดังรูปที่ 7

ก) การบันทึกยอดขายรายวัน

ข) การแก้ไขรายการขาย

รูปที่ 7 หน้าจอสิทธิ์ผู้จัดการสาขา

5.1.3 หัวหน้าฝ่ายบัญชี การพัฒนาระบบงานสำหรับสิทธิ์หัวหน้าฝ่ายบัญชีประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การจัดการยอดขาย ซึ่งครอบคลุมกระบวนการยืนยันยอดขายและการปฏิเสธยอดขายที่ได้รับจากผู้จัดการสาขาผ่านระบบ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลทางบัญชีและการเงิน โดยหัวหน้าฝ่ายบัญชีจะดำเนินการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างเงินสด เงินฝากธนาคาร คู่มือส่วนลด และยอดเครดิต รวมถึงบัตรสวัสดิการต่าง ๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องของยอดรายรับประจำวันของแต่ละสาขา ทั้งนี้ ขั้นตอนดังกล่าวถือเป็นกระบวนการที่มีความละเอียดอ่อนและมีความสำคัญต่อความถูกต้องของข้อมูลทางการเงิน ตัวอย่างหน้าจอระบบที่พัฒนาสำหรับสิทธิ์หัวหน้าฝ่ายบัญชี แสดงดังรูปที่ 8

ID	วันที่บันทึก	พนักงานขาย	สาขา	ยอดรวม	สถานะ	จัดการ
44	26/10/2025	นางสาว	เมือง	36,000.00	Approved	[Icons]
43	26/10/2025	นางสาว	เมือง	37,000.00	Approved	[Icons]
40	26/10/2025	นางสาว	เมือง	45,000.00	Approved	[Icons]
39	26/10/2025	นางสาว	เมือง	38,000.00	Approved	[Icons]
37	17/10/2025	นางสาว	เมือง	14,000.00	Approved	[Icons]
36	17/10/2025	นางสาว	เมือง	20,000.00	Approved	[Icons]
35	16/10/2025	นางสาว	เมือง	20,000.00	Approved	[Icons]
34	16/10/2025	นางสาว	เมือง	20,000.00	Approved	[Icons]

ก) การตรวจสอบยอดขายรายวัน

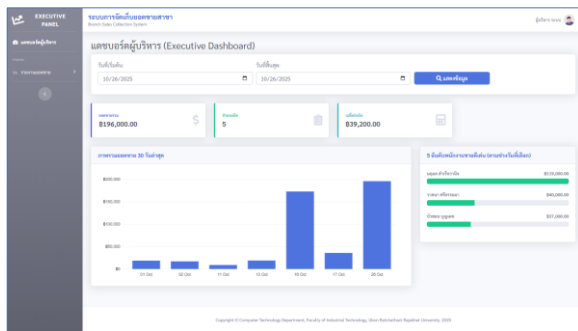
ID	วันที่บันทึก	พนักงานขาย	สาขา	ยอดรวม	สถานะ	จัดการ
43	26/10/2025	นางสาว	เมือง	37,000.00	Rejected	[Icons]
40	26/10/2025	นางสาว	เมือง	45,000.00	Rejected	[Icons]

ข) การปฏิเสธยอดขาย

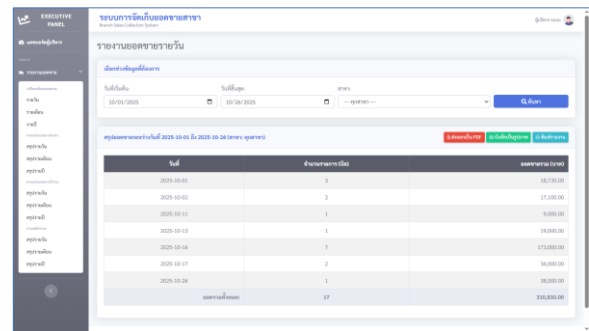
รูปที่ 8 หน้าจอสิทธิ์หัวหน้าฝ่ายบัญชี

5.1.4 ผู้บริหาร การพัฒนาระบบงานสำหรับสิทธิ์ผู้บริหารประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ แดชบอร์ดและระบบรายงานสำหรับการสืบค้นข้อมูลยอดขายในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติและเชิงเปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่างสาขา นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการส่งออกข้อมูลในรูปแบบเอกสารทั้งฉบับจริง และฉบับ

อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ของผู้บริหาร ตัวอย่างหน้าจอระบบที่พัฒนาสำหรับสิทธิ์ผู้บริหาร แสดงไว้ในรูปที่ 9



ก) แดชบอร์ดสำหรับผู้บริหาร



ข) รายงานการสรุปยอดขาย

รูปที่ 9 หน้าจอสิทธิ์ผู้บริหาร

5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ใช้แบบสอบถามแบบมาตราส่วนการใช้งานระบบกับกลุ่มผู้ใช้งานจำนวน 70 คน ประกอบด้วย 1) พนักงานขาย จำนวน 30 คน 2) พนักงานบัญชี จำนวน 10 คน 3) หัวหน้าฝ่ายบัญชี จำนวน 10 คน 4) ผู้จัดการสาขา จำนวน 10 คน 5) ผู้ดูแลระบบ จำนวน 5 คน และ 6) ผู้บริหาร จำนวน 5 คน โดยแบบสอบถามประกอบด้วยคำถามจำนวน 10 ข้อ ในรูปแบบของลิเคิร์ต 5 ระดับจาก 1 ถึง 5 ซึ่งเป็นการประเมินความคิดเห็นของผู้ใช้ต่อการใช้งานระบบในภาพรวม โดยข้อคำถามเลขคี่เป็นกลุ่มคำถามเชิงบวก ส่วนข้อคำถามเลขคู่เป็นกลุ่มคำถามเชิงลบ เพื่อสะท้อนมุมมองทั้งด้านบวกและด้านลบของผู้ใช้งาน มีผลที่ได้จากแบบประเมินดังรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนการใช้งานระบบ

รายการประเมิน	$\bar{x}$	S.D.	ความหมาย
1. ฉันคิดว่าฉันจะใช้ระบบนี้บ่อยครั้ง	4.26	0.76	มาก
2. ฉันรู้สึกว่ารระบบนี้ซับซ้อนเกินไป	1.99	0.73	น้อย
3. ฉันรู้สึกว่ารระบบนี้ใช้งานง่าย	4.47	0.61	มาก
4. ฉันคิดว่าฉันต้องได้รับความช่วยเหลือจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อใช้งานระบบนี้	1.51	0.58	น้อย
5. ฉันคิดว่าฟังก์ชันต่าง ๆ ในระบบได้รับการบูรณาการอย่างเหมาะสม	4.57	0.53	มากที่สุด
6. ฉันรู้สึกว่ามีความไม่สอดคล้องกันมากในระบบนี้	1.46	0.65	น้อยที่สุด
7. ฉันคิดว่าผู้คนส่วนใหญ่จะเรียนรู้วิธีการใช้ระบบนี้ได้อย่างรวดเร็ว	4.31	0.58	มาก
8. ฉันรู้สึกว่ารระบบนี้ใช้งานยุ่งยากเกินไป	1.50	0.61	น้อย
9. ฉันรู้สึกมั่นใจเมื่อใช้งานระบบนี้	4.33	0.63	มาก
10. ฉันต้องเรียนรู้อะไรหลายอย่างก่อนจึงจะสามารถใช้ระบบนี้ได้	1.57	0.63	น้อย

ข้อมูลค่าเฉลี่ยจากตารางที่ 1 สามารถหาค่าระดับความพึงพอใจในรูปแบบค่าคะแนนมาตราส่วนการใช้งานระบบ ได้จากสมการที่ 1 - 3 ดังนี้

$$SumOdd = (Q_1 + Q_3 + Q_5 + Q_7 + Q_9 - 5) \quad (1)$$

$$SumEven = (25 - (Q_2 + Q_4 + Q_6 + Q_8 + Q_{10})) \quad (2)$$

$$SUS = (SUS_{odd} + SUS_{even}) \times 2.5 \quad (3)$$

เมื่อ SUS คือ คะแนนมาตราส่วนการใช้งานระบบ
 $SumOdd$ คือ คะแนนรวมของค่าเฉลี่ยในคำถามเลขคี่
 $SumEven$ คือ คะแนนรวมของค่าเฉลี่ยในคำถามเลขคู่
 Q_n คือ คะแนนค่าเฉลี่ยในข้อคำถามลำดับที่ n

โดยค่าระดับคะแนนมาตราส่วนการใช้งานระบบที่คำนวณได้ จะแสดงให้เห็นความพึงพอใจในการใช้งานระบบที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งมีระดับความพึงพอใจ 5 ระดับ [10] ประกอบด้วย

- 1) ระดับมากที่สุด มีค่าคะแนนตั้งแต่ 80.30
- 2) ระดับมาก มีค่าคะแนนตั้งแต่ 68.00 แต่น้อยกว่า 80.30
- 3) ระดับพอใช้ มีค่าคะแนน 68.00
- 4) ระดับน้อย มีค่าคะแนนตั้งแต่ 51.00 แต่น้อยกว่า 68.00
- 5) ระดับน้อยที่สุด มีค่าคะแนนน้อยกว่า 51.00

จากผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนการใช้งานจากกลุ่มผู้ใช้งานจำนวน 70 คน พบว่า ได้รับคะแนนมาตราส่วนการใช้งานระบบที่ 84.78 คะแนน จากคะแนนเต็ม 100 ซึ่งอยู่ในระดับ “มากที่สุด” แสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถในการใช้งานที่ดีเหมาะสมในการนำไปใช้งาน ผู้ใช้ส่วนใหญ่มีความเห็นสอดคล้องกันว่าระบบได้รับการบูรณาการอย่างเหมาะสมและลงตัว (ค่าเฉลี่ย 4.57 ± 0.53) ระบบใช้งานง่าย (ค่าเฉลี่ย 4.47 ± 0.61) และมีความมั่นใจในการใช้งาน (ค่าเฉลี่ย 4.33 ± 0.63) ขณะเดียวกันพบว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสอดคล้องกับงานที่ทำอยู่ (ค่าเฉลี่ย 1.46 ± 0.65) และไม่มีความยุ่งยากในการใช้งาน (ค่าเฉลี่ย 1.50 ± 0.61) ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้อง ใช้งานง่าย เรียนรู้ได้รวดเร็ว และตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์สำหรับธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยมุ่งเน้นการรวบรวมและแสดงผลข้อมูลยอดขายจากทุกสาขาได้ทันเวลา เพื่อลดความผิดพลาดในการบันทึกข้อมูล เพิ่มความรวดเร็วและความถูกต้องในการสรุปรายงาน ตลอดจนส่งเสริมการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาช่วยยกระดับกระบวนการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นรองรับผู้ใช้งาน 4 ระดับ ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ ผู้จัดการสาขา หัวหน้าฝ่ายบัญชี และผู้บริหาร และแต่ละระดับมีฟังก์ชันการทำงานเฉพาะตามบทบาทหน้าที่ ครอบคลุมการจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งาน เช่น การบันทึกและตรวจสอบยอดขาย การยืนยันข้อมูลทางบัญชี และการสืบค้นข้อมูลผ่านแดชบอร์ดแบบเรียลไทม์ เป็นต้น ระบบพัฒนาโดยใช้กระบวนการพัฒนาแบบ 애จิลเพื่อให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงของธุรกิจกลุ่มเป้าหมาย และวัดประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยแบบสอบถามมาตราส่วนการใช้งานระบบ (SUS) กับกลุ่มผู้ใช้งานจำนวน 70 คน ที่คัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มแบบเจาะจง ประกอบด้วย พนักงานขาย พนักงานบัญชี หัวหน้าฝ่ายบัญชี ผู้จัดการสาขา ผู้ดูแลระบบ และผู้บริหาร ผลการประเมินพบว่า ผู้ใช้มี

ความพึงพอใจในระดับสูง โดยข้อความเชิงบวกมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด เช่น ระบบมีการบูรณาการฟังก์ชันการทำงานอย่างเหมาะสม (ค่าเฉลี่ย 4.57) และระบบใช้งานง่าย (ค่าเฉลี่ย 4.47) ในขณะที่ข้อความเชิงลบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับน้อยถึงน้อยที่สุด (ค่าเฉลี่ย 1.46–1.99) สะท้อนว่าระบบมีความซับซ้อนต่ำและใช้งานได้ไม่ยุ่งยาก เมื่อคำนวณคะแนนรวมตามหลักการของแบบสอบถามมาตราส่วนการใช้ระบบ พบว่า ระบบมีคะแนนเฉลี่ย 84.78 จาก 100 คะแนนเต็ม ซึ่งจัดอยู่ในระดับ “มากที่สุด”

ผลการวิจัยสอดคล้องกับงานของเสาวคนธ์ หนูขาว [12] ที่ชี้ว่า ความพร้อมด้านเทคโนโลยีและการส่งเสริมทักษะดิจิทัลของบุคลากร เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติงาน ซึ่งพบได้จากความสามารถของผู้ใช้ในงานนี้ที่สามารถเรียนรู้และใช้งานระบบได้อย่างรวดเร็ว และมีอัตราความผิดพลาดต่ำ นำไปสู่คะแนนความพึงพอใจที่สูงในหลายมิติ ประกอบกับความสามารถของระบบในการรวบรวมและแสดงผลข้อมูลยอดขายจากทุกสาขาแบบเรียลไทม์ได้อย่างถูกต้องและประมวลผลได้รวดเร็ว ส่งผลให้การปฏิบัติงานโดยรวมขององค์กรมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในด้านการบริหารจัดการกลยุทธ์ธุรกิจ ผลการวิจัยสอดคล้องกับข้อค้นพบของ ณชพัฒน์ สิทธิวิวัฒน์ และกฤษฎา เขียวพัฒนสุข [9] ที่ระบุว่า การบูรณาการเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ากับกระบวนการจัดการข้อมูลเป็นกลไกสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของ SMEs ทั้งในด้านประสิทธิภาพการดำเนินงานและความสามารถในการตอบสนองต่อภาวะเศรษฐกิจที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ระบบข้อมูลยอดขายแบบเรียลไทม์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงไม่เพียงเป็นเครื่องมือด้านข้อมูล แต่ยังเป็นโครงสร้างสนับสนุนการตัดสินใจที่ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถประเมินสถานการณ์ธุรกิจได้อย่างแม่นยำและวางกลยุทธ์ได้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทางการแข่งขันในปัจจุบัน

7. ข้อเสนอแนะ

แนวทางเพิ่มเติมสำหรับการพัฒนาต่อยอดงานวิจัย ควรศึกษาการปรับใช้ระบบกับกลุ่มผู้ประกอบการชุมชนหลากหลายประเภท และพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อช่วยให้ชุมชนสามารถวางแผนธุรกิจอย่างยั่งยืน พร้อมสำรวจการเชื่อมโยงเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น AI และ Blockchain เพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการท้องถิ่น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถานประกอบการชุมชนและอาสาสมัครที่สละเวลาในการเข้าร่วมโครงการวิจัย และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติศักดิ์ อังคะนาวัน, อังคิภา แนวจำปา และนราทิพย์ ชุตินวงศ์, “มาตรฐาน SME ก้าวไกล ด้วย ระบบ M-Commerce,” *วารสารสมาคมนักวิจัย*, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, หน้า 87–99, พ.ศ.-ส.ค., 2562. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: http://ar.or.th/ImageData/Magazine/20054/DL_EN_10503.pdf?t=638904741199211189
- [2] สุรัชย์ ภัทรบรรเจิด, “นโยบายการจ่ายปันผลสำหรับผู้ประกอบการ SMEs ในภาวะวิกฤติเศรษฐกิจ,” *วารสารการจัดการสมัยใหม่*, ปีที่ 15, ฉบับที่ 1, หน้า 23–34, ม.ค.-มิ.ย., 2562. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/stou-sms-pr/article/view/61012/90751>
- [3] นันทรัตน์ นามบุรี, “ตัวแบบประสิทธิภาพการใช้สารสนเทศทางการบัญชีที่ส่งผลต่อความได้เปรียบทางการแข่งขันของธุรกิจ SMEs ในเขตสามจังหวัดชายแดนภาคใต้,” *วารสารวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 23–34, ก.ค.-ธ.ค., 2561. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/JMSNPRU/article/download/166065/120098/>

- [4] ลภัสวัฒน์ ศุภผลกุลนันท์, “การปรับตัวของผู้ประกอบการธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อมต่อการเปิดเสรีทางการค้าอาเซียน: กรณีศึกษาจังหวัดสงขลา,” *วารสารราชชมงคลล้านนา*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 79–90, ก.ค.–ธ.ค., 2559. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/balajhss/article/view/75518>
- [5] ภาณุวัฒน์ ชันจา, “การพัฒนาระบบสารสนเทศงานวิจัยเชิงพื้นที่สำหรับเครือข่ายมหาวิทยาลัยราชภัฏ,” *วารสารเทคโนโลยีสารสนเทศ มจพ.*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 64–74, ม.ค.–มิ.ย., 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/IT_Journal/article/view/248867/168732
- [6] พีรธัช คิดการ, นพวรรณ ปุละเสถียง, อมฤตา ฤทธิภักดี และ สมคิด สุทธิธารวัช, “ระบบจัดการข้อมูลคลังอาวุธ กองพันปฏิบัติการสงครามอิเล็กทรอนิกส์กรมการสื่อสารทหาร กองบัญชาการกองทัพไทย,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนายเรืออากาศ*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 2, หน้า 56–66, ก.ค.–ธ.ค., 2563. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/242046/164770>
- [7] ชูพงษ์ พันธุ์แดง, นิตยา ไหวดี, ศุภิกา ประเสริฐพร, นภัสวรรณ ดาทุมมา, รัชดา ศรีสุระพล และ กนกอร บุญมี, “ระบบการจัดการสารสนเทศของการลงทุนธุรกิจ SMEs ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ของประเทศไทย,” *วารสารการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, หน้า 183–213, เม.ย.–มิ.ย., 2562. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/mbs/article/view/220565>
- [8] ปุณยพรรณ คงแก้ว, พชร พระสงฆ์, อริยญา จินาชาญ และ อารยา แก้วคง, “ประสิทธิภาพระบบสารสนเทศทางการบัญชีและคุณลักษณะองค์กรธุรกิจที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้บริหารธุรกิจวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) เขตภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย,” *วารสาร มจร สังคมศาสตร์ปริทรรศน์*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 124–137, ก.ค.–ส.ค., 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://riss.rmuts.ac.th/upload/doc/202603/XjTAP0iu4W0KudKne9dW/XjTAP0iu4W0KudKne9dW.pdf>
- [9] ณชพัฒน์ สิทธิวิวัฒน์ และ ฤชดา เขียววัฒนสุข, “นวัตกรรมดิจิทัลกับการยกระดับความสามารถทางการแข่งขันสำหรับธุรกิจ SMEs,” *วารสารวิชาการสถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 400–411, ม.ค.–มิ.ย., 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/svittj/article/view/278846/188651>
- [10] เกรรินทร์ วทัญญูเลิศสกุล, วจิราภรณ์ ประชุมรักษ์, ธัญลักษณ์ ดีกา และ ภักศจิรณ ชันทอง, “การพัฒนาต้นแบบแอปพลิเคชันคัดกรองภาวะสมองเสื่อม,” *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 29–41, ก.ค.–ธ.ค., 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jitubru/article/view/250720>
- [11] L. Soares, M. Esteves, A. Tereso, and F. Duarte, “Application of Agile Frameworks in Projects: criteria identification for their selection,” *Procedia Computer Science*, vol. 256, pp. 1845–1852, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.02.325.
- [12] เสาวคนธ์ หนูขาว, “การพัฒนาระบบสารสนเทศทางการตลาดเพื่อพัฒนาทักษะการใช้เทคโนโลยีดิจิทัลของเกษตรกรและผู้ประกอบการในพื้นที่ตำบลเขาคันทรง อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี เพื่อยกระดับสู่การเป็นผู้ประกอบการออนไลน์,” *วารสารบริหารธุรกิจ*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 61–76, ม.ค.–มิ.ย., 2566. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so02.tci-thaijo.org/index.php/fam/article/view/260835/175394>

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติเพื่อสนับสนุน
กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน
Development of a Web-Based 3D Model Visualization Application
to Support Community-Based Product Design Processes

ดวงทิพย์ รับพรดี¹ และ ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชย์กุล^{1*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีมัลติมีเดีย, คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

Duangthip Rubporndee¹ and Yanapat Lappanitchyakul^{1*}

¹Department of Multimedia Technology, Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajabhat University

Corresponding Author Email : yanapat.l@lawasri.tru.ac.th

Received 13 February 2026

Revised 24 March 2026

Accepted 31 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยและพัฒนานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ เพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน โดยมีพื้นฐานจากปัญหาการนำเสนอแบบสองมิติที่ไม่สามารถสื่อสารรูปทรง สัดส่วน และรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครบถ้วน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทำความเข้าใจและการตัดสินใจเชิงออกแบบ ระบบถูกพัฒนาด้วยเทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js เพื่อให้สามารถแสดงผลโมเดลผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม ขอบเขตการศึกษาครอบคลุมการพัฒนาโมเดลบรรจุภัณฑ์และฉลากผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบในรูปแบบไฟล์ .glb และ .obj พร้อมเพิ่มประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการลดจำนวน polygon และการบีบอัดไฟล์ ผลการทดลองเชิงเทคนิคพบว่า การลดจำนวน polygon ประมาณ 30% ทำให้ขนาดไฟล์ลดลงจาก 120–150 MB เหลือ 40–60 MB และลดเวลาโหลดจาก 8–10 วินาที เหลือ 5–8 วินาที โดยคงอัตราเฟรมเฉลี่ย 18–20 FPS และสามารถทำงานได้บนคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และแท็บเล็ตโดยไม่พบข้อผิดพลาด นอกจากนี้ได้ทดลองใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน ผลการประเมินมีค่าเฉลี่ยรวม 4.74 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.51 และประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน สะท้อนถึงความเหมาะสมในระดับสูง ผู้ใช้ระบุว่าระบบช่วยให้เข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารเชิงออกแบบ และสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจร่วมกันในระดับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสรุป ระบบสามารถเป็นเครื่องมือดิจิทัลที่ช่วยยกระดับกระบวนการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน และมีศักยภาพต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้ด้านการเรียนการสอนและงานวิจัยในอนาคต

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, โมเดลสามมิติ, เว็บจีแอล, ทรیدฮเจเอส, การออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชน

Abstract

This research and development study aims to develop a web-based interactive 3D visualization application to support participatory product design in community contexts. The study is grounded in the limitations of conventional two-dimensional presentations, which are unable to fully communicate product shape, proportions, and details, resulting in misunderstandings and inefficiencies in design-related decision-making. The system was developed using WebGL technology and the Three.js library to enable real-time 3D rendering through web browsers without requiring additional software installation. The scope of the study included the development of eight packaging and product label models in .glb and .obj formats. Model optimization techniques, including polygon reduction and file compression, were applied to enhance system performance. Technical testing results indicated that reducing the polygon count by approximately 30% decreased file sizes from 120–150 MB to 40–60 MB and reduced loading time from 8–10 seconds to 5–8 seconds, while maintaining an average frame rate of 18–20 FPS. The system functioned reliably across desktop computers, smartphones, and tablets without errors. In addition, the system was tested with 51 participants and evaluated by five experts. The overall mean score was 4.74 with a standard deviation of 0.51, indicating a high level of suitability. Users reported improved clarity in understanding product forms, reduced design communication errors, and enhanced collaborative decision-making at the community level. In conclusion, the developed system serves as a digital tool that enhances the product design and community-based product development process, with strong potential for application in educational settings and future research.

Keywords: Web-based Application, 3D Model Visualization, WebGL, Three.js, Community-based Product Design

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับแสดงผลโมเดลสามมิติแบบปฏิสัมพันธ์ (Interactive 3D Web Application) เพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารระหว่างนักออกแบบและกลุ่มเป้าหมายในพื้นที่ห่างไกล โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js ในการเรนเดอร์พื้นผิวและรูปทรงแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ [1], [2] การวิจัยนี้จะช่วยให้เกิดเครื่องมือดิจิทัลที่เข้าถึงง่าย ลดต้นทุนการผลิตต้นแบบที่ผิดพลาด และยกระดับขีดความสามารถทางการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ชุมชน มุ่งเน้นการสร้างระบบที่สามารถแสดงผลได้บนหลากหลายแพลตฟอร์ม (Cross-platform) โดยไม่ต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ขั้นตอน

การนำเข้าโมเดล การปรับแต่งคุณลักษณะของวัสดุ ไปจนถึงการแสดงผลบรรจุภัณฑ์ในสภาพแวดล้อมจำลอง เพื่อการตัดสินใจเชิงออกแบบ

การพัฒนาระบบดังกล่าวจะช่วยยกระดับมาตรฐานการสื่อสารในกระบวนการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม โดยเปลี่ยนจากการพึ่งพาภาพร่างสองมิติหรือแบบจำลองกระดาษที่ไม่สามารถถ่ายทอดสัดส่วนจริงได้อย่างครบถ้วน ไปสู่การใช้ระบบ Digital Twin ขนาดเล็กที่ช่วยให้เข้าใจมิติและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แม่นยำขึ้น [3], [4] ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารระหว่างนักออกแบบและผู้ผลิตในท้องถิ่น [5], [6] แต่ยังสามารถต่อยอดไปสู่เครื่องมือการเรียนรู้เชิงกายวิภาคหรือธรณีวิทยาที่ต้องการการโต้ตอบกับโมเดลที่มีความซับซ้อนสูงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อีกด้วย [7], [8]

ปัญหาสำคัญของการแสดงผลสามมิติบนเว็บในปัจจุบันคือ ข้อจำกัดด้านทรัพยากรของอุปกรณ์ปลายทาง (Hardware Constraints) โดยเฉพาะเมื่อต้องประมวลผลโมเดลที่มีความละเอียดสูงบนอุปกรณ์พกพาในพื้นที่ทางไกล ซึ่งมักประสบปัญหาอัตราเฟรมเรตต่ำ (Low Frame Rate) และการใช้หน่วยความจำที่สูงเกินจำเป็น [9], [10] แม้จะมีมาตรฐาน WebGL แต่กระบวนการจัดการข้อมูลขนาดใหญ่แบบเรียลไทม์ยังคงเผชิญกับความท้าทายในเรื่อง Latency และความซับซ้อนของโครงสร้างข้อมูลแบบจำลองสามมิติ (3D Mesh Data) และคุณลักษณะของพื้นผิว (Texture Maps) ที่มีรายละเอียดสูง [10], [11] ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสบการณ์ผู้ใช้งาน (User Experience) และความราบรื่นในการโต้ตอบกับโมเดลในขณะปรึกษาหารือร่วมกับชุมชน

จากการสังเคราะห์วรรณกรรมพบว่า งานวิจัยด้าน Web-based 3D Visualization [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] ได้แสดงให้เห็นศักยภาพของเทคโนโลยี WebGL และ Three.js ในการพัฒนาเครื่องมือแสดงผลสามมิติบนเว็บที่สามารถโต้ตอบได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งถือเป็น จุดแข็งสำคัญของงานวิจัยสายเทคโนโลยี เนื่องจากสามารถรองรับการแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาเชิงเทคนิคของระบบแสดงผล เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการเรนเดอร์หรือการจัดการข้อมูลกราฟิก โดย ยังมีข้อจำกัดในการนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนอย่างเป็นระบบ ขณะเดียวกัน งานวิจัยด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน [12], [13], [14] แม้จะมี จุดแข็งด้านกระบวนการมีส่วนร่วมและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับอัตลักษณ์ท้องถิ่น แต่ยังคงพึ่งพาการนำเสนอแนวคิดผลิตภัณฑ์ผ่านภาพสองมิติเป็นหลัก ซึ่งไม่สามารถถ่ายทอดมิติ รูปทรง และสัดส่วนจริงของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครบถ้วน ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการสื่อสารเชิงออกแบบ งานวิจัยนี้จึงสร้างความแตกต่างโดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเทคนิค (Technical Optimization) สำหรับบริบทชุมชนโดยเฉพาะ ผ่านเทคนิคการลดจำนวน polygon และการจัดการ texture เพื่อให้ได้ค่าความหน่วงต่ำ (Low Latency) และอัตราเฟรมที่คงที่บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Heterogeneous Devices) ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีทรัพยากรจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งปิดช่องว่างดังกล่าว (Research Gap) ด้วยการบูรณาการการเพิ่มประสิทธิภาพกราฟิก (3D Optimization) เข้ากับแนวคิดการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (Participatory Design) เพื่อสร้างเครื่องมือดิจิทัลที่ลดอุปสรรคการสื่อสาร และสนับสนุนการตัดสินใจร่วมกันของชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตดังต่อไปนี้

1. พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ โดยใช้ WebGL และ Three.js
2. พัฒนาโมเดลผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์และฉลากจำนวน 8 แบบ ในรูปแบบไฟล์ .glb และ .obj
3. ปรับเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลด้วยเทคนิค Mesh Decimation (ลด polygon ประมาณ 30%) และปรับ texture เป็น 1024×1024 พิกเซล

4. ทดสอบประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ได้แก่ ขนาดไฟล์ เวลาโหลด และค่า FPS
5. ทดลองใช้งานกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน
6. ประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน
7. ประเมินผลทั้งเชิงเทคนิคและเชิงการใช้งาน

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การเรนเดอร์กราฟิกสามมิติแบบเรียลไทม์บนเว็บ

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติบนเว็บอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีด้านการเรนเดอร์กราฟิกแบบเรียลไทม์ (Real-Time Rendering) ซึ่งเป็นกระบวนการประมวลผลข้อมูลเชิงเรขาคณิตและพื้นผิวให้แสดงผลบนหน้าจออย่างต่อเนื่องผ่านหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) [1] เทคโนโลยี WebGL ทำหน้าที่เป็นมาตรฐานที่ช่วยให้เว็บเบราว์เซอร์สามารถเข้าถึงความสามารถของ GPU ได้โดยตรง ส่งผลให้สามารถแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บได้โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม [1], [2] แนวคิดดังกล่าวเป็นรากฐานสำคัญของการสร้างระบบแสดงผลสามมิติแบบโต้ตอบได้บนแพลตฟอร์มเว็บ [3]

3.2 แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ

ในการพัฒนาโมเดลสำหรับระบบเว็บ จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดด้านทรัพยากรของอุปกรณ์ผู้ใช้ เช่น หน่วยความจำ ความเร็วในการประมวลผล และแบนด์วิดท์เครือข่าย [7] แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ (3D Optimization) มีบทบาทสำคัญในการลดภาระการประมวลผลและเวลาโหลด โดยประกอบด้วยเทคนิคสำคัญ ได้แก่ (1) การลดจำนวน polygon (Mesh Decimation) (2) การปรับลดความละเอียดของ texture และ (3) การเลือกใช้รูปแบบไฟล์ที่เหมาะสม เช่น .glb หลักการสำคัญคือการรักษาสมดุลระหว่างคุณภาพของโมเดลและประสิทธิภาพการแสดงผล เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างเสถียรในสภาพแวดล้อมทรัพยากรจำกัด [7], [8]

3.3 แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้และการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม

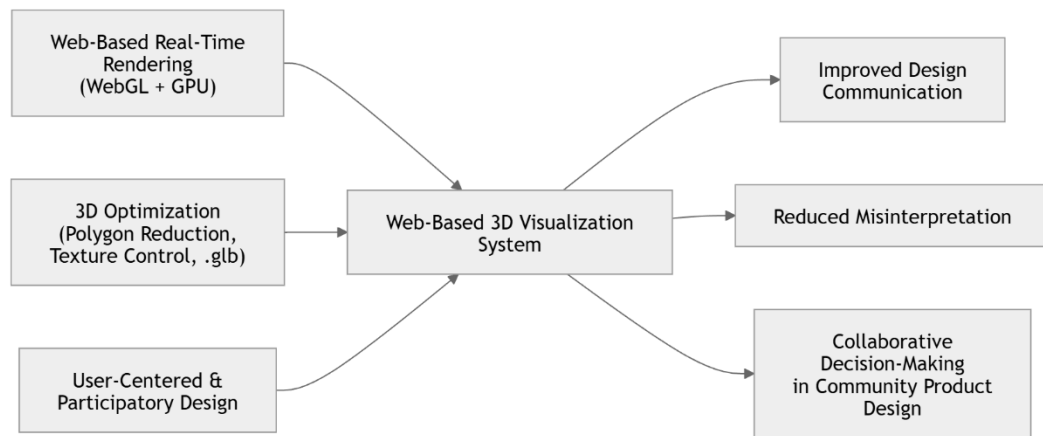
แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้ (User-Centered Design) มุ่งเน้นการพัฒนาาระบบโดยคำนึงถึงความต้องการและพฤติกรรมของผู้ใช้งานเป็นศูนย์กลาง [12] ขณะที่แนวคิดการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (Participatory Design) เน้นการเปิดโอกาสให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเข้ามามีบทบาทในการตัดสินใจและพัฒนาผลิตภัณฑ์ร่วมกัน [4], [14] ในบริบทของงานวิจัยนี้ แนวคิดทั้งสองถูกบูรณาการเข้ากับเทคโนโลยีการแสดงผลสามมิติบนเว็บ เพื่อสร้างสภาพแวดล้อมดิจิทัลที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถรับรู้รูปทรงและสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ได้อย่างถูกต้อง ลดข้อจำกัดของการนำเสนอแบบสองมิติ และสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจเชิงออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14]

3.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการบูรณาการแนวคิดดังกล่าว สามารถสรุปกรอบแนวคิดของงานวิจัยได้ว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์บนเว็บ ร่วมกับแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ และหลักการออกแบบเชิงผู้ใช้ จะนำไปสู่การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (1) เทคโนโลยีการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์บนเว็บ (Web-Based Real-Time Rendering) (2) แนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติ (3D Optimization) และ (3) แนวคิดการออกแบบเชิงผู้ใช้และการออกแบบเชิงมีส่วนร่วม (User-Centered & Participatory Design) ซึ่งทั้งสามองค์ประกอบทำงานร่วมกันเพื่อนำไปสู่การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารเชิงออกแบบ ลดความคลาดเคลื่อนจากการตีความรูปแบบผลิตภัณฑ์ และ

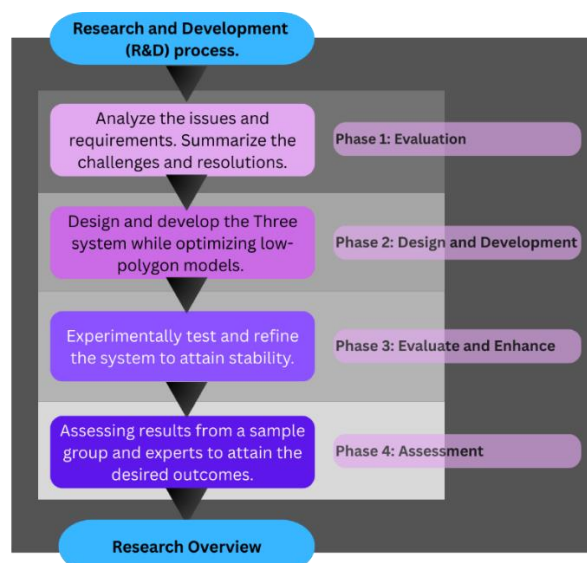
สนับสนุนการตัดสินใจร่วมกันในระดับชุมชน กรอบแนวคิดดังกล่าวถูกนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบและกำหนดตัวแปรในการประเมินผล ทั้งด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและการใช้งานจริงของผู้ใช้และผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ เพื่อสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน

4. การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ในลักษณะของการวิจัยและพัฒนา (Research and Development: R&D) โดยมุ่งเน้นการออกแบบ พัฒนา และประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติบนแพลตฟอร์มเว็บ โดยดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์ผลด้วยกระบวนการวิจัยเชิงทดลองพร้อมทั้งปรับแต่งประสิทธิภาพของระบบให้เหมาะสมต่อการใช้งานผ่านเว็บเบราว์เซอร์ในสภาพแวดล้อมจริง ในส่วนของการทดสอบประสิทธิภาพทางเทคนิค และการประเมินผลเชิงปริมาณ ในส่วนของการใช้งานจริงในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชน กระบวนการวิจัยประกอบด้วย การออกแบบสถาปัตยกรรมระบบ การพัฒนาโมเดล การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิต การทดสอบการทำงานข้ามแพลตฟอร์ม และการประเมินผลจากกลุ่มผู้ใช้งานและผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้กระบวนการสามารถทำซ้ำและตรวจสอบได้อย่างเป็นระบบ ดังรูปที่ 2

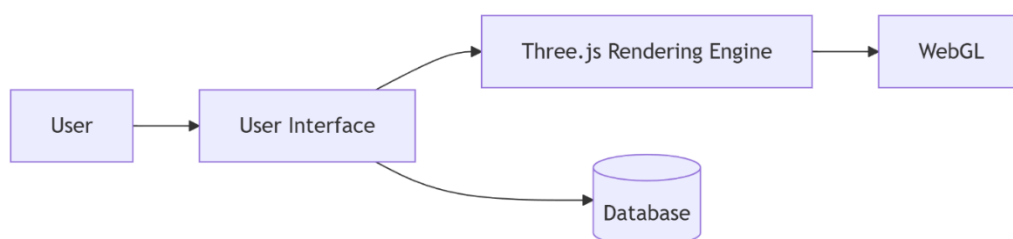


รูปที่ 2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแบบชุมชนมีส่วนร่วม

จากรูปที่ 2 เป็นกระบวนการดำเนินงานได้ประยุกต์ใช้กรอบวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) แบ่งเป็น 4 ระยะหลัก คือ (1) การวิเคราะห์ปัญหาและสรุปความต้องการพร้อมวิธีแก้ปัญหา (2) ออกแบบพัฒนาระบบและเพิ่มประสิทธิภาพโมเดล (3) ทดสอบเชิงทดลอง (Experimental Testing) และ (4) การประเมินผลโดยกลุ่มตัวอย่าง 51 คน และผู้เชี่ยวชาญ 5 คน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ตอบโจทย์ทั้งในมิติประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและการนำไปใช้สนับสนุนชุมชนจริง

4.1 สถาปัตยกรรมระบบ

ระบบถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันโดยใช้ไลบรารี Three.js สำหรับการแสดงผลกราฟิกสามมิติผ่าน WebGL การเรนเดอร์ดำเนินการแบบ Client-Side Rendering โดยใช้ GPU ของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน ระบบรองรับไฟล์โมเดล .glb และ .obj จำนวน 8 โมเดล และเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บเส้นทางไฟล์โมเดล โครงสร้างการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่ 3

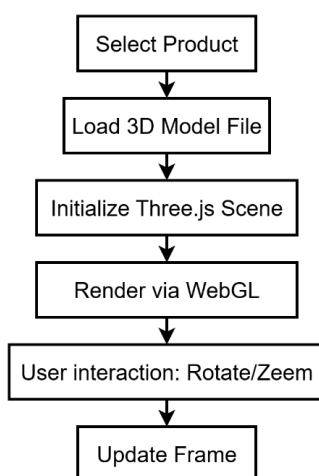


รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมระบบเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบหลักของระบบ ได้แก่ ส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI), โมดูลเรนเดอร์ 3D และส่วนจัดการข้อมูล

4.2 การออกแบบและพัฒนาโมเดลสามมิติ

โมเดลผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงขนาดจริงของผลิตภัณฑ์ เช่น ขวดยาตามขนาดประมาณ 5.5×3.5 เซนติเมตร เพื่อให้สัดส่วนของโมเดลมีความถูกต้องเชิงกายภาพ จากนั้นส่งออกไฟล์ในรูปแบบ .glb และ .obj เพื่อรองรับการแสดงผลผ่านเว็บ ลำดับการทำงานของระบบตั้งแต่การเลือกผลิตภัณฑ์จนถึงการแสดงผลโมเดล แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลำดับการทำงานของระบบแสดงผลโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 4 แสดงขั้นตอนตั้งแต่ผู้ใช้เลือกผลิตภัณฑ์ ระบบโหลดไฟล์โมเดล สร้างฉากใน Three.js และเปิดใช้งานการโต้ตอบแบบเรียลไทม์

4.3 การเพิ่มประสิทธิภาพการแสดงผล

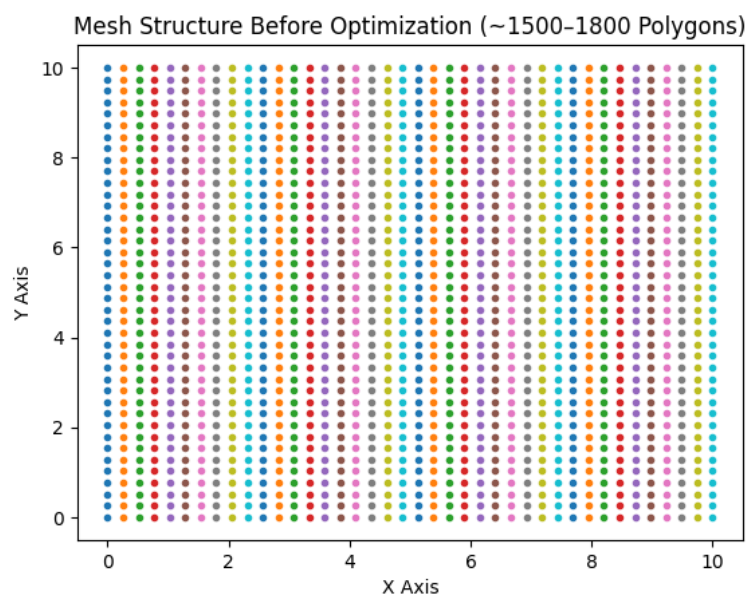
เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ได้ดำเนินการปรับแต่งโมเดลสามมิติทั้งในด้านโครงสร้างเรขาคณิตและขนาดไฟล์ โดยใช้เทคนิค Mesh Decimation เพื่อลดจำนวน polygon ประมาณ 30% จากช่วง 1500–1800 polygon เหลือประมาณ 1000–1200 polygon ต่อโมเดล พร้อมทั้งปรับลดความละเอียดของ texture ให้อยู่ที่ 1024×1024 พิกเซล และบีบอัดไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบ .glb เพื่อเหมาะสมกับการใช้งานบนเว็บ

ก่อนการปรับแต่ง ขนาดไฟล์โมเดลอยู่ในช่วง 120–150 MB ต่อโมเดล และหลังการปรับแต่งลดลงเหลือ 40–60 MB ส่งผลให้การถ่ายโอนข้อมูลผ่านเครือข่ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ผลการเปรียบเทียบค่าทางเทคนิคก่อนและหลังการปรับแต่งแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับแต่งโมเดล

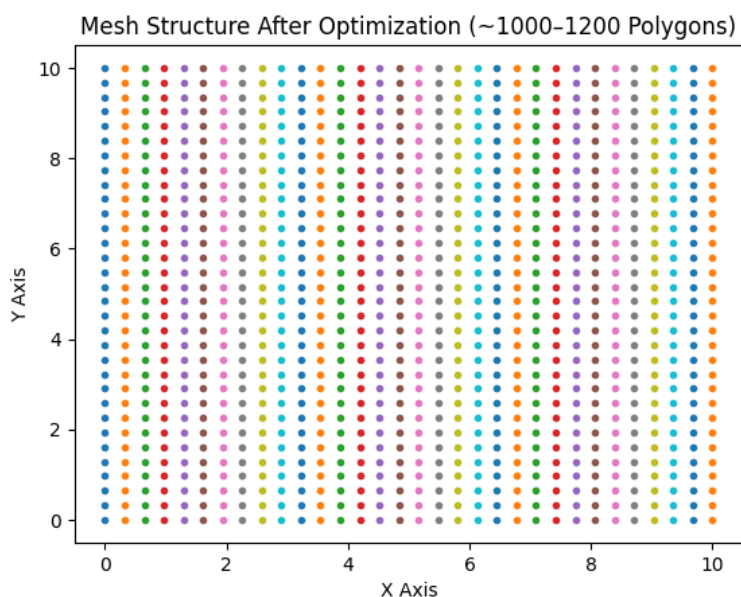
ตัวชี้วัด	ก่อนปรับแต่ง	หลังปรับแต่ง
จำนวน Polygon	1500–1800	1000–1200
ขนาดไฟล์ (.glb)	120–150 MB	40–60 MB
FPS (เฉลี่ย)	24–30	18–20
เวลาโหลด	8–10 วินาที	5–8 วินาที

จากตารางที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่า แม้ค่า FPS เฉลี่ยลดลงเล็กน้อยหลังการปรับแต่ง แต่ค่า FPS มีความคงที่มากขึ้นและไม่พบอาการกระตุก (Frame Drop) ระหว่างการหมุนหรือซูมโมเดล ขณะที่เวลาโหลดลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าปัจจัยด้านขนาดไฟล์และการถ่ายโอนข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานมากกว่าความซับซ้อนของเรขาคณิตเพียงอย่างเดียว เพื่อแสดงผลกระทบเชิงโครงสร้างของการลดจำนวน polygon จึงทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh ก่อนและหลังการปรับแต่ง ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6



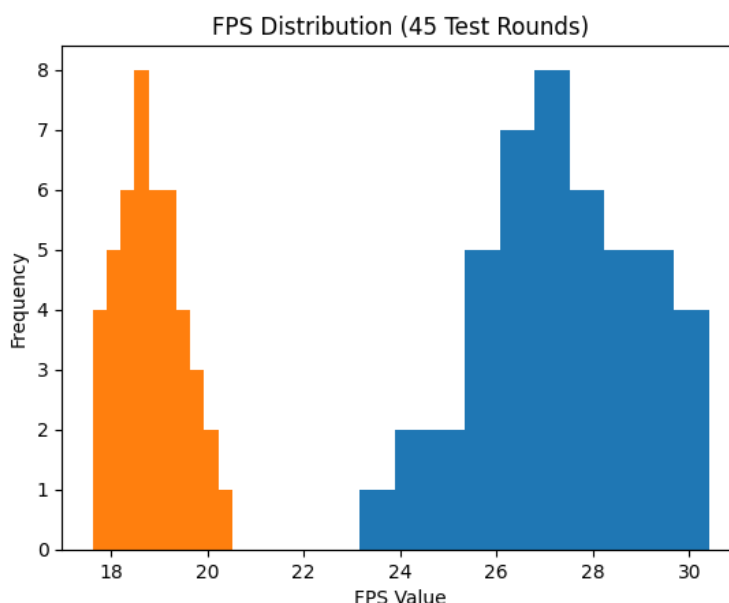
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh ก่อนการลด Polygon (~1500–1800 Polygons)

จากรูปที่ 5 แสดงความหนาแน่นขององค์ประกอบเชิงเรขาคณิตก่อนการปรับลด ซึ่งมีจำนวนจุดและพื้นผิวสูง ส่งผลต่อภาระการประมวลผลของ GPU



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบความหนาแน่นของ Mesh หลังการลด Polygon (~1000–1200 Polygons)

จากรูปที่ 6 แสดงโครงสร้างหลังการลด polygon ประมาณ 30% ทำให้ความหนาแน่นขององค์ประกอบลดลงและลดภาระการประมวลผล เพื่อประเมินเสถียรภาพของระบบ ได้ทำการวัดค่า FPS โดยใช้ Google Chrome DevTools และทดสอบซ้ำประมาณ 45 รอบต่อโมเดล ภายใต้เครือข่าย Wi-Fi ความเร็วเฉลี่ย 50 Mbps ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า FPS แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การกระจายตัวของค่า FPS จากการทดสอบประมาณ 45 รอบ

จากรูปที่ 7 แสดงการกระจายของค่า FPS ก่อนและหลังการปรับแต่ง พบว่าหลังการปรับแต่งค่าการกระจายตัวแคบลง สะท้อนถึงเสถียรภาพของระบบที่เพิ่มขึ้น แม้ค่าเฉลี่ย FPS ลดลงเล็กน้อย

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพระบบ

ระบบถูกทดสอบบนอุปกรณ์ 3 ประเภท ได้แก่ (1) เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows (Intel Core i5, RAM 8GB, Google Chrome) (2) โทรศัพท์มือถือระบบปฏิบัติการ Android (3) แท็บเล็ต การทดสอบดำเนินการภายใต้เครือข่าย Wi-Fi ความเร็วเฉลี่ย 50 Mbps โดยวัดค่า FPS และเวลาโหลดโมเดลจำนวน 8 แบบในแต่ละอุปกรณ์ ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถแสดงผลโมเดลได้ครบถ้วนทุกอุปกรณ์โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดด้านการเรนเดอร์หรือการแสดงผลพื้นผิว

ค่า FPS เฉลี่ยบนเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่ในช่วง 18–20 FPS ซึ่งแม้ต่ำกว่ามาตรฐาน 30 FPS สำหรับงานกราฟิกแบบเกม แต่ยังคงอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับงานด้าน Visualization และการนำเสนอผลิตภัณฑ์ ซึ่งไม่ต้องการการเคลื่อนไหวต่อเนื่องความเร็วสูง นอกจากนี้ ระบบสามารถรองรับการโต้ตอบ เช่น การหมุนและการซูมได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดอาการค้างของระบบ

ผลการทดสอบดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การปรับลด polygon และบีบอัดไฟล์มีผลโดยตรงต่อเสถียรภาพการทำงานและเวลาโหลด โดยเฉพาะในบริบทการใช้งานจริงระดับชุมชนที่ใช้อุปกรณ์ทั่วไป

4.5 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน คัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มแบบเฉพาะเจาะจง จากผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน และผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน คัดเลือกด้วยวิธี Expert Judgement Sampling ตามคุณสมบัติด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือเทคโนโลยีสามมิติ

4.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลประกอบด้วย

- (1) แบบสอบถามประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในรูปแบบมาตรฐานค่า 5 ระดับ
- (2) แบบประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ
- (3) แบบบันทึกค่าประสิทธิภาพเชิงเทคนิค

เครื่องมือผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (IOC) และวิเคราะห์ค่าความเชื่อมั่น (Cronbach's Alpha)

4.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเชิงเทคนิควิเคราะห์โดยการเปรียบเทียบค่าก่อนและหลังการปรับแต่ง ข้อมูลจากแบบสอบถามวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และใช้การทดสอบเชิงสถิติที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

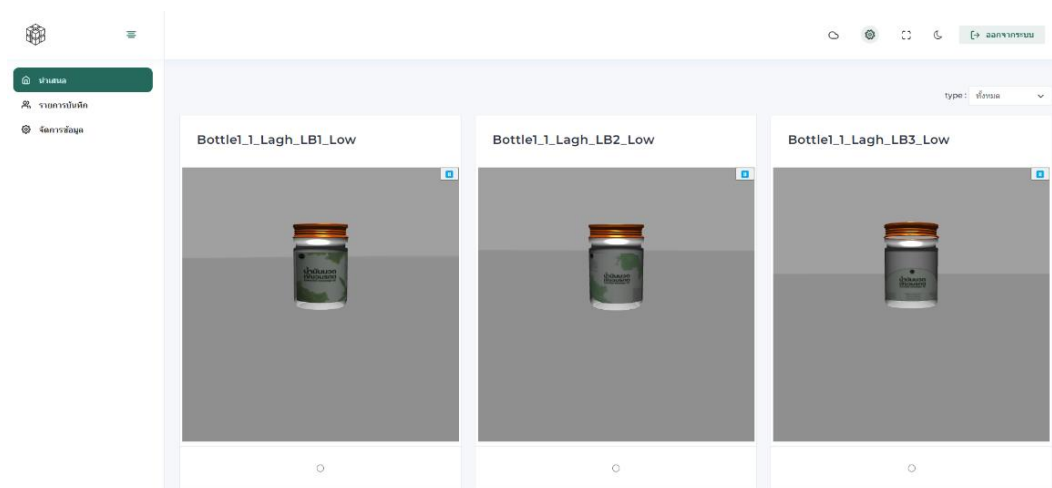
การเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างดำเนินการโดยไม่ระบุตัวตน ไม่มีการเก็บข้อมูลส่วนบุคคลหรือข้อมูลอ่อนไหว ผู้เข้าร่วมตอบแบบสอบถามโดยสมัครใจและสามารถยุติการตอบได้ทุกเมื่อ

5. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยนำเสนอผลลัพธ์จากการพัฒนาระบบและการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคของเว็บแอปพลิเคชัน โดยแบ่งออกเป็นผลการพัฒนาระบบและผลการแสดงผลโมเดล ดังนี้

5.1 ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

ผลการวิจัยพบว่าสามารถพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติด้วยไลบรารี Three.js บนแพลตฟอร์ม WebGL ได้สำเร็จ ระบบรองรับไฟล์ .glb และ .obj และสามารถแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์จำนวน 8 แบบในรูปแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรมเสริมเพิ่มเติม ผู้ใช้งานสามารถหมุน ซูม และปรับมุมมองของโมเดลได้แบบเรียลไทม์ แสดงดังรูปที่ 8

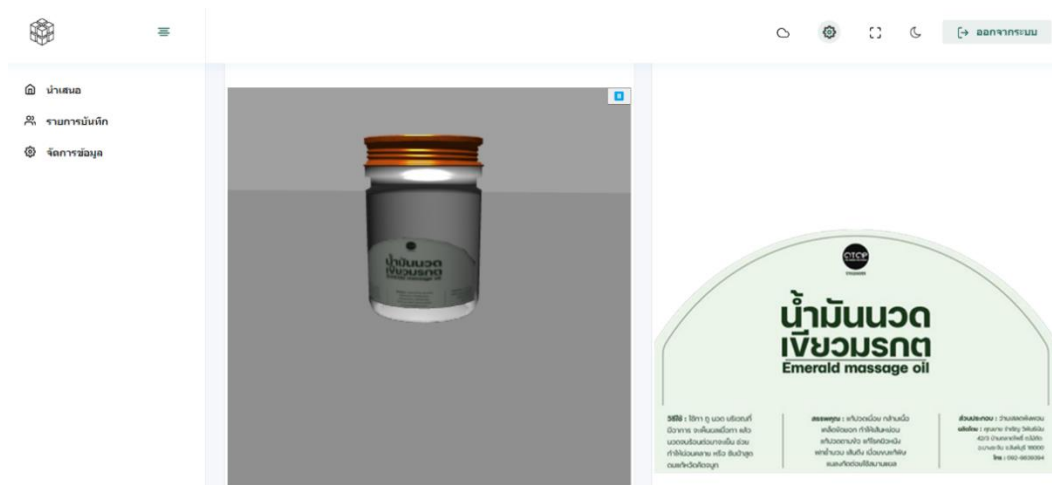


รูปที่ 8 หน้าจอรระบบเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติ

จากรูปที่ 8 แสดงหน้าจอรบบที่ผู้ใช้งานสามารถเลือกผลิตภัณฑ์และแสดงผลโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์

5.2 ผลการแสดงผลโมเดลสามมิติ

ระบบสามารถแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์ทั้ง 8 แบบได้ครบถ้วน โดยยังคงสัดส่วนตามขนาดจริงของผลิตภัณฑ์ เช่น ขวดยาตามขนาดประมาณ 5.5×3.5 เซนติเมตร ผู้ใช้งานสามารถหมุนและซูมโมเดลได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดข้อผิดพลาดด้านการแสดงผลพื้นผิวหรือโครงสร้างเรขาคณิต แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างการแสดงผลโมเดลผลิตภัณฑ์ในรูปแบบสามมิติ

จากรูปที่ 9 แสดงตัวอย่างโมเดลผลิตภัณฑ์ที่สามารถโต้ตอบได้แบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

5.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบ

จากการปรับลดจำนวน polygon ประมาณ 30% พบว่าเวลาโหลดโมเดลลดลงจากช่วง 8–10 วินาที เหลือ 5–8 วินาที ขณะที่ค่า FPS เฉลี่ยบนเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่ที่ 18–20 FPS และระบบมีความเสถียรในการโต้ตอบมากขึ้น ระบบสามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ และแท็บเล็ต โดยไม่พบข้อผิดพลาดใน

การเรนเดอร์หรือการแสดงผลพื้นผิว แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับการใช้งานจริงในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.4 ผลการประเมินจากผู้ใช้งาน

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในบริบทการใช้งานจริง ได้ดำเนินการทดลองใช้ระบบกับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 51 คน และประเมินผลด้วยแบบสอบถามมาตรฐานค่า 5 ระดับ โดยแบ่งการประเมินออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ (1) ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ (2) ความสะดวกในการใช้งาน และ (3) การสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจเชิงออกแบบ เกณฑ์การแปลผลค่าเฉลี่ยกำหนดตามช่วงคะแนนมาตรฐานค่า 5 ระดับ โดยค่าเฉลี่ย 4.51–5.00 หมายถึงระดับมากที่สุด 3.51–4.50 หมายถึงระดับมาก และลดหลั่นตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน (n = 51)

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ
ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์	4.73	0.57	มากที่สุด
ความสะดวกในการใช้งาน	4.84	0.37	มากที่สุด
การสนับสนุนการตัดสินใจเชิงออกแบบ	4.65	0.59	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.74	0.51	มากที่สุด

จากตารางที่ 2 พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.74, SD = 0.51) โดยด้านความสะดวกในการใช้งานมีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ และการสนับสนุนการตัดสินใจเชิงออกแบบ สะท้อนว่าระบบสามารถสนับสนุนการสื่อสารเชิงออกแบบ และช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทำความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.5 ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการประเมินคุณภาพระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ (n = 5)

ด้านการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับ
ความเหมาะสมของการออกแบบระบบ	4.40	0.55	มาก
ประสิทธิภาพการแสดงผล	4.60	0.55	มากที่สุด
ความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชน	4.80	0.45	มากที่สุด
รวมเฉลี่ย	4.60	0.51	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินคุณภาพระบบโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย = 4.60, SD = 0.51) โดยด้านความเหมาะสมต่อการใช้งานในชุมชนมีค่าเฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือประสิทธิภาพการแสดงผล ขณะที่ด้านความเหมาะสมของการออกแบบระบบอยู่ในระดับมาก ผลการประเมินดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชน

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี WebGL และไลบรารี Three.js สามารถพัฒนาระบบแสดงผลโมเดลสามมิติแบบโต้ตอบได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวคิดการเรนเดอร์แบบเรียลไทม์

บนเว็บที่เน้นการใช้ศักยภาพของหน่วยประมวลผลกราฟิก (GPU) ในการประมวลผลข้อมูลเชิงเรขาคณิตและพื้นผิว [1–3] ทั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติด้วยการลดจำนวน polygon และปรับความละเอียดของ texture มีส่วนช่วยลดเวลาโหลดและเพิ่มเสถียรภาพของอัตราเฟรม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดล (3D Optimization) และยืนยันว่าการปรับแต่งเชิงเทคนิคดังกล่าวมีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร ในเชิงวิพากษ์ การลดทอนรายละเอียดโมเดลคือการเลือกสมดุลระหว่างความสวยงามและสมรรถนะ ซึ่งผู้วิจัยวิเคราะห์ว่าในบริบทชุมชนความสนใจในการโต้ตอบ สำคัญกว่าความสมจริงขั้นสูงสุด เพื่อรักษาความต่อเนื่องในการสื่อสารบนอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

เมื่อพิจารณาผลการประเมินจากผู้ใช้งานจำนวน 51 คน และผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน พบว่าระบบได้รับการประเมินอยู่ในระดับมากถึงมากที่สุด โดยเฉพาะด้านความสะดวกในการใช้งาน ความเข้าใจรูปแบบผลิตภัณฑ์ และความเหมาะสมต่อการใช้งานในบริบทชุมชน ผลการประเมินดังกล่าวสะท้อนว่าระบบสามารถสนับสนุนการสื่อสารเชิงออกแบบ ลดความคลาดเคลื่อนจากการตีความรูปแบบผลิตภัณฑ์ และส่งเสริมการตัดสินใจร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด User-Centered Design และ Participatory Design ที่มุ่งเน้นการออกแบบโดยคำนึงถึงประสบการณ์และการมีส่วนร่วมของผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง ระบบนี้เปลี่ยนบทบาทคนในชุมชนจาก 'ผู้รับชม' มาเป็นผู้ร่วมตัดสินใจ (Active Co-designer) โดยการหมุนสำรวจมิติได้ด้วยตนเองช่วยลดกำแพงด้านการอ่านแบบและสร้างความรู้สึกเป็นเจ้าของ (Sense of Ownership) ในผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาร่วมกัน

เมื่ออภิปรายผลเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า พบว่างานด้าน Web-based 3D Visualization [1–10] ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการพัฒนาเชิงเทคนิคของระบบแสดงผล ขณะที่งานด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชน [12], [13], [14] มุ่งเน้นกระบวนการมีส่วนร่วมและการออกแบบผลิตภัณฑ์เป็นหลัก ซึ่งผลการวิจัยนี้ช่วยยืนยันว่าการรักษาสสมดุลของค่า FPS และเวลาโหลด เป็นปัจจัยวิกฤตที่สอดคล้องกับแนวคิดของ Gurvich และ Geller [10] ในการสร้างประสบการณ์ผู้ใช้บนเว็บ งานวิจัยนี้จึงมีคุณูปการในเชิงการบูรณาการทั้งสองแนวทางเข้าด้วยกัน โดยนำเทคโนโลยีการแสดงผลสามมิติบนเว็บมาปรับใช้ในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนอย่างเป็นระบบ

โดยเฉพาะในด้านการกำหนดแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพโมเดลสามมิติให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมทรัพยากรจำกัด การรักษาเสถียรภาพของอัตราเฟรม และการประเมินผลทั้งเชิงเทคนิคและเชิงการใช้งานอย่างเป็นระบบ ซึ่งช่วยยืนยันศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการสนับสนุนกระบวนการออกแบบเชิงมีส่วนร่วมในระดับชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงเป็นการสร้างเทคโนโลยีที่เหมาะสม (Appropriate Technology) ที่ยอมรับข้อจำกัดด้านเครือข่ายในพื้นที่ห่างไกล เพื่อลดความเหลื่อมล้ำทางดิจิทัลและสร้างมาตรฐานการสื่อสารที่เท่าเทียมระหว่างนักออกแบบและชุมชน

7. ข้อจำกัดของการวิจัย

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นจะสามารถแสดงผลโมเดลสามมิติผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา ประการแรก ประสิทธิภาพของระบบอาจได้รับผลกระทบจากความเร็วของเครือข่ายและสมรรถนะของอุปกรณ์ผู้ใช้ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้งานผ่านเครือข่ายไร้สายหรืออุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

ประการที่สอง การทดลองใช้งานดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างในบริบทชุมชนเฉพาะพื้นที่ ซึ่งอาจมีลักษณะทางสังคมและเทคโนโลยีแตกต่างจากบริบทอื่น จึงอาจจำกัดการสรุปผลทั่วไปไปยังบริบทที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางดิจิทัลแตกต่างกัน

ประการสุดท้าย การประเมินผลในงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์เชิงพรรณนาโดยใช้ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งสะท้อนแนวโน้มโดยรวมของความคิดเห็นผู้ใช้และผู้เชี่ยวชาญ แต่ยังไม่ได้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบหรือเชิงอนุมานทางสถิติในระดับลึก

8. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่าการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแสดงโมเดลสามมิติสามารถสนับสนุนกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาต่อยอดในอนาคต ควรศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการปรับระดับรายละเอียดของโมเดล (Level of Detail: LOD) หรือแนวทาง Adaptive Rendering เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแสดงผลในอุปกรณ์ที่มีสมรรถนะต่างระดับกัน

นอกจากนี้ ควรขยายการทดลองใช้งานไปยังบริบทชุมชนที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีโครงสร้างพื้นฐานด้านเทคโนโลยีแตกต่างกัน รวมทั้งพิจารณาการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงอนุมานทางสถิติเพื่อยืนยันความแตกต่างหรือความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในเชิงการพัฒนาเชิงระบบ อาจพิจารณาการบูรณาการเทคโนโลยีเพิ่มเติม เช่น ระบบแสดงความคิดเห็นแบบเรียลไทม์ การบันทึกประวัติการปรับแก้โมเดล หรือการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลผลิตภัณฑ์ชุมชน เพื่อสร้างแพลตฟอร์มสนับสนุนการออกแบบร่วมที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. N. Kocer Ozgun, "Web browsers as a 3D visualization environment," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 15, no. 3, pp. 251–259, Jul. 2022, doi: 10.17671/gazibtd.1072993.
- [2] A. Smelov, "Integration of interactive 3D models into React-based application," B.Eng. thesis, Automation Engineering, Seinäjoki University of Applied Sciences, Seinäjoki, Finland, 2024. [Online]. Available: <https://www.theseus.fi/handle/10024/850556>
- [3] M. La Guardia and M. Koeva, "Towards digital twinning on the web: Heterogeneous 3D data fusion based on open-source structure," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 3, Jan. 2023, Art. no. 721, doi: 10.3390/rs15030721.
- [4] อรรถพล ลำม่วง, "การพัฒนากรอบแนวคิดการออกแบบตราสัญลักษณ์ชุมชนเชิงมีส่วนร่วม," *วารสารสาระศาสตร์*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 4, หน้า 1016–1027, พ.ย.–ธ.ค., 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so05.tcithaijo.org/index.php/sarasatr/article/view/283765>
- [5] ประภาพร ยางประยงค์, "การออกแบบฉลากและบรรจุภัณฑ์สำหรับวิสาหกิจชุมชน: กรณีศึกษาผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางสมุนไพร ตำบลเขารูปช้าง อำเภอมะนัง จังหวัดสงขลา," ใน *รายงานการประชุมวิชาการการพัฒนาชุมชน ท้องถิ่นและสังคมระดับชาติ (CSD สัมพันธ์) ครั้งที่ 21*, มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์, 1–4 ก.พ. 2566, หน้า 53–63. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ird.skru.ac.th/RMS/file/40015.pdf>
- [6] กษมา สุรเดชา, อนุ ธัชยะพงษ์ และ กันยา มั่นคง, "การออกแบบตราสินค้าและพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อยกระดับผลิตภัณฑ์กล้วยอบเนย ของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนหมู่สุวรรณคัมพูไทยศรีโยธิน," *วารสารพิภูล*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 219–237, ม.ค.–มิ.ย. 2563. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://research.kpru.ac.th/research2/pages/filere/1600498880.pdf>

- [7] E. Ülker, A. Turanboy, İ. Uysal, and G. R. Arık, "Development of a web-based 3D visualization tool that can be used in geoscience studies," *Revista Minelor - Mining Review*, vol. 31, no. 2, pp. 44–55, Jun. 2025, doi: 10.2478/minrv-2025-0017.
- [8] M. de J. Gutierrez-Sanchez, J.-C. Gonzalez-Islas, A. Franco-Arcega, A. Suarez-Navarrete, J. G. Robles-Guzman, and G. A. Torres-Samperio, "Web-based interactive 3D modeling and visualization of the human brain towards anatomy education," *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, vol. 45, no. 3, pp. 80–98, Nov. 2024, doi: 10.17488/RMIB.45.3.5.
- [9] J. Wang, Z. Xu, and Y. Li, "A WebGL-based interactive visualization framework for large-scale urban seismic simulations with a dual multi-LOD strategy," *Buildings*, vol. 15, no. 16, Aug. 2025, Art. no. 2916, doi: 10.3390/buildings15162916.
- [10] A. B. Gurvich and A. M. Geller, "Firefly: A browser-based interactive 3D data visualization tool for millions of data points," *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 265, no. 2, Mar. 2023, Art. no. 38, doi: 10.3847/1538-4365/acb59f.
- [11] L. M. Anghelută, A. I. Popovici, and L. C. Ratoiu, "A web-based platform for 3D visualization of multimodal imaging data in cultural heritage asset documentation," *Heritage*, vol. 6, no. 12, pp. 7381–7399, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/heritage6120387>
- [12] ณัฐอร มหาทำนุโชค และ โสภาพร กล่ำสกุล, "การออกแบบบรรจุภัณฑ์และพัฒนาผลิตภัณฑ์ชุมชนจากผ้าทอมือพื้นเมืองบ้านท่าไต้ อำเภอยาง่าง จังหวัดเพชรบุรี," *วารสาร มจร การพัฒนาสังคม*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 3, หน้า 169–178, ก.ย.-ธ.ค. 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/JMSD/article/view/272337>
- [13] ชลิตา ชาญวิจิตร และ โพธิวัฒน์ งามขจรวิวัฒน์, "ปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ," *วารสารข่าวงานวิศวกรรมอุตสาหกรรมไทย*, ปีที่ 10, ฉบับที่ 1, หน้า 60–66, ม.ค.-มี.ย. 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/ienj/article/view/249982/170845>
- [14] J. R. Onyimbi, M. Koeva, and J. Flacke, "Public participation using 3D web-based city models: Opportunities for e-participation in Kisumu, Kenya," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, no. 12, Nov. 2018, Art. no. 454, doi: 10.3390/ijgi7120454.

การประเมินความเสี่ยงเชิงปริมาณของการพยากรณ์รังสีอาทิตย์รายชั่วโมงด้วยวิธีมอนติคาร์โล:
กรณีศึกษาเปรียบเทียบเสถียรภาพแบบจำลอง CPR ในประเทศไทย

Quantitative Risk Assessment of Hourly Solar Radiation Forecasting using
Monte Carlo Method: A Comparative Stability Study of CPR Model in Thailand

พิสิษฐ์ สุวรรณแพทย^{1*}

¹คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี

Phisit Suvarnaphaet^{1*}

¹Faculty of Animal Sciences and Agricultural Technology, Silpakorn University, Phetchaburi IT Campus

Corresponding Author Email : suvarnaphaet_p@su.ac.th

Received 18 November 2025

Revised 19 December 2025

Accepted 29 January 2026

บทคัดย่อ

การบริหารจัดการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลรังสีรวมรายชั่วโมงที่แม่นยำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณและสร้างช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ของการพยากรณ์รังสีอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง Collares-Pereira and Rabl (CPR) โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จำนวน 10,000 รอบ ภายใต้ข้อสมมติฐานการแจกแจงความคลาดเคลื่อนแบบปกติ (Normal Distribution Assumption) โดยใช้ข้อมูลค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root Mean Square Difference: RMSD) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference: MBD) จากสถานีตรวจวัดมาตรฐานในจังหวัดเชียงใหม่และอุบลราชธานี ซึ่งเป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีความผันผวนต่ำและสูงตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า แม้ค่าเฉลี่ยการพยากรณ์ของทั้งสองสถานีจะใกล้เคียงกัน แต่สถานีอุบลราชธานีมีความกว้างของช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% กว้างกว่าสถานีเชียงใหม่ถึงร้อยละ 49.8 และมีโอกาสที่ความคลาดเคลื่อนจะสูงเกินกว่าร้อยละ 10 มากกว่าถึง 3 เท่า ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการออกแบบระบบในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจำเป็นต้องกำหนดค่าเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin) ที่สูงกว่าพื้นที่ภาคเหนือ เพื่อรองรับความผันผวนของความไม่แน่นอนที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับสมมติฐานการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน ซึ่งควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติมในงานวิจัยอนาคต

คำสำคัญ: มอนติคาร์โลซิมูเลชัน, รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง, แบบจำลอง CPR, การวิเคราะห์ความเสี่ยง

Abstract

Efficient management of solar energy systems requires accurate hourly global solar radiation data. This study aimed to analyze quantitative risk and establish confidence intervals for solar radiation forecasting using the Collares-Pereira and Rabl (CPR) model. The study applied Monte Carlo Simulation with 10,000 iterations, based on the Normal Distribution Assumption, utilizing Root Mean Square Difference (RMSD) and Mean Bias Difference (MBD) statistics from standard measurement stations in Chiang Mai and Ubon Ratchathani. The results indicated that while the mean forecast values for both stations were similar, the 95% confidence interval width for Ubon Ratchathani was 49.8% wider than that of Chiang Mai. Furthermore, the probability of error exceeding 10% in Ubon Ratchathani was three times higher. These findings suggested that solar system design in the Northeastern region required a higher safety margin compared to the Northern region to accommodate significantly higher uncertainty fluctuations. However, these results relied on the error distribution assumption, which should be further investigated in future research.

Keywords: Monte Carlo Simulation, Hourly Solar Radiation, CPR Model, Risk Analysis

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีความสำคัญยิ่งในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากการปล่อยมลพิษ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่มีความถูกต้องและแม่นยำ [2] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง "รังสีรวมรายชั่วโมง" (Hourly Global Solar Radiation) ซึ่งเป็นข้อมูลนำเข้าที่สำคัญสำหรับการจำลองประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ (PV System Simulation) และการออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน แม้ว่าข้อมูลรังสีอาทิตย์จะมีความสำคัญ แต่การตรวจวัดข้อมูลจริงจากสถานีภาคพื้นดินให้ครอบคลุมทุกพื้นที่เป็นเรื่องยากและมีต้นทุนสูง ทั้งในด้านเครื่องมือและการบำรุงรักษา [3] สถานีตรวจวัดส่วนใหญ่ในประเทศไทยและทั่วโลกมักมีการเก็บข้อมูลเพียง "รังสีรวมรายวัน" (Daily Global Solar Radiation) เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบพลังงานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในรอบวัน [4, 5]

เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนข้อมูลรายชั่วโมง นักวิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงจากข้อมูลรายวัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (Solar Geometry) [6], [7] แบบจำลองที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล ได้แก่ แบบจำลองของ Liu and Jordan [8] และแบบจำลองของ Collares-Pereira and Rabl (CPR) [9] สำหรับการศึกษาในประเทศไทย Runghathaitum และคณะ [10] ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง CPR และแบบจำลองผสม (CPR-JL) โดยใช้ข้อมูลระยะยาว 30 ปี (พ.ศ. 2538-2567) จาก 4 ภูมิภาคหลัก ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง CPR มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับสภาพภูมิอากาศของไทย โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด ซึ่งวัดจากค่ารากที่สองของความแตกต่างยกกำลังสอง (Root Mean Square Difference: RMSD) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference: MBD)

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้านี้จะระบุค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ (RMSD และ MBD) ไว้อย่างชัดเจน แต่ค่าเฉลี่ยเหล่านี้เป็นเพียงการสรุปผลในภาพรวม (Summary Statistics) ซึ่งไม่สามารถอธิบายการแจกแจงความน่าจะเป็นของความไม่แน่นอน (Uncertainty Distribution) ได้อย่างครบถ้วน การทราบเพียงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอาจไม่เพียงพอสำหรับวิศวกรที่ต้องการประเมิน "ความเสี่ยงเชิงปริมาณ" (Quantitative Risk) ซึ่งในบริบทของงานวิจัยนี้หมายถึง โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่ค่าพยากรณ์จะมีความคลาดเคลื่อนเกินกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม นอกจากนี้ การพยากรณ์รังสีอาทิตย์มีความไม่แน่นอนเชิงสุ่ม (Stochastic nature) ที่ไม่เป็นเชิงเส้น การใช้วิธีคำนวณแบบกำหนดค่าแน่นอน (Deterministic) ทัวไปจึงไม่เพียงพอ เทคนิคการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมอย่างยิ่ง เนื่องจากสามารถจำลองสถานการณ์ความคลาดเคลื่อนที่หลากหลายผ่านการสุ่มตัวอย่างซ้ำจำนวนมาก ทำให้เห็นภาพการกระจายตัวของความเสี่ยงได้ชัดเจนกว่า

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองมอนติคาร์โลเพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงและสร้างช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ของการพยากรณ์รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง โดยทำการเปรียบเทียบเสถียรภาพของแบบจำลองระหว่างพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดอุบลราชธานี สาเหตุที่คัดเลือก 2 พื้นที่นี้ เนื่องจากเป็นตัวแทนของกรณีศึกษาที่มีลักษณะความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเชียงใหม่เป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low RMSD) หรือกรณีที่ดีที่สุด (Best-case) ในขณะที่อุบลราชธานีเป็นตัวแทนพื้นที่ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง (High RMSD) หรือกรณีที่แย่ที่สุด (Worst-case) ซึ่งจะช่วยให้เห็นขอบเขตความเสี่ยงสูงสุดและต่ำสุดของการใช้งานแบบจำลองในประเทศไทยได้อย่างชัดเจน

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ศึกษาและวิเคราะห์ความเสี่ยงของแบบจำลอง CPR โดยอ้างอิงค่าสัมประสิทธิ์และความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยมาตรฐานของ Runghathaithum และคณะ [10]

2.2 เปรียบเทียบความเสี่ยงระหว่าง 2 สถานที่ที่มีลักษณะความคลาดเคลื่อนแตกต่างกัน ได้แก่ สถานที่เชียงใหม่ (RMSD ต่ำ) และสถานีอุบลราชธานี (RMSD สูง)

2.3 ใช้เทคนิคการจำลองมอนติคาร์โล จำนวน 10,000 รอบ (Iterations) บนสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎีรังสีอาทิตย์และแบบจำลอง CPR

การประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I) จากข้อมูลรังสีรวมรายวัน (H) จำเป็นต้องคำนึงถึงตำแหน่งของดวงอาทิตย์และความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ งานวิจัยนี้อ้างอิงทฤษฎีของ Collares-Pereira and Rabl (CPR) [9] ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับสภาพอากาศในเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย โดยแบบจำลอง CPR แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนรังสีรายชั่วโมงและรายวัน ดังสมการที่ (1):

$$\frac{I}{H} = \frac{I_0}{H_0} (a + b \cos \omega) \quad (1)$$

เมื่อ I_0 และ H_0 คือรังสีนอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงและรายวันตามลำดับ ส่วน ω คือมุมเวลา (Hour Angle) ซึ่งบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาของวัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ a และ b เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับมุมเวลาดวงอาทิตย์ตก (ω_{SS}) ดังสมการที่ (2) และ (3):

$$a = a' \sin (\omega_{ss} - \omega_{ss,min}) + a'' \quad (2)$$

$$b = b' \sin (\omega_{ss} - \omega_{ss,min}) + b'' \quad (3)$$

จากการศึกษาของ Runghathaithum และคณะ [10] ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลระยะยาว 30 ปี เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์จำเพาะ (a' , a'' , b' , b'') ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้มาใช้เป็นฐานในการคำนวณแบบจำลองมอนติคาร์โล

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง CPR สำหรับสถานที่ศึกษา

สถานี	a'	a''	b'	b''
เชียงใหม่	-0.722	0.732	0.767	0.386
อุบลราชธานี	-1.407	0.721	1.284	0.405

3.2 ตัวชี้วัดความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (Statistical Error Metrics)

ในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง งานวิจัยต้นฉบับได้ใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ 2 ค่าหลัก ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำมาใช้เป็น พารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) สำหรับการจำลองความเสี่ยง ได้แก่:

1. ค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference: MBD): ใช้ระบุความแม่นยำเชิงระบบว่าแบบจำลองมีการประเมินค่าสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงโดยเฉลี่ยเท่าใด

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{model,i} - I_{meas,i}) \times 100\%}{\sum_{i=1}^N I_{meas,i}} \quad (4)$$

2. ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root Mean Square Difference: RMSD): ใช้ระบุการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อน หรือระดับความไม่แน่นอนของแบบจำลอง

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{model,i} - I_{meas,i})^2}{N}} \times \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^N I_{meas,i}}{N}} \times 100\% \quad (5)$$

โดยที่ $I_{model,i}$ คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง (Calculated Value) ณ ช่วงเวลาที่ i

และ $I_{meas,i}$ คือ ค่าจากการตรวจวัดจริง (Measured Value) ณ ช่วงเวลาที่ i

3.3 ระเบียบวิธีวิจัย: การจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo Methodology)

งานวิจัยนี้เสนอกระบวนการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk Analysis) โดยประยุกต์ใช้วิธีมอนติคาร์โล [11] ในการเปลี่ยนค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ (Statistical Error) ให้เป็นการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Distribution) ซึ่งจัดเป็นแบบจำลองที่ขับเคลื่อนด้วยการกระจายตัว (Distribution-Driven Model) ตามขั้นตอนดังนี้:

1. การกำหนดแบบจำลองสโตนัสติก (Stochastic Model Formulation): กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของรังสีรายชั่วโมง (ϵ) เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ MBD และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ RMSD การเลือกใช้การแจกแจงแบบปกติเป็นข้อสมมติฐานเบื้องต้นเพื่อให้สามารถ

ประเมินความเสี่ยงได้ภายใต้ข้อมูลสรุปทางสถิติที่มีอยู่ แม้ว่าในความเป็นจริงความคลาดเคลื่อนอาจมีความเบ้ (Skewness) หรือหางหนา (Heavy-tail) ก็ตาม

$$\epsilon \sim N(\mu_{MBD}, \sigma_{RMSD}) \quad (6)$$

2. การสร้างข้อมูลจำลอง (Data Generation): ทำการสุ่มค่าความคลาดเคลื่อน (ϵ_i) จำนวน N ครั้ง ($N=10,000$) สำหรับแต่ละสถานี และคำนวณค่ารังสีรายชั่วโมงจำลอง ($I_{sim,i}$) จากสมการ:

$$I_{sim,i} = I_{base} \times (1 + \frac{\epsilon_i}{100}) \quad (7)$$

โดยที่ i คือลำดับของการจำลอง (Iteration Index) ตั้งแต่ 1 ถึง 10,000 ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมการที่ (1) ในแง่ของการนำความคลาดเคลื่อนสุ่มไปปรับแก้ค่าพยากรณ์

3. การวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis): นำชุดข้อมูลผลลัพธ์ 10,000 ค่า มาคำนวณค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (s) เพื่อสร้างช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% (95% Confidence Interval) ดังสมการ:

$$CI_{95\%} = \bar{x} \pm 1.96(s) \quad (8)$$

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 รวบรวมค่าพารามิเตอร์ความคลาดเคลื่อน (RMSD และ MBD) ของแบบจำลอง CPR จากงานวิจัยอ้างอิง [10] ดังแสดงในตารางที่ 2

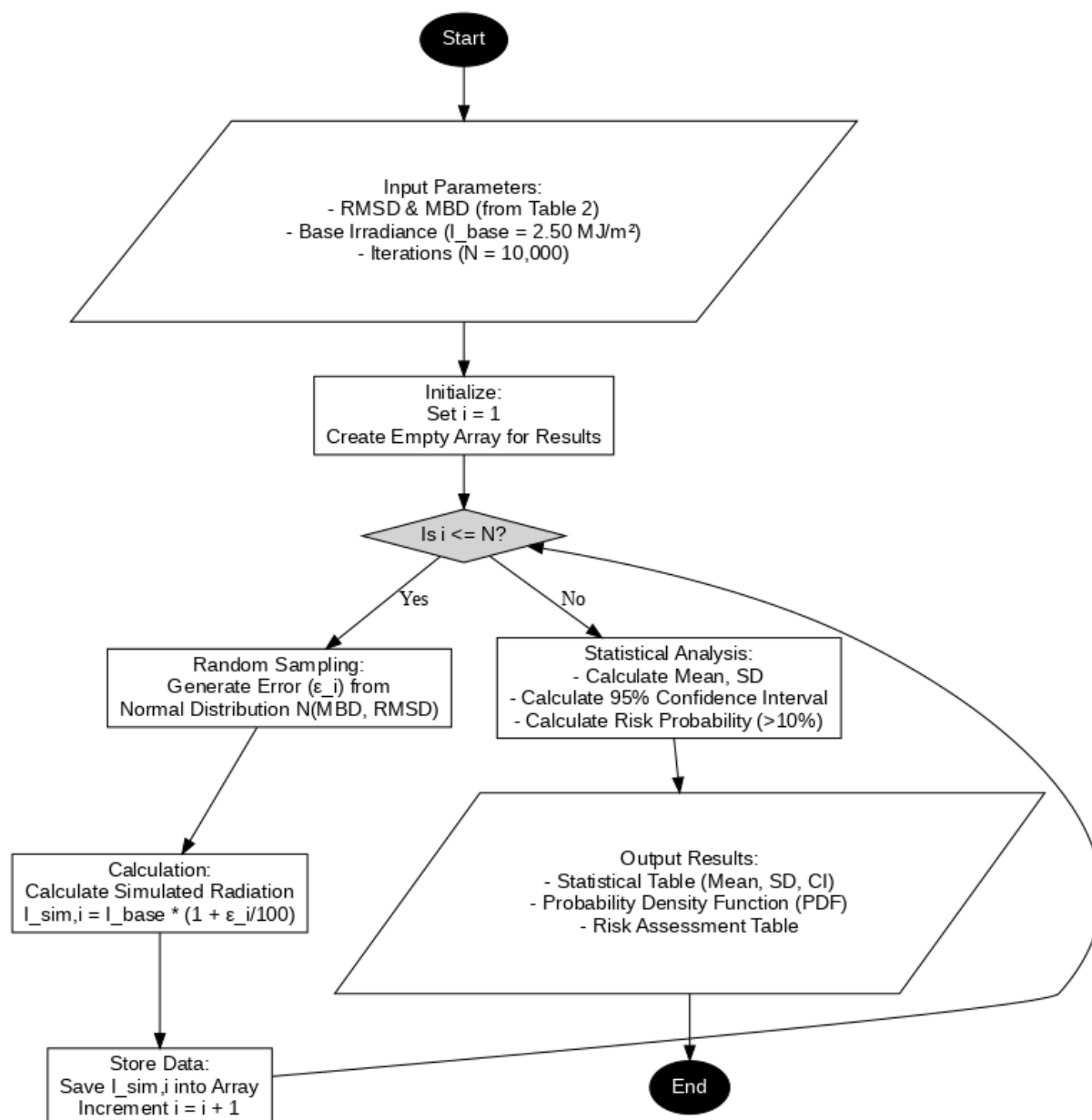
ตารางที่ 2 พารามิเตอร์นำเข้า (Input Parameters) สำหรับการจำลองมอนติคาร์โล [10]

สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
เชียงใหม่ (ภาคเหนือ)	5.51	0.03
อุบลราชธานี (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)	8.10	-0.01

4.2 กำหนดค่ารังสีพยากรณ์พื้นฐาน (I_{base}) ที่ 2.50 MJ/m^2 เพื่อใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบ โดยค่านี้ถูกเลือกโดยอ้างอิงจากค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายชั่วโมงในเวลาที่มียุทธภาพ (Effective Sun Hours) ของประเทศไทย ซึ่งเป็นตัวแทนของค่ากลางในการออกแบบระบบ

4.3 สร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ด้วยภาษา Python เพื่อทำการสุ่มค่าความคลาดเคลื่อนและคำนวณค่ารังสีจำลอง ขั้นตอนการทำงานแสดงผังภาพกระบวนการ (Flowchart) ในรูปที่ 1

4.4 ทำการจำลองซ้ำจำนวน 10,000 ครั้ง ต่อสถานี ซึ่งเป็นจำนวนรอบที่เพียงพอต่อการลู่เข้าของค่าสถิติ (Convergence) และวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาช่วงความเชื่อมั่นที่ 95%



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการจำลองมอนติคาร์โล

5. ผลการวิจัย

จากการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) จำนวน 10,000 รอบการคำนวณ (Iterations) โดยใช้ข้อมูลความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติของแบบจำลอง CPR จากงานวิจัยของ Runghathaithum และคณะ [10] ได้ผลลัพธ์การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเชิงปริมาณ (Quantitative Uncertainty Analysis) ดังนี้

5.1 การวิเคราะห์ช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval Analysis)

เมื่อกำหนดค่ารังสีพยากรณ์พื้นฐาน (I_{model}) ไว้ที่ 2.50 MJ/m^2 ผลการจำลองแสดงให้เห็นการกระจายตัวของค่ารังสีที่อาจเกิดขึ้นจริง (I_{sim}) ดังแสดงค่าสถิติในตารางที่ 3

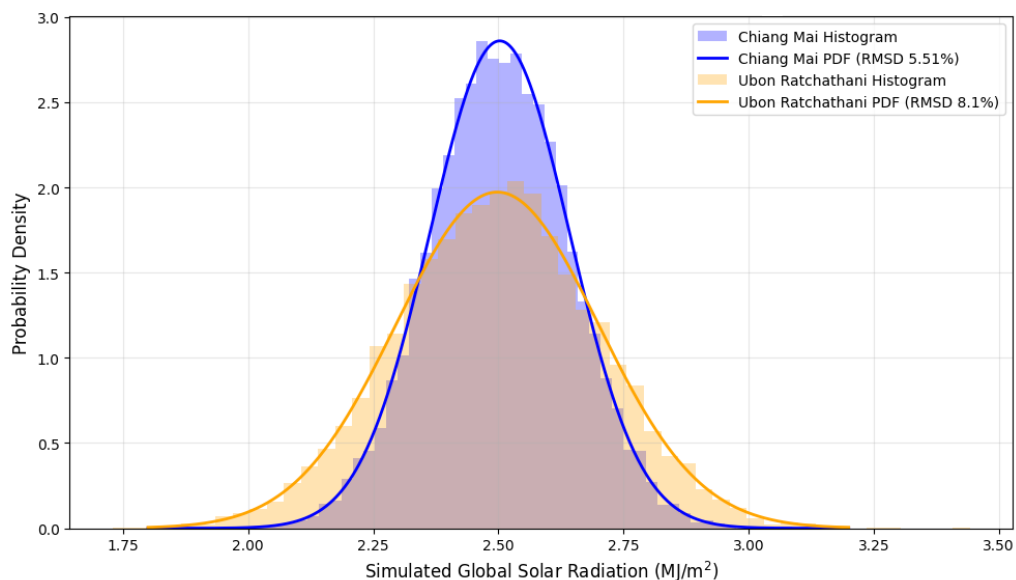
ตารางที่ 3 สรุปค่าสถิติและช่วงความเชื่อมั่นจากการจำลองมอนติคาร์โล (ที่ค่าฐาน 2.50 MJ/m²)

ตัวชี้วัดทางสถิติ (Statistics)	สถานีเชียงใหม่ (ภาคเหนือ)	สถานีอุบลราชธานี (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)
ค่าเฉลี่ยจากการจำลอง (Simulated Mean)	2.501 MJ/m ²	2.499 MJ/m ²
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)	0.138 MJ/m ²	0.203 MJ/m ²
ขอบล่างช่วงความเชื่อมั่น 95% (Lower 95% CI)	2.230 MJ/m ²	2.094 MJ/m ²
ขอบบนช่วงความเชื่อมั่น 95% (Upper 95% CI)	2.772 MJ/m ²	2.906 MJ/m ²
ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่น (Range)	0.542 MJ/m ²	0.812 MJ/m ²

จากตารางที่ 3 พบว่า แม้ค่าเฉลี่ยจากการจำลองของทั้งสองสถานีจะมีความใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับค่าพยากรณ์พื้นฐาน (เนื่องจากค่า MBD ต่ำทั้งคู่) แต่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของสถานีอุบลราชธานี (0.203 MJ/m²) สูงกว่าสถานีเชียงใหม่ (0.138 MJ/m²) อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ ความกว้างของช่วงความเชื่อมั่น 95% ของสถานีอุบลราชธานีกว้างกว่าสถานีเชียงใหม่ถึงร้อยละ 49.8 (0.812 เทียบกับ 0.542 MJ/m²) ข้อมูลนี้บ่งชี้ว่าการใช้แบบจำลอง CPR ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความไม่แน่นอนของผลลัพธ์ (Dispersion of Outcomes) สูงกว่าภาคเหนือ

5.2 การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นและความเสี่ยง (Probability and Risk Analysis)

เพื่อให้เห็นภาพความเสี่ยงชัดเจนยิ่งขึ้น งานวิจัยได้สร้างกราฟการแจกแจงความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) เปรียบเทียบระหว่างสองสถานี ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบการแจกแจงความน่าจะเป็นของค่ารังสีรายชั่วโมงจำลองระหว่างเชียงใหม่ (เส้นสีน้ำเงิน) และอุบลราชธานี (เส้นสีส้ม)

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่ากราฟของสถานีเชียงใหม่มีลักษณะโด่งและฐานแคบ (Leptokurtic-like) ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำที่สูงกว่า ในขณะที่กราฟของสถานีอุบลราชธานีมีลักษณะแบนราบและฐานกว้าง (Platykurtic-like) แสดงถึงโอกาสที่ค่าจริงจะเบี่ยงเบนไปจากค่ากลางมีสูงกว่า

เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ "โอกาสความเสี่ยง" (Risk Probability) ที่ค่าความคลาดเคลื่อนจริงจะเกินเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม (Threshold) ที่ร้อยละ ± 10 ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การประเมินความเสี่ยงของการเกิดความคลาดเคลื่อนสูง (Extreme Error Risk)			
ระดับความคลาดเคลื่อน (Error Threshold)	โอกาสเกิดความเสี่ยง: เชียงใหม่	โอกาสเกิดความเสี่ยง: อุบลราชธานี	อัตราส่วนความเสี่ยง (Risk Ratio)
เกิน $\pm 5\%$	36.4%	53.8%	1.48 เท่า
เกิน $\pm 10\%$	6.9%	21.7%	3.14 เท่า
เกิน $\pm 15\%$	0.6%	6.4%	10.6 เท่า

5.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย (Discussion)

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นประเด็นสำคัญทางวิศวกรรมและสถิติ 3 ประการ ดังนี้:

5.3.1 ผลกระทบของภูมิศาสตร์ต่อเสถียรภาพแบบจำลอง: แม้ว่าการวิจัยของ Runghathaithum และคณะ [10] จะสรุปว่าแบบจำลอง CPR เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทย แต่ผลการจำลองนี้ขยายความเข้าใจว่า "ความเหมาะสม" นั้นมีระดับความเชื่อมั่นที่แตกต่างกัน การที่อุบลราชธานีมีค่า RMSD สูงถึง 8.10% และมีความเสี่ยงที่ความคลาดเคลื่อนจะเกิน 10% สูงถึงร้อยละ 21.7 อาจเกิดจากลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาของภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีความแปรปรวนของเมฆและฝนฟ้าคะนองในช่วงฤดูฝนมากกว่าภาคเหนือตอนบน ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อิงเพียงเรขาคณิตดวงอาทิตย์จับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงได้ยากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรายงานลักษณะอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ระบุถึงความถี่ของพายุฤดูร้อนในพื้นที่ดังกล่าว [12]

5.3.2 นัยสำคัญต่อการออกแบบระบบ (Implication for System Design): ตัวเลขความเสี่ยงที่ค้นพบมีความสำคัญต่อการกำหนด "ค่าเผื่อความปลอดภัย" (Safety Factor) หากวิศวกรออกแบบระบบโดยใช้ค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียว ระบบที่ติดตั้งในอุบลราชธานีจะมีโอกาสผลิตไฟฟ้าได้ต่ำกว่าเป้าหมาย (Underperformance) บ่อยครั้งกว่าเชียงใหม่ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับแนวทางของ Lauret และคณะ [13] ที่เสนอว่าการออกแบบระบบในพื้นที่ที่มีดัชนีความแจ่มแจ้งท้องฟ้า (Clearness Index) แปรปรวนสูง ควรใช้เกณฑ์ความน่าจะเป็น (Probabilistic Approach) แทนการใช้ค่าเฉลี่ยรายเดือนเพียงอย่างเดียว เพื่อลดความเสี่ยงในการลงทุนระยะยาว

5.3.3 ข้อจำกัดของแบบจำลองที่ขับเคลื่อนด้วยการกระจายตัว (Distribution-Driven Model Limitations): การจำลองในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในลักษณะของ Distribution-Driven Simulation Model โดยการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนถูกกำหนดจากสมมติฐานทางสถิติ (Normal Distribution) โดยอาศัยเพียงสถิติสรุป (Summary Statistics) ได้แก่ MBD และ RMSD ไม่ได้ใช้ข้อมูล Error รายชั่วโมงจริงในการเรียนรู้การกระจายตัว (Data-Driven) ดังนั้นผลลัพธ์ของ Monte Carlo จะขึ้นกับรูปแบบการแจกแจงที่สมมติเป็นหลัก หากลักษณะความคลาดเคลื่อนจริงมีรูปแบบหางหนา (Heavy-tail) ความเสี่ยงบริเวณหาง (Tail Risk) ที่คำนวณได้อาจต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องตระหนักในการนำไปใช้งาน

6. สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation) เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณของแบบจำลองรังสีอาทิตย์ CPR ข้อค้นพบที่สำคัญชี้ให้เห็นว่า เสถียรภาพของแบบจำลองมีความแปรผันตามภูมิภาคอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าแบบจำลอง CPR จะได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทย แต่ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงพบว่า พื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (อุบลราชธานี) มีความไม่แน่นอนสูงกว่าภาคเหนือ (เชียงใหม่) ประมาณ 3 เท่าในแง่ของโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนเกินเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรม ($\pm 10\%$)

ข้อมูลความเสี่ยงที่ค้นพบยืนยันว่า การใช้ค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียว (Deterministic Approach) ในการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์อาจนำไปสู่ความผิดพลาดในการวางแผน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความผันผวนของสภาพอากาศสูง อย่างไรก็ตาม การสมมติให้ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) อาจนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงบริเวณหางการแจกแจง (Tail Risk) ที่ต่ำกว่าความเป็นจริงในกรณีที่ข้อมูลจริงมีความเบ้หรือความโด่งที่ผิดปกติ ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญที่ผู้นำผลวิจัยไปใช้ควรพิจารณาประกอบด้วย

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์และการศึกษาต่อยอด ดังนี้ สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม วิศวกรผู้ออกแบบระบบ PV ในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ควรพิจารณาปรับใช้ "ค่าเผื่อความปลอดภัย" (Safety Factor) ที่สูงขึ้น หรือใช้ค่าขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่น 95% (Lower Bound 95% CI) ที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นเกณฑ์ในการประเมินผลผลิตพลังงานขั้นต่ำ (Guaranteed Output) เพื่อลดความเสี่ยงทางการเงินของโครงการ

สำหรับการศึกษาในอนาคต ควรมีการขยายผลการศึกษาโดยนำปัจจัยความผันผวนตามฤดูกาล (Seasonal Variation) มาพิจารณาร่วมด้วย เนื่องจากการศึกษานี้ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยรายปี ซึ่งอาจยังไม่สะท้อนความเสี่ยงสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นในช่วงฤดูมรสุม นอกจากนี้ ควรมีการตรวจสอบรูปแบบการแจกแจงของความคลาดเคลื่อน (Normality Test) จากข้อมูลดิบเพื่อยืนยันสมมติฐาน หรือพิจารณาใช้เทคนิคอื่น ๆ เช่น Bayesian Posterior หรือ Bootstrap Parameter Estimate เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ และควรทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบ (Benchmarking) กับแบบจำลองความน่าจะเป็นอื่น ๆ เช่น Quantile Regression [13] เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละพื้นที่ย่อย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Widén and J. Munkhammar, *Solar Radiation Theory*. Uppsala, Sweden: Uppsala University, 2019, doi: 10.33063/diva-381852.
- [2] H. Khorasanizadeh, A. Aghaei, H. Ehteram, R. Dehghani Yazdeli, and N. Hataminasar, "Attaining optimum tilts of flat solar surfaces utilizing measured solar data: Case study for Ilam, Iran," *Iranica Journal of Energy and Environment*, vol. 5, no. 3, pp. 224–232, 2014, doi: 10.5829/idosi.ijee.2014.05.03.01.
- [3] W. B. Wan Nik, M. Z. Ibrahim, K. B. Samo, and A. M. Muzathik, "Monthly mean hourly global solar radiation estimation," *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 379–387, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.solener.2011.10.008.

- [4] A. Madhlopa, "Solar radiation climate in Malawi," *Solar Energy*, vol. 80, no. 8, pp. 1055–1057, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.solener.2005.08.007.
- [5] M. J. Ahmad and G. N. Tiwari, "Solar radiation models–A review," *International Journal of Energy Research*, vol. 35, no. 4, pp. 271–290, Mar. 2011, doi: 10.1002/er.1690.
- [6] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. NY, USA: Academic Press, 1983, doi: 10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0.
- [7] เสริม จันทร์ฉาย, *รังสีอาทิตย์*. นครปฐม: เพชรเกษมการพิมพ์, 2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://phy.sc.su.ac.th/book/solar_book.pdf
- [8] B. Y. Liu and R. C. Jordan, "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation," *Solar Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 1–19, Jul. 1960, doi: 10.1016/0038-092X(60)90062-1.
- [9] M. Collares-Pereira and A. Rabl, "The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values," *Solar Energy*, vol. 22, no. 2, pp. 155–164, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90100-2.
- [10] K. Runghathaithum, K. Tohsing and S. Janjai, "Simplified models for obtaining monthly average hourly global solar radiation from daily radiation data at four main regions in Thailand," *KKU Science Journal*, vol. 53, no. 3, pp. 390–400, Oct. 2025, doi: 10.14456/kkuscij.2025.31.
- [11] N. Metropolis and S. Ulam, "The Monte Carlo method," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 44, no. 247, pp. 335–341, Sep. 1949, doi: 10.2307/2280232.
- [12] Thai Meteorological Department, *Climatological Data of Thailand (30-Year Period: 1981-2010)*. Bangkok: Thai Meteorological Department, 2012. [Online]. Available: <https://www.tmd.go.th/weather/province/last30years-1981-2010/>
- [13] P. Lauret, M. David, and H. T. Pedro, "Probabilistic solar forecasting using quantile regression models," *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, Art. no.1591, doi: 10.3390/en10101591.

กระบวนการปรับปรุงอาคารโดยใช้เทคโนโลยีแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และเกณฑ์
มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานใน
อาคาร: กรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี
Building Renovation Process Using Building Information Modeling (BIM) and
Building Energy Code (BEC) to Reduce Energy Consumption in Buildings:
A Case Study of the Thai Public Broadcasting Services Television (Thai PBS)
Transmitter Building in Ubon Ratchathani Province

วรยุทธ นนสี¹, ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ^{1*} และ อภัย ชาภิรมย์¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมระบบ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Warayut Nonsai¹, Teerawat Sinsiri^{1*} and Aphai Chapirom¹

¹School of Systems Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

Corresponding Author Email : M6602758@g.sut.ac.th

Received 05 October 2025

Revised 17 December 2025

Accepted 07 January 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี และวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารก่อนและหลังการปรับปรุง เปลือกอาคารโดยใช้โปรแกรม Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และใช้เกณฑ์ มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี การวิจัยครั้งนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสานระหว่างการศึกษาข้อมูล จริง (Empirical Data) จากการสำรวจอาคารโดยเลือกใช้โปรแกรม Autodesk Revit เป็นเครื่องมือในการสร้าง แบบจำลองอาคาร (Simulation Modeling) และการใช้โปรแกรม Building Energy Code Software version 2.6.0 (BEC V.2.6.0) สำหรับประเมินพลังงาน (BEC) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานของอาคาร

ผลจากการศึกษาพบว่าก่อนปรับปรุงอาคาร ค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร เท่ากับ 54,227.76 kW.h/year ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด คือ สูงกว่า 35,779.27 kW.h/year และหลังการปรับปรุงอาคาร ค่าการใช้พลังงาน โดยรวมของอาคาร เท่ากับ 35,550.97 kW.h/year ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด คือ ต่ำกว่า 35,779.27 kW.h/year โดย พลังงานที่ใช้ในอาคารส่วนใหญ่มาจากระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งมีการปรับปรุง 2 แนวทางเลือก สามารถลดการใช้พลังงานโดยภาพรวมของอาคาร ร้อยละ 34.44 ต่อปี การปรับปรุงด้วยการเปลี่ยน หลอดไฟฟ้าเป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8 (3X18W) ค่า LPD เท่ากับ 7.72 W/m² สวิตซ์หลอดเป็นกระเบื้อง หลังคาลอนคู่ ผิวนี้อ่อน ทำการติดตั้งฉนวนใยแก้วที่ได้รับฉลากประสิทธิภาพสูง Stay Cool หนา 3 นิ้ว Premium บน

แผ่นยิปซัมชนิดธรรมดา หนา 9 มม. ค่า RTTV เท่ากับ 7.86 W/m² ค่าพลังงานรวมของอาคาร 35,550.97 kW.h/Year ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน เป็นแนวทางการปรับปรุงอาคารที่ดีที่สุด สามารถลดค่าการใช้พลังงานรายปี 78,629.28 บาท โดยใช้เงินลงทุนในการปรับปรุงประมาณ 168,830 บาท ระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 1 เดือน 5 วัน

คำสำคัญ: การปรับปรุงอาคาร, แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM), เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC), อาคารเครื่องส่งสัญญาณ, สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

Abstract

This research aimed to study the current condition of the transmitter building of Thai Public Broadcasting Services Television (Thai PBS), Ubon Ratchathani Province, and to analyze and evaluate the energy efficiency of the building before and after the renovation of the building envelope using Autodesk Revit Program in Building Information Modeling (BIM) and using the Building Energy Conservation (BEC) design standards to reduce energy consumption of the transmitter building of Thai PBS, Ubon Ratchathani Province. This research used a mixed research methodology, which involved studying real data (Empirical data) from building surveys using Autodesk Revit as a tool for Building Information Modelling (BIM) (Simulation modeling) and using Building Energy Code Software version 2.6.0 (BEC V.2.6.0) for energy assessment (BEC) to be used as a guideline for building energy conservation.

The results of the study found that before the building renovation, the total energy consumption of the building was 54,227.76 kW.h/year, not passing the specified criteria, which was higher than 35,779.27 kW.h/year. After the building renovation, the total energy consumption of the building was 35,550.97 kW.h/year, passing the specified criteria, which was lower than 35,779.27 kW.h/year. Most of the energy used in the building came from the lighting system, air conditioning system, and other electrical equipment, for which there were two alternatives for improvement, able to reduce the overall electricity usage of the building by 34.44 percent per year. Improvements were made by replacing the light bulbs with LED T8 fluorescent bulbs (3X18W). The LPD value was 7.72 W/m². The roof material color was double-wave roof tiles, light surface. Fiberglass insulation that received the high-efficiency label Stay Cool, 3 inches thick, Premium, was installed on ordinary gypsum board, 9 mm thick. The RTTV value was 7.86 W/m². The total energy value of the building was 35,550.97 kW.h/year, passing the standard criteria. This could be the best way to improve buildings. It could reduce the annual electricity consumption by 78,629.28 Baht, with an investment of approximately 168,830 baht, and a payback period of only 2 years, 1 month and 5 days.

Keywords: Building Renovation, Building Information Modelling (BIM), Building Energy Code (BEC), Transmitter Building, Thai PBS Ubonratchathani Province

1. บทนำ

ปัญหาการใช้พลังงานในอาคารสำนักงานและที่พักอาศัยที่ต้องพึ่งพากระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่างอย่างต่อเนื่อง ถือเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้หลายประเทศได้พัฒนานโยบายและเครื่องมือที่ทันสมัยเพื่อควบคุมการใช้พลังงาน เช่น กรอบกฎหมายด้านการออกแบบอาคารสีเขียว (Green Building Codes) การบังคับใช้มาตรฐานการปล่อยคาร์บอนในอาคาร และการนำเทคโนโลยีใหม่เข้ามาช่วย เช่น Digital Twin ที่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ หรือ Smart Building ที่ใช้ระบบเซ็นเซอร์และ AI ในการจัดการพลังงานอย่างอัตโนมัติ ในประเทศไทยการใช้พลังงานในภาคอาคารยังคงสูงต่อเนื่อง ต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศมากกว่าครึ่งของการใช้ทั้งหมด ทำให้เกิดความเปราะบางต่อความมั่นคงทางพลังงาน แม้ว่ารัฐบาลได้กำหนดยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี และแผนพัฒนาพลังงานที่เน้นการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการบังคับใช้เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (Building Energy Code: BEC) [1] แต่การปฏิบัติยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในกรณีอาคารเก่า ที่สร้างมาก่อนเกณฑ์มาตรฐานจะมีผลบังคับอาคารเหล่านี้แม้ยังคงใช้งานได้ แต่กลับมีสมรรถนะด้านพลังงานต่ำ ไม่สามารถตอบโจทย์ด้านสิ่งแวดล้อมและข้อกำหนดพลังงานในปัจจุบันได้ ในขณะที่ต่างประเทศเริ่มพัฒนาและใช้ BIM ร่วมกับ Digital Twin และระบบอัจฉริยะเพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงอาคารในเชิงรุก ประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงใช้แบบแปลน 2 มิติหรือระบบจำลองเพียงบางส่วน ขาดการเชื่อมโยงข้อมูลเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานอย่างครบวงจร ความแตกต่างนี้แสดงให้เห็นถึงช่องว่างที่สำคัญ กล่าวคือ ประเทศไทยยังขาดกรณีศึกษาและองค์ความรู้เชิงปฏิบัติที่สามารถใช้ BIM ร่วมกับเกณฑ์ BEC ในการจำลองและประเมินการปรับปรุงอาคารเก่าอย่างเป็นระบบ ซึ่งหากสามารถพัฒนาแนวทางนี้ได้ จะไม่เพียงช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและยืดอายุการใช้งานของอาคาร แต่ยังตอบสนองต่อ เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ในหลายข้อ ได้แก่ SDG 7 (พลังงานสะอาดที่ทุกคนเข้าถึงได้) SDG 11 (เมืองและชุมชนยั่งยืน) SDG 12 (การผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน) และ SDG 13 (การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ)

ปัจจุบันการใช้พลังงานในประเทศไทยมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อตอบสนองความต้องการของภาคประชาชนภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากทรัพยากรพลังงานภายในประเทศมีค่อนข้างจำกัด จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ แนวทางสำคัญที่จะช่วยลดอัตราการเพิ่มความต้องการการใช้พลังงานในประเทศคือการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพในทุกภาคส่วน [2] จากปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้ออกกฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคารและมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 [1] หรือที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (Building Energy Code: BEC) โดยมีการบังคับอาคารตามกฎหมายที่มีการก่อสร้างอาคารหรือดัดแปลงที่มีพื้นที่รวมทั้งหมดตั้งแต่ 2,000 m² ขึ้นไปและอยู่ใน 9 ประเภท ได้แก่ โรงแรม โรงงาน สถานบริการ สถานพยาบาล สถานศึกษา ห้างสรรพสินค้า อาคารชุด และอาคารชุมนุม ต้องมีการออกแบบอาคารให้เป็นไปตามมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงานซึ่งกฎกระทรวงฯ ได้มีการบังคับใช้เมื่อวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมาโดยที่อาคารในภาครัฐที่มีการก่อสร้างและใช้งานในระยะเวลา 10-15 ปีที่ผ่านมาจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามกฎหมายฯ

แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) เป็นแนวคิดที่ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ในกระบวนการออกแบบก่อสร้างอาคาร โดยใช้การจำลองอาคารผสมร่วมกับสารสนเทศ และแบบจำลอง [3] ปัจจุบันถือเป็นกระบวนการทำงาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาการดำเนินงานในภาคอุตสาหกรรม

ก่อสร้างที่ครอบคลุมตลอดวงจรชีวิตอาคาร เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการประสานงาน จากทุกส่วนให้เชื่อมโยงกันอย่างเป็นระบบ ลดปัญหาข้อมูลที่ขัดแย้งและลดข้อผิดพลาดจากการทำงานในลักษณะเดิม [4] ในปัจจุบันแบบจำลองอาคารสารสนเทศถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถผนวกข้อมูลด้านต่าง ๆ ของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ การจัดการข้อมูลและการประสานงานกับฝ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการได้ดีมากขึ้นส่งผลให้เกิดการแก้ไขข้อผิดพลาด ข้อขัดแย้งช่วงการออกแบบได้ก่อนทำการก่อสร้างจริง BIM [5], [6] การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) [3] เป็นกระบวนการทางเทคโนโลยีที่มีมานานและได้รับการใช้กันอย่างแพร่หลาย ในต่างประเทศ ซึ่งใช้ในกระบวนการออกแบบ การก่อสร้างอาคาร การบริหารทรัพยากรอาคาร และตลอดอายุการใช้งานของอาคาร (Building Life Cycle) การประยุกต์ใช้ BIM สามารถควบคุมระบบการทำงานในกระบวนการต่าง ๆ ให้มีความสอดคล้องกันมากขึ้น [7]

จากการศึกษาแบบจำลองอาคาร (BIM) สามารถสร้างแบบจำลองเสมือนของอาคารได้รวดเร็วกว่าวิธีการออกแบบในรูปแบบดั้งเดิมถึงร้อยละ 10 และมีความแม่นยำมากกว่าร้อยละ 80 ส่งผลทำให้การแก้ไขแบบหรือการเปลี่ยนแปลงแบบมีอัตราส่วนที่ลดลง [8] นอกจากนี้ยังนำ BIM มาประยุกต์ใช้ออกแบบ 3 มิติ เพื่อให้สร้างแบบจำลองของโครงสร้างอาคาร สามารถตรวจสอบและปรับปรุงแบบจำลองได้ก่อนที่จะนำไปใช้จริง ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดข้อผิดพลาดในการก่อสร้าง ประหยัดเวลาและประหยัดต้นทุนการก่อสร้าง [9] ผนวกกับผสมผสานกระบวนการและวิธีการประเมินค่าการอนุรักษ์พลังงานของอาคาร [10] พบว่า เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC (Building Energy Code) เป็นเครื่องมือคำนวณค่าการอนุรักษ์พลังงานตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบเพื่อการอนุรักษ์พลังงานตามที่กฎกระทรวงฯ กำหนดและได้มีการนำไปเป็นเครื่องมือเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านการอนุรักษ์พลังงานของอาคาร เพื่อการอนุรักษ์พลังงานกรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงนำ BIM มาประยุกต์ใช้ควบคู่กับเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน BEC มาศึกษาในกรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี ดังนั้น การศึกษาวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานและพัฒนาแนวทางการปรับปรุงอาคารครั้งนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Autodesk Revit เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบจำลองอาคารและโครงสร้างอาคารแต่ละประเภท (BIM) ควบคู่กับเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน BEC จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งในเชิงวิชาการ เชิงนโยบาย และเชิงปฏิบัติ เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่จะช่วยปิดช่องว่างในเรื่อง แนวทางการปรับปรุงวัสดุกรอบอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานที่เหมาะสมและคุ้มค่าในการลงทุน โดยเฉพาะอาคารเครื่องส่งสัญญาณโทรทัศน์ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะ เช่น ระบบปรับอากาศและอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้พลังงานสูง พื้นที่ใช้งานที่ไม่เหมือนอาคารสำนักงานทั่วไป ซึ่งการบูรณาการเรื่อง BIM และ BEC ในอาคารประเภทนี้ยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียด ในการสร้างแบบจำลองอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานร่วมกับการจัดการข้อมูลอาคารในระยะยาวเกี่ยวกับการวิเคราะห์ ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และมาตรการปรับปรุงอาคารด้านการสื่อสารที่มีข้อจำกัดทางด้านโครงสร้างและการใช้งาน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สามารถเป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารประเภทอื่น ๆ ได้ในอนาคต

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาสภาพปัจจุบันของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

2.2 เพื่อวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารก่อนและหลังการปรับปรุงเปลือกอาคาร โดยใช้โปรแกรม Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

3. ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตการศึกษาเพื่อความชัดเจน ดังนี้

3.1 ด้านทฤษฎีและเอกสาร

ศึกษาทฤษฎี แนวคิด วรรณกรรม งานวิจัย กฎหมาย และข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในอาคาร รวมถึงเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) และหลักการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) เพื่อนำมาเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์อาคารกรณีศึกษา

3.2 ด้านอาคารกรณีศึกษา

อาคารที่ใช้เป็นกรณีศึกษา คือ อาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

- (1) เป็นอาคารชั้นเดียว มีพื้นที่อาคารไม่เกิน 1,000 m²
- (2) มีการใช้งานมานานกว่า 15 ปี โดยเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน
- (3) การใช้งานหลักแบ่งเป็น พื้นที่สำนักงานและที่พักอาศัย
- (4) เป็นอาคารที่มีการใช้ระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่างในปริมาณมาก ทำให้มีการใช้พลังงานสูง
- (5) แบบอาคารมาตรฐานจัดทำโดยสำนักวิศวกรรม องค์การกระจายเสียงและแพร่ภาพสาธารณะแห่งประเทศไทย

3.3 ด้านเครื่องมือและการวิเคราะห์

- (1) การใช้โปรแกรม Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร
- (2) การประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน BEC Web-based
- (3) การปรับปรุงแบบจำลองจะมุ่งเน้นที่ การปรับปรุงเปลือกอาคาร เช่น การเลือกวัสดุที่เหมาะสม การเพิ่มฉนวนกันความร้อน และการลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-value)

3.4 ด้านการทดลองและผลลัพธ์

ทำการวิเคราะห์ผลการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงแบบจำลอง เพื่อหาประสิทธิภาพและแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสม พร้อมสรุปเป็นข้อเสนอแนะเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติ

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 แนวคิดแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM)

หมายถึง การใช้โปรแกรม Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร โดยมีข้อมูลทางกายภาพและสารสนเทศของอาคาร รวมถึงผนัง หลังคา พื้น หน้าต่าง และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องใช้เป็นเครื่องมือในการจำลอง วิเคราะห์ และปรับปรุงเปลือกอาคาร ซึ่งผู้วิจัยได้มีการนำมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นนี้ เป็นแนวทางในการจำลองข้อมูลอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี แนวคิดแบบจำลอง BIM เป็นเครื่องมือในการจัดเก็บข้อมูลอาคาร ทำให้ทราบถึงลักษณะการทำงานของแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์มาใช้กับงานอาคารจำลอง [3, 11]

4.2 เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC)

หมายถึง โปรแกรมคำนวณและเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานของอาคาร โดยเฉพาะระบบเปลือกอาคาร ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และการใช้พลังงานรวมของอาคาร ใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการปรับปรุงเปลือกอาคาร (Building Envelope) หมายถึง ส่วนประกอบภายนอกที่กั้น

ระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ได้แก่ ผนัง หลังคา ประตู และหน้าต่าง โดยพิจารณาค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (U-value, OTTV, RTTV) เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากขึ้น [3, 7]

ปัจจุบันเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ปี พ.ศ. 2564 กำหนดเกณฑ์มาตรฐานขั้นต่ำในการออกแบบอาคารด้านพลังงานในรายระบบต่าง ๆ ของอาคาร ซึ่งประกอบด้วย 5 ระบบ ได้แก่ 1) ระบบเปลือกอาคาร (Envelope System) 2) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting System) 3) ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System: AC) 4) อุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน (Boiler and Heat Pump) และ 5) ระบบพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) [10]

4.3 การประเมินอาคารประหยัดพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การประเมินประสิทธิภาพอาคารทางด้านการประหยัดพลังงานและความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม มีการประเมินในการก่อสร้างอาคารพักอาศัย แบ่งออกเป็น 9 หมวด ได้แก่ หมวดที่ 1 สถานที่ตั้งอาคาร หมวดที่ 2 ผังบริเวณและงานภูมิสถาปัตยกรรม หมวดที่ 3 เปลือกอาคาร หมวดที่ 4 ระบบปรับอากาศ หมวดที่ 5 ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง หมวดที่ 6 ระบบธรรมชาติและพลังงานทดแทน หมวดที่ 7 ระบบสุขาภิบาล หมวดที่ 8 วัสดุและการก่อสร้าง และ หมวดที่ 9 เทคนิคการออกแบบและกลยุทธ์ประหยัดพลังงาน/รักษาสภาพแวดล้อม

4.4 กฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน (BEC)

4.4.1 กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563 [2]

4.4.2 ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการคำนวณ และการรับรองผลการตรวจประเมินในการออกแบบอาคาร เพื่อการอนุรักษ์พลังงานแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียน ในระบบต่าง ๆ ของอาคาร พ.ศ. 2564

4.4.3 ประกาศกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน เรื่อง การรับรองผู้ทำหน้าที่ผู้ตรวจประเมินในการออกแบบก่อสร้าง หรือดัดแปลงอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Nasrun Mohd Nawawi et al. [12] ได้ศึกษาการใช้พลังงานของอาคารกระทรวงการคลังประเทศมาเลเซีย ซึ่งเป็นอาคารสูง 12 ชั้น มีพื้นที่ 129,132 m² และมีพื้นที่ปรับอากาศอยู่ที่ 96,012 m² ตัวอาคารทำด้วยคอนกรีต และร้อยละ 65 ของผนังอาคารเป็นกระจก พบว่า อาคารมีส่วนการใช้พลังงาน ได้แก่ ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ร้อยละ 51 ระบบแสงสว่าง ร้อยละ 34 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จ่ายกลับโดยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่อยู่ในอาคาร ได้แก่ เครื่องใช้สำนักงาน คอมพิวเตอร์เครื่องใช้ไฟฟ้าในครัว ร้อยละ 8 และอุปกรณ์อื่น ๆ ร้อยละ 7

Shetty [13] ได้ศึกษาการใช้พลังงานในอาคารของประเทศอินเดีย พบว่า อาคารในประเทศอินเดียมีอัตราการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนประชากรที่มีมากขึ้นทุกวัน โดยเฉพาะพื้นที่ในอาคารศูนย์การค้า และอาคารสำนักงาน พบว่า มีการก่อสร้างใหม่และมีการใช้ พลังงานมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากเหตุดังกล่าวรัฐบาลของประเทศอินเดียจึงได้เกิดความตระหนักในด้านการอนุรักษ์พลังงานในอาคารขึ้น ประเทศอินเดียจึงได้มีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานด้านพลังงาน ในอาคารที่สร้างขึ้นและมีการกำหนดให้ใช้โปรแกรม Energy Conservation Building Code (ECBC) ซึ่งเป็นการช่วยวิเคราะห์และออกแบบอาคารให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของอาคารอนุรักษ์พลังงาน

ปรีชญา ปัตถาวงศ์ และวิทยา ยงเจริญ [14] ได้ทำการศึกษากรอบอาคารชุดและแนวทางการประหยัดพลังงาน พบว่า การปรับปรุงกรอบอาคารตามแนวทางเลือกด้วยวิธีการใช้โปรแกรม Building Energy Code v.1.0.5 พบว่า แนวทางที่ปรับปรุงแล้วทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด มี 4 แนวทาง คือ การปรับปรุงโดยติดตั้งอุปกรณ์บังแดด ระยะยื่น 80 เซนติเมตร บริเวณผนังโปร่งแสง ติดฉนวนโพลีเอทิลีน ความหนา 5 มิลลิเมตร บริเวณผนังทึบแสง และติดฉนวนโพลีเอทิลีน ความหนา 5 มิลลิเมตร บนฝ้าเพดาน (S80W5R5), การปรับปรุงโดยติดตั้ง

อุปกรณ์บังแดดแบบ ระแนงมุมเอียง 25 องศา บริเวณผนังโปร่งแสงในด้านการประหยัดพลังงานแนวทาง STTW10R5 สามารถประหยัดพลังงานได้สูงที่สุด โดยมีผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารเฉลี่ย เท่ากับ 77,563 kW.h/year

วงศ์ยา อนุศักดิ์กุล [15] ได้ศึกษาแนวทางการปรับปรุงอาคารสำนักงานภาครัฐในประเทศไทยให้เป็นอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์ ผลการวิจัย พบว่า อาคารทั้ง 3 รูปแบบก่อนปรับปรุงมีการใช้พลังงานสูงกว่าที่ผลิตได้เอง โดยมีการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนัง (OTTV) และหลังคา (RTTV) ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด ซึ่งประเมินด้วยโปรแกรม Building Energy Code (BEC) มีค่ากำลังไฟฟ้าส่องสว่างสูงสุดผ่านเกณฑ์ทุกอาคาร แต่ค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในบางอาคารต่ำกว่าเกณฑ์ จึงแบ่งแนวทางลดการใช้พลังงานดังนี้ แนวทางที่ 1 ปรับปรุงกรอบอาคารเพียงอย่างเดียว ให้ผ่านเกณฑ์ตามกฎหมาย คือ $OTTV \leq 50 \text{ W/m}^2$ และ $RTTV \leq 15 \text{ W/m}^2$ และแนวทางที่ 2 ปรับปรุงการจัดการระบบภายในอาคาร โดยเปลี่ยนหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นหลอดไฟประสิทธิภาพสูงแอลอีดี (LED) เปลี่ยนเครื่องปรับอากาศให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

นันทพล มหาวัน และคณะ [6] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานด้วยการปรับปรุงกรอบอาคาร กรณีศึกษา: อาคารที่อยู่อาศัย พบว่า มีการปรับปรุง 4 แนวทางเลือก สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้มากกว่าร้อยละ 40 โดยใช้เงินลงทุนน้อยกว่า 100,000 บาท การปรับปรุง ด้วยการเปลี่ยนชนิดกระจกเป็นกระจกสะท้อนแสงและติดตั้งฉนวนใยแก้ว 3 นิ้วในผนังทิศตะวันตก พร้อมทั้งติดตั้งฉนวนใยแก้ว 6 นิ้ว บนฝ้าเพดานชั้นบนสุดทั้งหมด เป็นแนวทางการปรับปรุงกรอบอาคารที่ดีที่สุดสำหรับกรณีศึกษานี้ สามารถลดการใช้พลังงานใช้ไฟฟ้ารายปีลดลงได้ ร้อยละ 44 โดยใช้เงินลงทุนปรับปรุงประมาณ 47,000 บาท ระยะเวลาคืนทุน 0.78 ปี

Ben Mahmoud et al. [16] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ BIM ในการผลิตไม่สำเร็จรูปสำหรับรัฐวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ในประเทศแคนาดา ผ่านการทบทวนวรรณกรรม การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง และแบบสำรวจออนไลน์ และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อ เป็นแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการปรับใช้ BIM และเสนอกรอบการทำงานสำหรับการนำ BIM ไปใช้ใน SMEs ที่ผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูป พบว่า การพัฒนาซอฟต์แวร์และโปรแกรม BIM เพื่อแปลงข้อมูลจากแบบจำลอง BIM ไปยังอุปกรณ์การผลิต การใช้กลยุทธ์ที่ดีที่สุด ต้องเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์รูปแบบธุรกิจปัจจุบันของ SMEs และแต่งตั้งคณะกรรมการ BIM ขนาดเล็ก ซึ่งมีหน้าที่หลักในการบริหารจัดการ การประสานงาน และการสร้างแบบจำลอง แนวปฏิบัติที่ดี คือ การสนับสนุนทีมงานติดตั้งและส่งเสริมการสื่อสารและการทำงานร่วมกัน

Siebelink et al. [17] ได้ทำการศึกษาข้อจำกัดในการนำ BIM มาใช้ในองค์กร: กรณีศึกษาหลายกรณีของบริษัทรับเหมาก่อสร้าง มุ่งเน้นไปที่ระดับภายในองค์กร ผ่านการสัมภาษณ์ และให้ผลลัพธ์เกี่ยวกับข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับจุดที่ต้องมุ่งเน้นของการวัดผลจากการนำ BIM มาใช้งานระดับองค์กรและความพร้อมของ BIM ขององค์กร ผลกระทบของอุปสรรคในระดับองค์กรต่างๆ เช่น ตั้งแต่ผู้บริหารระดับสูงไปจนถึงทีมหัวหน้าโครงการ และการเชื่อมโยงอุปสรรคกับระดับความพร้อมของ BIM ที่แตกต่างกันที่เกี่ยวข้องกับแรงจูงใจ และขีดความสามารถด้านเวลาของบุคลากรในทุกระดับขององค์กร ปัญหาการขาดการสนับสนุนจากผู้บริหารระดับสูง การบรรลุการเติบโตของความพร้อมของ BIM สถานการณ์ที่มีความพร้อมของ BIM สูงจะมีแนวโน้มที่จะมีอุปสรรคจากภายนอกมากขึ้น

Zima et al. [18] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยภายนอกและภายในสำหรับการนำ BIM ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศโปแลนด์ การศึกษาปัจจัยจากการทบทวนวรรณกรรม ประสบการณ์ส่วนตัว และรายงานต่าง ๆ และทำเป็นตาราง SWOT Analysis เพื่อระบุจุดแข็ง จุดอ่อน โอกาสและอุปสรรค พบว่าการนำ BIM มาใช้ในโปแลนด์ในปัจจุบันมีสถานะที่ดีในตลาดอันเป็นผลมาจากการที่จุดแข็งมีมากกว่าจุดอ่อน และโอกาสมีกว่าอุปสรรค อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของการนำ BIM มาใช้ในงานก่อสร้างในโปแลนด์นั้นยากที่จะ

คาดการณ์ได้ ทางออกเชิงกลยุทธ์ที่ดีที่สุด คือ การนำเทคโนโลยี BIM มาใช้เป็นกลยุทธ์การพัฒนาเชิงรุกที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการใช้จุดแข็งและโอกาสให้เกิดประโยชน์สูงสุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการนำ BIM มาใช้ในชีวิตประจำวัน

6. การดำเนินการวิจัย

การศึกษาในครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Autodesk Revit ในการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) โดยการนำเสนอ BIM จะประกอบด้วยแบบจำลองของอาคาร ได้แก่ รูปทรงอาคาร พื้นที่ใช้สอย ข้อมูลวัสดุของเปลือกอาคาร (ผนัง หลังคา หน้าต่าง) ฯลฯ รวมถึงลักษณะทางเรขาคณิต BIM เป็นแหล่งข้อมูลแบบสหวิทยาการที่ใช้ร่วมกับเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานของอาคาร การออกแบบจำลองสารสนเทศอาคารเสมือน BIM จึงเป็นกระบวนการที่เฉพาะเจาะจงกว่า 3 มิติธรรมดาที่เน้นทางด้านการจัดทำและสร้างโมเดลในรูปแบบ 3 มิติ (Object model) ซึ่ง BIM จะมีข้อมูลมากกว่า และมีรายละเอียดเกี่ยวกับคุณลักษณะด้านประสิทธิภาพ ข้อมูลจำเพาะ และข้อมูลอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ทางกายภาพที่ฝังอยู่ในแบบจำลองดิจิทัล 3 มิติที่ใช้ร่วมกัน ดังนั้น การออกแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ที่สร้างขึ้นมา โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร กรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี จะช่วยวิเคราะห์พลังงาน คุณสมบัติของวัสดุและเพิ่มฉนวนกันความร้อนในการจำลอง เพื่อทดสอบผลลัพธ์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ค่า OTTV, RTTV และค่าใช้พลังงานรวมของอาคารทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงเปลือกอาคารได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

6.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การวิจัยครั้งนี้กำหนดประชากรเป้าหมาย เป็นอาคารประเภทสำนักงานและที่พักอาศัยในหน่วยงานภาครัฐที่มีอายุการใช้งานมากกว่า 10–15 ปี ซึ่งยังคงใช้งานอยู่แต่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานต่ำและไม่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานด้านการอนุรักษ์พลังงานในปัจจุบัน โดยประชากรดังกล่าวมีจำนวนมากและกระจายอยู่ทั่วประเทศ

การเลือกอาคารนี้เป็นกลุ่มตัวอย่างช่วยให้การวิจัยสามารถเก็บข้อมูลจริงจากการใช้งานอาคาร และนำมาสร้างแบบจำลอง BIM เพื่อวิเคราะห์เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ การเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ถือเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากอาคารกรณีศึกษามีคุณลักษณะเฉพาะที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การวิจัยและสามารถสะท้อนแนวทางไปสู่อาคารประเภทอื่น ๆ ได้ในอนาคต

6.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องมือทั้งเชิงดิจิทัลและเชิงกายภาพ เพื่อสนับสนุนการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา โดยประกอบด้วย

6.2.1 โปรแกรม Autodesk Revit ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling: BIM) เพื่อแสดงรายละเอียดของอาคารกรณีศึกษา ได้แก่ รูปทรงอาคาร พื้นที่ใช้สอย ข้อมูลวัสดุของเปลือกอาคาร (ผนัง หลังคา หน้าต่าง) รวมทั้งระบบประกอบอาคาร โปรแกรมนี้ช่วยให้สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุและเพิ่มฉนวนกันความร้อนในการจำลอง เพื่อทดสอบผลลัพธ์ต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

6.2.2 โปรแกรม BEC Web-based (Building Energy Code) ใช้สำหรับการคำนวณและวิเคราะห์สมรรถนะด้านพลังงานของอาคารตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน โดยโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ค่า OTTV (Overall Thermal Transfer Value), RTTV (Roof Thermal Transfer Value) และค่าใช้พลังงานรวม (kWh) ของอาคาร ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงเปลือกอาคาร

6.2.3 แบบฟอร์มสำรวจอาคารและบันทึกข้อมูลการใช้งานจริง จัดทำขึ้นเพื่อใช้บันทึกข้อมูลลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความหนาและชนิดของวัสดุผนัง หลังคา และช่องเปิด ตลอดจนการใช้งานระบบไฟฟ้า ระบบ

ปรับอากาศ และระบบแสงสว่าง ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร BIM และการตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์พลังงาน

6.2.4 เอกสารและข้อมูลทุติยภูมิ ประกอบด้วยแผนผังอาคารมาตรฐานที่จัดทำโดยสำนักวิศวกรรม องค์การกระจายเสียงและแพร่ภาพสาธารณะแห่งประเทศไทย รายงานการใช้พลังงานย้อนหลังของอาคาร รวมถึงงานวิจัยและเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร

6.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลของการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วยทั้งข้อมูลปฐมภูมิและข้อมูลทุติยภูมิ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนและสามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานอาคารได้อย่างถูกต้องและน่าเชื่อถือ ดังนี้

6.3.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) การสำรวจอาคารกรณีศึกษา คือ อาคารเครื่องส่งสัญญาณสถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี โดยเก็บข้อมูลเชิงกายภาพ ได้แก่ ขนาดพื้นที่ใช้สอย ลักษณะการจัดแบ่งพื้นที่ ความหนาและชนิดวัสดุของผนัง หลังคา หน้าต่าง และช่องเปิด การบันทึกข้อมูลการใช้งานจริง เช่น จำนวนชั่วโมงการใช้งานอาคาร (เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน) การใช้ระบบปรับอากาศ ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และระบบประกอบอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงาน การถ่ายภาพและวัดค่าพื้นฐานของอาคาร เช่น การวัดขนาดจริงของช่องเปิด การตรวจสอบวัสดุที่ใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูลนำไปสร้างแบบจำลอง BIM

6.3.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) แบบแปลนและเอกสารมาตรฐานอาคารที่จัดทำโดยสำนักวิศวกรรม องค์การกระจายเสียงและแพร่ภาพสาธารณะแห่งประเทศไทย ซึ่งใช้เป็นข้อมูลหลักในการสร้างแบบจำลอง BIM ด้วยโปรแกรม Autodesk Revit ข้อมูลการใช้พลังงานย้อนหลังของอาคาร เช่น ค่าไฟฟ้าประจำเดือนที่ได้รับจากหน่วยงาน เพื่อใช้เป็นฐานในการตรวจสอบผลการวิเคราะห์ของเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC งานวิจัย เอกสารวิชาการ มาตรฐาน และกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงานและการปรับปรุงอาคาร ซึ่งนำมาใช้เพื่อกำหนดเกณฑ์การวิเคราะห์และการตีความผลการศึกษา

6.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยขั้นตอนหลักที่มีความต่อเนื่องและสัมพันธ์กัน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลทฤษฎี มาตรฐานกฎหมาย และงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร การใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน (BEC) เพื่อใช้เป็นฐานความรู้และกรอบในการดำเนินการ

ขั้นตอนที่ 2 การสำรวจและเก็บข้อมูลอาคารกรณีศึกษา ดำเนินการสำรวจอาคารเครื่องส่งสัญญาณสถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี โดยเก็บข้อมูลด้านกายภาพ ข้อมูลวัสดุ ขนาดพื้นที่ใช้งาน การใช้พลังงานไฟฟ้า รวมถึงแบบแปลนและเอกสารประกอบที่มีอยู่ เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) ใช้โปรแกรม Autodesk Revit สร้างแบบจำลองอาคารกรณีศึกษาที่สะท้อนสภาพจริง ทั้งผนัง หลังคา หน้าต่าง พื้น และระบบประกอบอาคาร โดยใส่ข้อมูลวัสดุและคุณสมบัติทางกายภาพที่ตรงตามสภาพอาคารปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์การใช้พลังงานอาคารเดิม โดยใช้ Auto desk Insight วิเคราะห์ค่าพลังงานรวม (EUI) ของอาคาร และ Solar Analysis วิเคราะห์ค่ารังสีอาทิตย์ เปลือกอาคารแต่ละด้าน เพื่อเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับ โปรแกรม BEC

สร้างวัสดุเปลือกอาคารในโปรแกรม BEC Web-based เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของอาคารในสภาพเดิม โดยคำนวณค่า OTTV, RTTV,LPD และปริมาณการใช้พลังงานรวม เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเปรียบเทียบ เพื่อระบุแนวทางปรับปรุง

ขั้นตอนที่ 5 การปรับปรุงแบบจำลองเปลือกอาคาร ดำเนินการปรับปรุงแบบจำลอง BIM โดยเปลี่ยนหรือเสริมวัสดุเปลือกอาคาร เช่น การเพิ่มฉนวนกันความร้อน การเลือกวัสดุที่มีค่า U-value ต่ำ หรือการปรับปรุงช่องเปิดและระบบบังแดด เพื่อจำลองสภาพอาคารหลังการปรับปรุงตามแนวทางที่วิเคราะห์ได้แนวทางที่ 1 หรือ 2

ขั้นตอนที่ 6 การวิเคราะห์การใช้พลังงานอาคารหลังการปรับปรุง วิเคราะห์ค่า EUI วิเคราะห์พลังงานรวมในอาคาร โดย BIM ปรับปรุงวัสดุเปลือกอาคารใหม่โดยโปรแกรม BEC เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานกับสภาพอาคารเดิม โดยพิจารณาความแตกต่างด้านปริมาณพลังงานที่ใช้ ค่า OTTV,RTTV, LPD และค่าพลังงานรวมที่ลดลงให้ได้ตามค่ามาตรฐานของ BEC

ขั้นตอนที่ 7 การสังเคราะห์ข้อเสนอแนะและการนำผลไปใช้ สรุปผลการวิจัยและจัดทำข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงอาคารเก่าอื่น ๆ ให้มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงขึ้น รวมถึงการประยุกต์ใช้เป็นแนวทางสนับสนุนเชิงนโยบายและการปฏิบัติในอนาคต

6.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ใช้แนวทางเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) และการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

6.5.1 การวิเคราะห์สภาพอาคารเดิม นำข้อมูลจากการสำรวจอาคารและการสร้างแบบจำลอง BIM ของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี เข้าสู่เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC Web-based เพื่อคำนวณค่าการใช้พลังงานของอาคารในสภาพปัจจุบัน โดยเฉพาะค่า OTTV (Overall Thermal Transfer Value), ค่า RTTV (Roof Thermal Transfer Value) และค่าใช้พลังงานรวม (kW.h/year) ผลลัพธ์ที่ได้จะถือเป็นฐานข้อมูลเริ่มต้นสำหรับการเปรียบเทียบ

6.5.2 การวิเคราะห์อาคารหลังการปรับปรุง ดำเนินการปรับปรุงแบบจำลอง BIM โดยปรับเปลี่ยนวัสดุและองค์ประกอบของเปลือกอาคาร เช่น การเพิ่มฉนวนกันความร้อน การใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ (U-value) และการปรับปรุงช่องเปิดหรือกระจกบังแดด จากนั้นนำเข้าสู่โปรแกรม BEC เพื่อคำนวณค่าการใช้พลังงานหลังการปรับปรุง โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับสภาพอาคารเดิมในตัวชี้วัดเดียวกัน (OTTV, RTTV, kW.h/year)

ผลลัพธ์จะพิจารณาทั้งในเชิงวิชาการ เพื่อสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้ BIM และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ในการปรับปรุงอาคาร และในเชิงปฏิบัติ เพื่อเป็นแนวทางให้องค์กรที่ต้องการอนุรักษ์พลังงานสามารถนำไปปรับใช้กับอาคารจริงได้

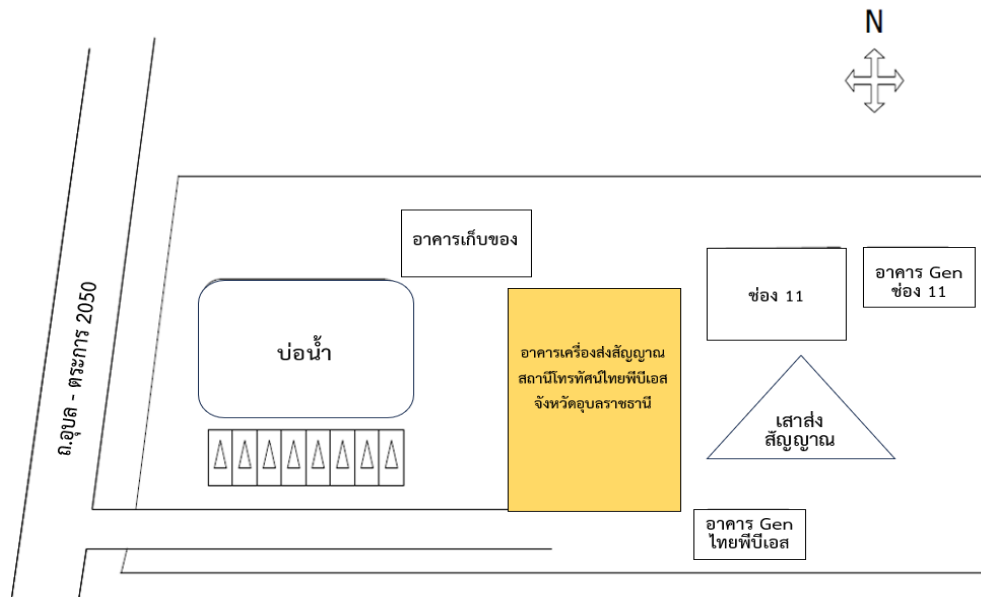
7. ผลการวิจัย

7.1 ผลการศึกษาสภาพปัจจุบันของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี ที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคาร

7.1.1 สภาพทั่วไปของอาคารเดิม

1) ลักษณะทางกายภาพของอาคารกรณีศึกษา พบว่า อาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี เป็นอาคารมีลักษณะเป็นอาคารชั้นเดียว พื้นที่ใช้สอยประมาณ 287.78 m² มีอายุการใช้งานมากกว่า 15 ปี ลักษณะการใช้งานประกอบด้วยพื้นที่สำนักงานและพื้นที่พักอาศัยรวมกัน ใช้งานเฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อวัน อาคารมีระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่างเป็นองค์ประกอบหลักที่ก่อให้เกิดการใช้พลังงานสูง มีตำแหน่งอาคาร

ตั้งอยู่ที่ N15.3818092, E101.9234022 มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า อาคารวางตัวในแนวทิศเหนือ-ทิศใต้ หน้าอาคารหันทางทิศตะวันตก มีอาคารข้างเคียงและพืชพรรณบริเวณที่ตั้ง ดังรูปที่ 1

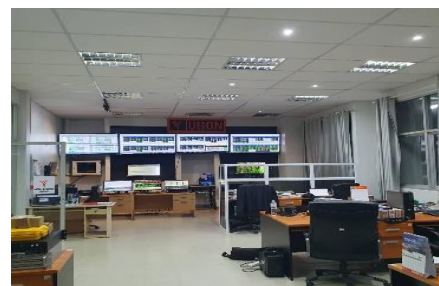


รูปที่ 1 แผนผังอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

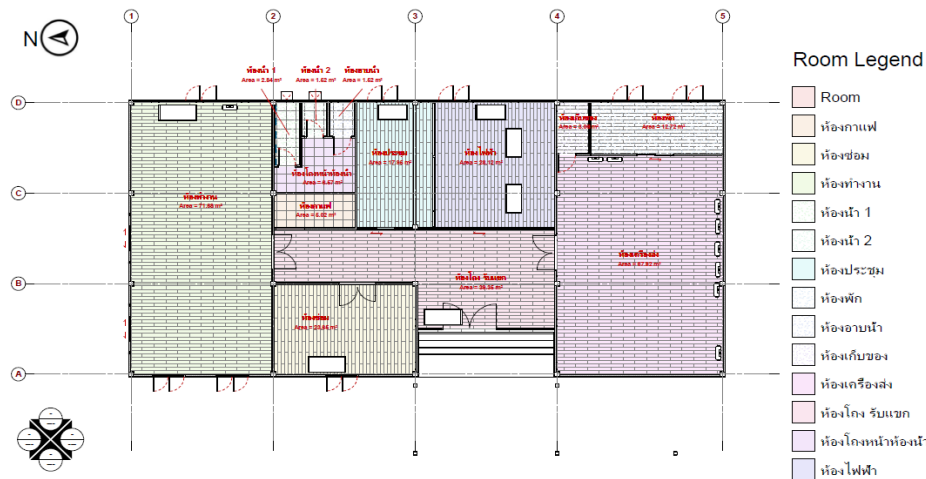
2) โครงสร้างหลักของอาคารเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 1 ชั้น ความสูงจาก พื้นชั้น 1 ถึงคานหลังคา สูง 4 เมตร ดังรูปที่ 2 ลักษณะการใช้งานส่วนใหญ่เป็นพื้นที่สำนักงาน ดังรูปที่ 3 และพื้นที่ใช้สอย ประกอบด้วย โถงต้อนรับแขก ห้องน้ำ ห้องเก็บของ ห้องพัก ห้องประชุม ห้องซ่อม ห้องไฟฟ้า ห้องเครื่องส่ง พื้นที่โดยแบ่งเป็นพื้นที่ระบายสีเป็นพื้นที่ปรับอากาศ 265.12 m² คิดเป็นร้อยละ 92.05 ของพื้นที่ทั้งหมด และพื้นที่ที่เป็นพื้นสีขาวพื้นที่ไม่ปรับอากาศ 22.66 m² คิดเป็นร้อยละ 7.95 ของพื้นที่ทั้งหมด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 โครงสร้างอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 3 พื้นที่สำนักงานภายในอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 4 แผนผังแสดงพื้นที่ใช้สอยของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

3) วัสดุเปลือกอาคาร จากการศึกษแบบก่อสร้างอาคารกรณีศึกษา มีรายละเอียดส่วนประกอบเปลือกอาคารผนังที่วัสดุเป็นอิฐบล็อกกลวงฉาบปูนสองด้านทาสีเทาอ่อนโครงสร้างเสาขนาด 0.2 x 0.2 เมตร โครงสร้างคานหน้าตาดขนาด 0.7 x 0.3 เมตร ผนังโปร่งแสงเป็นกระจกใส หนา 6 มิลลิเมตร ส่วนหลังคามุงด้วยกระเบื้องหลังคาลอนคู่สีน้ำตาลเข้ม ฝ้าเพดานเป็นยิปซัมบอร์ด หนา 9 มิลลิเมตร แผงกันแดดด้านหน้าอาคารเป็นวัสดุเมทัลชีท

4) การใช้พลังงานไฟฟ้า ได้แก่ 4.1) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง จากการสำรวจการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร ประกอบด้วย หลอดฟลูออเรสเซนต์ และบัลลาสต์ชนิดหลอด (3X36W) จำนวนรวม 23 โคม หลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8 (3X18W) จำนวน 15 โคม หลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8 (1x18W) จำนวน 5 หลอด หลอดดาวน์ไลท์ LED กลม 12W จำนวน 4 หลอด และ 4.2) ระบบปรับอากาศ จากการสำรวจการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในอาคาร ประกอบด้วย เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) จำนวนรวม 16 เครื่อง รายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้ระบบปรับอากาศในอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

ประเภท	กำลังไฟฟ้า (W)	SEER (COP)	จำนวน (เครื่อง)
เครื่องปรับอากาศ Split Type 18,000 BTU	1,501	13.07 (3.55)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 18,000 BTU	1,632	13.07 (3.43)	2
เครื่องปรับอากาศ Split Type 18,000 BTU	1,440	12.24 (3.54)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 36,000 BTU	3,438	10.73 (3.15)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 38,000 BTU	3,600	9.5 (2.87)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 40,300 BTU	4,913	9.5 (2.87)	2
เครื่องปรับอากาศ Split Type 40,900 BTU	4,080	10.03 (2.94)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 48,000 BTU	4,610	10.7 (2.97)	2
เครื่องปรับอากาศ Split Type 48,200 BTU	4,913	10.5 (2.87)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 55,000 BTU	5,730	9.5 (2.5)	1
เครื่องปรับอากาศ Split Type 60,000 BTU	5,636	9.5 (2.5)	3

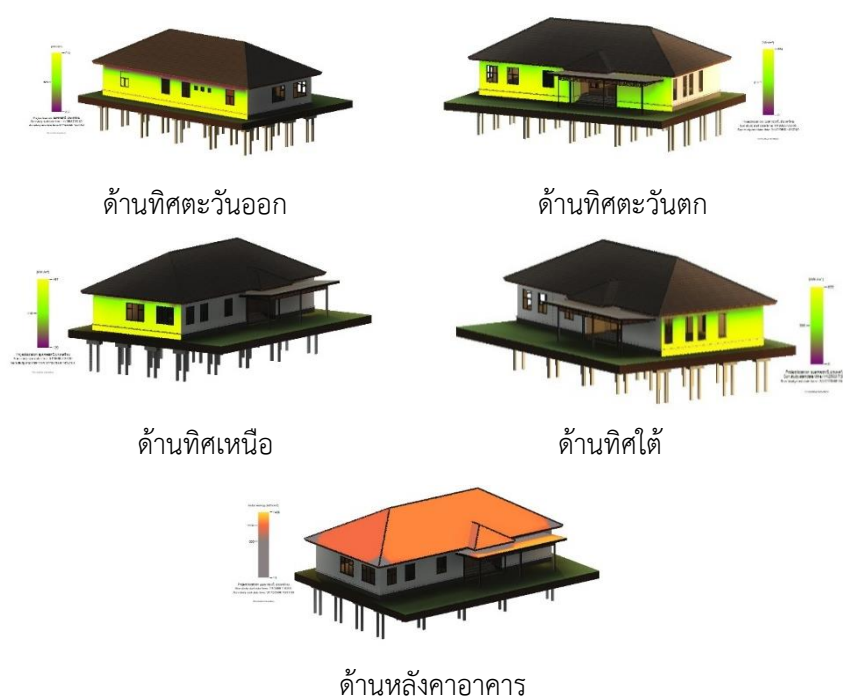
4.3) อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ จากการสำรวจการใช้พลังงานในอาคาร ประกอบด้วยเครื่องใช้ไฟฟ้าสำนักงานหลายชนิด ได้แก่ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ 100 W จำนวน 2 เครื่อง คอมพิวเตอร์พกพา 40 W จำนวน 3 เครื่อง คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ 60 W จำนวน 2 เครื่อง เครื่องปริ้นเตอร์ 60 W จำนวน 1 เครื่อง ตู้เย็น 82 W จำนวน 1 เครื่อง ทีวี 55 W จำนวน 5 เครื่อง ทีวี 32 W จำนวน 3 เครื่อง พัดลมระบายอากาศ 23 W จำนวน 3 เครื่อง เครื่องปั๊มน้ำ 500 W จำนวน 1 เครื่อง เครื่องทำน้ำอุ่น 4,500 W จำนวน 1 เครื่อง และพัดลม 49 W จำนวน 3 เครื่อง

7.2 ผลการศึกษาวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารก่อนและหลังการปรับปรุงเปลือกอาคารเดิมของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

7.2.1 การวิเคราะห์อาคารในสภาพเดิม

1) แบบจำลอง BIM ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Autodesk Revit แสดงรายละเอียดของอาคารในสภาพปัจจุบัน โดยข้อมูลที่ได้ถูกนำไปประเมินด้วยเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC พบว่า ค่า OTTV และ RTTV มีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ส่งผลให้ค่าใช้พลังงานรวม (kW.h/year) ของอาคารสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

2) โปรแกรม Autodesk Revit ที่ใช้พัฒนาแบบจำลองสารสนเทศอาคาร สามารถวิเคราะห์ค่าปริมาณการฉายรังสี ดวงอาทิตย์บนพื้นผิวที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่ง (Solar Analysis) และค่าพลังงานรวมของอาคารเครื่องส่งสัญญาณไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี ก่อนปรับปรุง เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบเปลือกอาคารตามแบบมาตรฐาน พบว่า ด้านทิศตะวันตก ซึ่งเป็นหน้าของอาคาร 277 kWh/m² ด้านทิศตะวันออก 506 kWh/m² ด้านทิศเหนือ 240 kWh/m² ด้านทิศใต้ 336 kWh/m² ด้านหลังคา 1,150 kWh/m² ด้านที่มีค่ารังสี ดวงอาทิตย์สูงสุด ได้แก่ ด้านหลังคา ด้านทิศตะวันออก ด้านทิศใต้ ด้านทิศตะวันตกและด้านทิศเหนือ ตามลำดับ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ค่าปริมาณการฉายรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นผิวที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่ง (Solar Analysis)

และค่าพลังงานรวมของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

ก่อนปรับปรุงด้วยโปรแกรม Autodesk Revit และโปรแกรม Insight

3) โปรแกรม BEC (Building Energy Code) V.2.6.0 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณด้านการใช้พลังงานของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน (Building Energy Code : BEC) เกณฑ์การผ่านการตรวจประเมินแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน มีอยู่ 6 ส่วน ดังนี้ 1) ระบบเปลือกอาคาร 2) ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง 3) ระบบปรับอากาศ 4) ระบบอุปกรณ์ผลิตน้ำร้อน 5) ระบบพลังงานหมุนเวียน และ 6) การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร หลักเกณฑ์การผ่านการตรวจประเมินแบบอาคารให้พิจารณาจากเกณฑ์การออกแบบแบ่งการผ่านเกณฑ์เป็น 2 ทางเลือก โดยพิจารณาจากทางเลือกที่ 1 คือ การผ่านเกณฑ์ทุกระบบ หากผลการตรวจประเมินผ่านทุกระบบ ทางเลือกที่ 2 คือ การผ่านเกณฑ์การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารต่อปี โดยนำค่าการใช้พลังงานโดยรวมของอาคารที่ออกแบบมาเปรียบเทียบกับค่า การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารอ้างอิงตามกฎหมายกระทรวง ถ้ามีค่าต่ำกว่าจึงถือว่าเป็นการผ่านเกณฑ์การออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานเช่นกัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานโดยรวมก่อนปรับปรุง ที่ได้จากเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC V.2.6.0 ประมวลผลออกมา

รายละเอียด	เกณฑ์มาตรฐาน	อาคารตามทีออกแบบ	ผลประเมิน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV, W/m ²)	≤ 50.00	45.73	ผ่าน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV, W/m ²)	≤ 10.00	52.95	ไม่ผ่าน
ค่ากำลังไฟส่องสว่างสูงสุด (LPD, W/m ²)	≤ 10.00	20.67	ไม่ผ่าน
ค่าประสิทธิภาพพลังงานตามฤดูกาล (SEER, BTU/W·h)	≥ 12.40	9.50	ไม่ผ่าน
การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร (kW.h/year)	≤ 35,779.27	54,227.76	ไม่ผ่าน

7.2.2 การปรับปรุงเปลือกอาคารและการสร้างแบบจำลองใหม่

จากการวิเคราะห์ผลด้านพลังงานจากแบบจำลองสารสนเทศอาคาร กรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณการฉายรังสี ดวงอาทิตย์ และค่าพลังงานรวม จากการใช้โปรแกรม Solar Analysis Autodesk Insight และ เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงเปลือกอาคาร พบว่า 1) ทิศของอาคารที่ทำให้เกิดค่าปริมาณการฉายรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุดและน้อยที่สุดของแต่ละด้านของอาคารที่ทำการวิเคราะห์ และ 2) เปรียบเทียบค่าปริมาณการฉายรังสี ดวงอาทิตย์ ที่ส่งผลกับเปลือกอาคารทิศที่สูงที่สุด ไปทิศของอาคารที่น้อยที่สุดในแต่ละด้าน เมื่อได้ทิศที่ทำให้เกิดค่าปริมาณการสะสมรังสี ดวงอาทิตย์สูงสุดแล้วจึงนำทิศของอาคารนั้นมาวิเคราะห์ผลด้านพลังงาน จากรังสีดวงอาทิตย์ที่กระทำกับด้านต่างๆของอาคาร ในทิศทางที่ทำให้เกิดค่าปริมาณการฉายรังสี ดวงอาทิตย์สูงสุดเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุง และทำการปรับปรุงวัสดุเปลือกอาคารพร้อมทั้งทำการประมาณ ราคาการปรับปรุงวัสดุเปรียบเทียบกับค่าพลังงาน OTTV, RTTV, LPD ค่าพลังงานรวมที่ได้จากการคำนวณจากเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC V.2.6.0 ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง ดังตารางที่ 3

แนวทางการปรับปรุงเปลือกอาคารที่เหมาะสมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงและได้ทางเลือกที่ตรงตามผลการวิเคราะห์ เสนอการปรับปรุงวัสดุเปลือกอาคารเพียง 1 ด้านที่มีการสะสมรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุดคือด้านหลังคาที่มีค่าสะสมพลังงานสูง 1,150 kWh/m² ค่า RTTV สูงเกินมาตรฐาน 52.95 W/m²ปรับปรุง หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ที่ใช้บัลลาสต์แบบขดลวด 23 โคม ที่มีค่า LPD สูงเกินมาตรฐาน 20.67 W/m²ที่จะทำให้สามารถลดการใช้พลังงานรวมจาก 54,227.76 kW.h/year คือ แนวทางที่ 1 ปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่าง และปรับปรุงวัสดุหลังคาทึบแสง ทำการปรับปรุงแก้ไข โคมหลอดฟลูออเรสเซนต์ และบัลลาสต์ขดลวด (3x36W) เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8 (3x18W) สามารถลดค่า LPD จากเดิม 20.67 W/m²เหลือ 7.72 W/m² และสวิตช์หลังคา จากเดิมกระเบื้องหลังคาลอนคู่ ฝิวสีเข้ม เป็นกระเบื้องหลังคาลอนคู่

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าปริมาณการฉายรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร

เครื่องมือที่ใช้	ค่าเปลือกอาคารแต่ละด้าน (kWh/m ²)/OTTV(W/m ²)				ค่าเปลือกหลังคา (kWh/m ²)/RT TV(W/m ²)	ค่า LPD (W/m ²)	ค่าพลังงานรวม (kWh/m ²)
Solar Analysis	N 240	S 336	E 506	W 277	1,150	-	-
Autodesk Insight			-		-	-	101.35
BEC V2.6.0			45.73		52.95 *	20.67 *	54,227.76 *

หมายเหตุ: * หมายถึง ผลการประเมินที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2564

ผิวสีอ่อน โดยใช้วิธีการหาสีหลังคา ซึ่งเป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคา จาก 0.9 เหลือ 0.5 ผลการปรับปรุง พบว่า สามารถลดค่า RTTV จากเดิม 52.95 W/m² เหลือ 31.71 W/m² ถึงแม้แนวทางนี้จะสามารถลดค่า RTTV ลงได้ จากค่าพลังงานรวม 54,227.76 kW.h/year เป็น 39,551.88 kW.h/year แต่ยังคงไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน คิดเป็นค่าพลังงานรวมลดลง ร้อยละ 27.06 และแนวทางที่ 2 ปรับปรุงอุปกรณ์ไฟฟ้าส่องสว่าง และปรับปรุงวัสดุหลังคาที่บดแสง ทำการปรับปรุงแก้ไข โคมหลอดฟลูออเรสเซนต์ และบัลลาสต์ชนิดหลอด (3x36W) เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์ LED T8 (3x18W) สามารถลดค่า LPD จากเดิม 20.67 W/m² เหลือ 7.72 W/m² สีวัสดุหลังคา จากเดิมกระเบื้องหลังคาลอนคู่ ผิวสีเข้ม (สีน้ำตาล) เป็นกระเบื้องหลังคาลอนคู่ ผิวสีอ่อน ทำการติดตั้งฉนวนใยแก้วที่ได้รับฉลากประสิทธิภาพสูง Stay Cool หนา 3 นิ้ว Premium บนแผ่นยิปซัมชนิดธรรมดา หนา 9 มม. ผลการปรับปรุง พบว่า สามารถลดค่า RTTV ได้จากเดิม 52.95 W/m² เหลือ 7.86 W/m² เป็นผลทำให้ค่าพลังงานรวมของอาคารจาก 54,227.76 kW.h/year เป็น 35,550.97 kW.h/year ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน คิดเป็นค่าพลังงานรวมลดลง ร้อยละ 34.44 สรุปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อาคารศึกษาการปรับปรุงหนึ่งด้านที่มีการสะสมรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุด

อาคารศึกษาการปรับปรุงหนึ่งด้านที่มีการสะสมรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุด	แนวทางการปรับปรุงที่	แนวทางการปรับปรุง		
		ปรับปรุงสีหลังคาจากสีเข้มเป็นสีอ่อน	ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด+ ใสฉนวนใยแก้ว Stay cool 3 นิ้ว	หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบบัลลาสต์ชนิดหลอด 3x36 W เปลี่ยนเป็น (LED T8 3x18 W)
	1	✓	x	✓
	2	✓	✓	✓

7.2.3 การวิเคราะห์พลังงานของอาคารหลังการปรับปรุง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC หลังการปรับปรุงอาคาร พบว่า การใช้พลังงานรวมของอาคาร (kW.h/year) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับอาคารเดิม โดยเฉพาะในส่วนของระบบปรับอากาศซึ่งเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานที่สูงที่สุดของอาคาร ดังตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5 สรุปรายงานผลวิเคราะห์ Passed

รายละเอียด	เกณฑ์มาตรฐาน	อาคารตามที่ ออกแบบ	ผลประเมิน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (OTTV, W/m ²)	≤ 50.00	45.73	ผ่าน
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV, W/m ²)	≤ 10.00	7.86	ผ่าน
ค่ากำลังไฟส่องสว่างสูงสุด (LPD, W/m ²)	≤ 10.00	7.72	ผ่าน
ค่าประสิทธิภาพพลังงานตามฤดูกาล (SEER BTU/W·h)	≥ 12.40	9.50	ไม่ผ่าน
การใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร (kW.h/year)	≤ 35,779.27	35,550.97	ผ่าน

ตารางที่ 6 แนวทางการปรับปรุงการใช้พลังงานที่ลดลง

แนวทางการปรับปรุง	ค่าพลังงานรวมต่อปี	ค่าพลังงานที่ ลดลง	ค่าการใช้พลังงานที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)
Base case	54,227.76	-	-
1	39,551.88	14,675.88*	27.06
2	35,550.97	18,676.79*	34.44

หมายเหตุ: * หมายถึง ค่าหน่วยพลังงานรวมต่อปี(Base case)ลบด้วยค่าพลังงานรวมต่อปีที่ลดลงตามแนวทางการปรับปรุง 1,2

7.2.4 การวิเคราะห์การลดค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานของอาคาร

จากวิเคราะห์การลดค่าใช้จ่ายการใช้พลังงานของอาคาร พบว่า อัตราการลดลงของการใช้พลังงานในภาพรวมของอาคารลดลง ร้อยละ 34.44 ต่อปี ค่า OTTV และ RTTV ลดลงจนใกล้เคียงหรือเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงานBEC เงินลงทุนที่ใช้ในการปรับปรุง 168,830 บาท โดยทำให้ประหยัดเงินค่าพลังงานลงได้ 78,629.28 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 1 เดือน 5 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนวัสดุกับผลประโยชน์ค่าพลังงานระยะยาวมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบการลดค่าใช้จ่ายการใช้พลังงานรายปีและระยะเวลาคืนทุน

แนวทางการปรับปรุง	ค่าพลังงานรวม kW.h/m ² /year	เงินลงทุนที่ใช้ปรับปรุงอาคารทุกด้าน(บาท)	ค่าพลังงานที่ลดลงคูณค่าไฟฟ้า(บาท/ปี)	ระยะเวลาคืนทุน(ปี)
Base case	54,227.76	-	-	-
1	39,551.88	60,000	61,785.45*	0.97
2	35,550.97	168,830	78,629.28*	2.15

หมายเหตุ: * หมายถึง ค่าหน่วยพลังงานที่ลดลงคูณอัตราค่าไฟฟ้า 4.21 บาทต่อหน่วย

8. การอภิปรายผล

8.1 การใช้พลังงานของอาคารในสภาพเดิมของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี พบว่า ค่า OTTV และ RTTV ของอาคารสูงกว่ามาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ส่งผลให้การใช้พลังงานรวม

ของอาคารสูง การค้นพบนี้สอดคล้องกับแนวคิดทฤษฎีที่ว่าเปลือกอาคารเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อภาระพลังงานของระบบปรับอากาศ อาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้สอดคล้องกับเกณฑ์การประหยัดพลังงานจึงมีแนวโน้มที่จะสิ้นเปลืองพลังงานสูง

8.2 การปรับปรุงเปลือกอาคารและผลการวิเคราะห์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนวัสดุผนังและหลังคา รวมทั้งเพิ่มฉนวนกันความร้อน ผลการวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC พบว่า ค่า OTTV และ RTTV ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้การใช้พลังงานรวมของอาคารลดลง โดยเฉพาะในระบบปรับอากาศที่เป็นปัจจัยหลักของการใช้พลังงาน ทำให้ลดการใช้พลังงานรวมจาก 54,227.76 kW.h/year ลดลงเป็นพลังงานรวม 35,550.97 kW.h/year คิดเป็นร้อยละ 34.44 ต่อปี ค่า OTTV และ RTTV ลดลงจนใกล้เคียงหรือเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน BEC เงินลงทุนที่ใช้ในการปรับปรุง 168,830 บาท โดยทำให้ประหยัดเงินค่าพลังงานลงได้ 78,629.28 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 1 เดือน 5 วัน ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าการใช้ BIM และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทดสอบแนวทางการปรับปรุงอาคารก่อนการดำเนินการจริง อย่างไรก็ตาม สามารถเติมเต็มช่องว่างงานวิจัย (Research Gap) ได้จากองค์ความรู้ใหม่ ๆ ที่ยังไม่มีการศึกษาในกรณีศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณโทรทัศน์ในการปรับปรุงในอาคารสื่อสารที่มีข้อจำกัดด้านโครงสร้างและการใช้งาน เช่น ระบบปรับอากาศและอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้พลังงานสูง พื้นที่ใช้งานที่ไม่เหมือนอาคารสำนักงานทั่วไป อีกทั้งเป็นการบูรณาการร่วมกันระหว่างแนวคิด BIM และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ทำให้ โดยเฉพาะการจำลองพลังงานรวมกับการจัดการข้อมูลอาคารในระยะยาว สามารถวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารเครื่องส่งสัญญาณ สถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี

9. สรุป

9.1 ผลการวิจัยรูปแบบและคุณสมบัติของเปลือกอาคารเดิม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอาคารเครื่องส่งสัญญาณสถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานีพบว่าอาคารชั้นเดียวโดยมีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 287.78 m² มีอายุการใช้งานมากกว่า 15 ปี

9.2 ผลการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า อาคารในสภาพเดิมมีค่า OTTV และ RTTV สูงกว่ามาตรฐานอาคารด้านพลังงาน ส่งผลให้การใช้พลังงานรวมของอาคารสูงสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน พบว่า การปรับปรุงเปลือกอาคารด้วยการเลือกวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ U-value และการเพิ่มฉนวนกัน ความร้อน สามารถลดค่า OTTV และ RTTV ได้อย่างชัดเจน ทำให้การใช้พลังงานรวมของอาคารลดลง โดยใช้เทคโนโลยี BIM ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ในการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการใช้พลังงานได้อย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าแนวทางดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยประหยัดพลังงาน แต่ยังสนับสนุนการออกแบบและปรับปรุงอาคารให้สอดคล้องกับมาตรฐานพลังงานและเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs)

9.3 ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการปรับปรุงเปลือกอาคารที่เหมาะสมเป็นทางเลือกที่ตรงตามผลการวิเคราะห์ เสนอการปรับปรุงวัสดุเปลือกอาคารเพียง 1 ด้านที่มีการสะสมรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุด คือ ด้านหลังคาที่มีค่าสะสมพลังงานสูง 1,150 kWh/m² ค่า RTTV สูง เกินมาตรฐาน 52.95 W/m² ปรับปรุง หลอดไฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แบบขดลวด 23 โคม ที่มีค่า LPD สูงเกินมาตรฐาน 20.67 W/m² ที่จะทำให้สามารถลดการใช้พลังงานรวมจาก 54,227.76 kW.h/year ลงเป็นพลังงานรวม 35,550.97 kW.h/year คิดเป็นร้อยละ 34.44 ต่อปี ค่า OTTV และ RTTV ลดลงจนใกล้เคียงหรือเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน BEC เงินลงทุนที่ใช้ในการปรับปรุง 168,830 บาท โดยทำให้ประหยัดเงินค่าพลังงานลงได้ 78,629.28 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 1 เดือน 5 วัน

10. ข้อเสนอแนะ

10.1 ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในอาคารประเภทอื่น เช่น อาคารเรียน อาคารสำนักงานขนาดใหญ่ หรืออาคารพักอาศัยหลายชั้น เพื่อขยายผลการวิจัยให้ครอบคลุม
2. ควรพัฒนาโมเดล BIM ร่วมกับเทคโนโลยีการจำลองขั้นสูง เช่น Digital Twin เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการคาดการณ์ผลลัพธ์การใช้พลังงาน

10.2 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

1. หน่วยงานที่มีอาคารเก่าควรนำแนวทางการปรับปรุงเปลือกอาคารด้วย BIM และ เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ไปปรับใช้จริง เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานและยืดอายุการใช้งานอาคาร
2. การใช้ BIM ควรถูกรับรู้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการออกแบบและปรับปรุงอาคารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของสถาปนิก วิศวกร และผู้บริหารโครงการ

10.3 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

1. ภาครัฐควรส่งเสริมให้มีการใช้ BIM และเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่ออนุรักษ์พลังงาน BEC ในการออกแบบและปรับปรุงอาคารทุกประเภท โดยบรรจุเป็นข้อกำหนดในมาตรฐานอาคารด้านพลังงาน
2. ควรมีการสนับสนุนงบประมาณและสิทธิประโยชน์ทางภาษีแก่หน่วยงานหรือองค์กรที่ปรับปรุงอาคารให้สอดคล้องกับมาตรฐานการอนุรักษ์พลังงาน
3. ควรเชื่อมโยงการปรับปรุงอาคารกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) และยุทธศาสตร์ชาติ เพื่อสร้างแรงขับเคลื่อนเชิงนโยบายในระดับประเทศ

11. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิวัฒน์ สิ้นศิริ และอาจารย์ ดร.อภัย ชาภิรมย์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำในการทำวิจัยจนสำเร็จเสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมระบบ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ และบุคลากรของสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ท้ายสุดขอขอบคุณหัวหน้าส่วนงานวิศวกรรมและเพื่อนร่วมงานของสถานีโทรทัศน์ไทยพีบีเอส จังหวัดอุบลราชธานี ทุกท่านที่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] “กฎกระทรวงกำหนดประเภทหรือขนาดของอาคารและมาตรฐานหลักเกณฑ์และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2563,” *ราชกิจจานุเบกษา*, เล่ม 137, ตอนที่ 94 ก., หน้า 7-11. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/17150955.pdf>
- [2] Ministry of Energy, “Thailand 20-year energy efficiency development plan (2011-2030),” Ministry of Energy, 2011. Accessed: 30 Sep. 2025. [Online]. Available: https://www.eppo.go.th/images/POLICY/ENG/EEDP_Eng.pdf
- [3] สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์, “คู่มือปฏิบัติวิชาชีพ แนวทางการใช้งานแบบจำลองสารสนเทศอาคารสำหรับประเทศไทย (Thailand BIM Guideline) ฉบับปี พ.ศ. 2558,” สมาคมสถาปนิกสยาม ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2558. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://download.asa.or.th/03media/isa/bim/20150427-tbgv01.pdf>

- [4] มยุรฉัตร ฉัตรสุวรรณ, “การใช้และการจัดการข้อมูลในแบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรกายภาพอาคารชุด,” วิทยานิพนธ์ สด.ม., สถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2562. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/9762/>
- [5] ทูพลัส ซอฟท์. “Twoplus 7D BIM,” เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://www.twoplussoft.com/twoplus_7dbim
- [6] นันทพล มหาวัน, อภิชาติ บัวกล้า, ฤทธิ์หยุด ก้อนทอง, และนพรัตน์ เกตุขาว, “การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานด้วยการปรับปรุงกรอบอาคารกรณีศึกษา: อาคารที่อยู่อาศัย.” ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27 (NCCE 27)*, จังหวัดเชียงราย, 24–26 ส.ค. 2565, หน้า 1–10. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://conference.thaince.org/index.php/ncce27/article/view/1924>
- [7] ภนศา จันทรอุดม, “แนวทางการใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร (BIM) จัดการข้อมูลอาคารและแบบก่อสร้างจริงเพื่อการดำเนินงานและบำรุงรักษาอาคารสำนักงาน,” วิทยานิพนธ์ สด.ม., สถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2560. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: https://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5916030025_7680_9302.pdf
- [8] I. Czmocho and A. Pekala, "Traditional design versus BIM-based design," *Procedia Engineering*, vol. 91, pp. 210–215, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.048.
- [9] McGraw-Hill Construction, *The business value of BIM getting building information modeling to the bottom line*. NY, USA: McGraw-Hill Construction, 2009. Accessed: Sep. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/markets/Architect/building-information-modeling/SMR BIM 09 FINAL rev.pdf>
- [10] ศูนย์ประสานงานการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน, “คู่มือแนวทางปฏิบัติตามกฎหมายเกณฑ์มาตรฐานอาคารด้านพลังงาน,” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://2e-building.dede.go.th/sites/default/files/2023-01/guidelines-for-compliance-with-building-energy-code-bec-laws.pdf>
- [11] รอฮานา แวดอเลาะ และชนวัฒน์ เลขาพันธ์, “การใช้เทคโนโลยีแบบจำลองข้อมูลอาคารเรียน คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มทร.ศรีวิชัย: รายงานการวิจัย,” คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย, 2561. เข้าถึงเมื่อ: 30 ก.ย. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://riss.rmuts.ac.th/upload/doc /202010/5NTPmKW8eEQL08e1AZq9/5NTPmKW8eEQL08e1AZq9.pdf>
- [12] M. Nasrun Mohd Nawi, F. Baharum, M. Farizal Rajemi, J. Azhan Ibrahim and M. Zamhari Tahir, “Energy management: A case study on the Malaysian government office building,” *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 9 no.23, pp. 7865–7871, 2014, doi: 10.37622/000000.
- [13] S. Shetty, “Energy Conservation Building Code (ECBC) based optimum wall composition with respect to thermal transmittance and thickness city in temperate climatic zone of India, Manipal School of Architecture and Planning (MSAP),” In *1st International Conference on Optimization-Driven Architectural Design (OPTARCH 2019)*, *Procedia Manufacturing*, vol. 44, pp. 229–236, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.226.

- [14] ปรัชญา ปัตถาวงศ์ และวิทยา ยงเจริญ, “การศึกษารอบอาคารชุดและแนวทางการประหยัดพลังงาน,” *วารสารวิจัยพลังงาน*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 1, หน้า 25–37, ม.ค.-มิ.ย., 2557. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้:
<https://www.eri.chula.ac.th/eri-main/wp-content/uploads/2014/07/25-37edit.pdf>
- [15] วงศิยา อนุศักดิ์ากุล, “แนวทางการปรับปรุงอาคารสำนักงานภาครัฐในประเทศไทยให้เป็นอาคารที่ใช้พลังงานสุทธิเป็นศูนย์,” วิทยานิพนธ์ สด.ม., สถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม, 2559. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้:
<http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/898>
- [16] B. Ben Mahmoud, N. Lehoux, P. Blanchet, and C. Cloutier, “Barriers, strategies, and best practices for BIM adoption in quebec prefabrication Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs),” *Buildings*, vol.12, no.4, 2022, Art. no. 390, doi:10.3390/buildings12040390.
- [17] S. Siebelink, H. Voordijk, M. Endedijk, and A. Adriaanse, “Understanding barriers to BIM implementation: Their impact across organizational levels in relation to BIM maturity,” *Frontiers of Engineering Management*, vol. 8, no. 2, pp. 236–257, 2020, doi:10.1007/s42524-019-0088-2.
- [18] K. Zima, E. Plebankiewicz, and D. Wieczorek, “A SWOT analysis of the use of BIM technology in the polish construction industry,” *Buildings*, vol. 10, no. 1, 2020, Art. no. 16, doi: 10.3390/buildings 10010016.

การศึกษาอิทธิพลของคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์ลูกค้า
ที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ
The Study of the Influence of Logistics Service Quality and Customer
Relationship Management on Customer Engagement
in International Freight Forwarding Business

พุดพิพงษ์ ธนวีระกุล¹ และ นรินทร์ เนียมน้อย^{2*}

¹ภาควิชาการจัดการโลจิสติกส์, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

²ภาควิชาการจัดการธุรกิจระหว่างประเทศ, มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

Puthipong Thanaveerakul¹ and Narin Neamnoy^{2*}

¹Department of Logistic Management University of the Thai Chamber of Commerce

²Department of International Business Management University of the Thai Chamber of Commerce

Corresponding Author Email : Narin_nea@utcc.ac.th

Received 02 October 2025

Revised 16 February 2026

Accepted 20 February 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศในประเทศไทย โดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 ราย ซึ่งเป็นลูกค้าธุรกิจที่ใช้บริการรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติถดถอยเชิงพหุ ผลการวิจัยพบว่า คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าสามารถอธิบายความแปรปรวนของความผูกพันของลูกค้าได้ร้อยละ 49.3 ทั้งนี้ ตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ คุณภาพของกระบวนการ คุณภาพของผลลัพธ์ การมุ่งเน้นลูกค้า และเทคโนโลยีสารสนเทศ ตามลำดับ ในขณะที่คุณภาพความสามารถ ชีตความสามารถขององค์กร และการจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้าไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าผู้ประกอบการควรให้ความสำคัญกับการพัฒนากระบวนการให้บริการ การสร้างผลลัพธ์ที่มีคุณภาพ การสร้างวัฒนธรรมองค์กรที่มุ่งเน้นลูกค้า และการนำเทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ อันจะนำไปสู่การสร้างความผูกพันและความได้เปรียบทางการแข่งขันในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ ผลการวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการพัฒนากลยุทธ์บริการโลจิสติกส์ของไทย โดยให้ความสำคัญกับคุณภาพของการปฏิสัมพันธ์และประสบการณ์ในการรับบริการเพื่อความสำเร็จในระยะยาว

คำสำคัญ: ธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้า, การตลาดแบบธุรกิจต่อธุรกิจ, คุณภาพการบริการโลจิสติกส์, การบริหารความสัมพันธ์ลูกค้า, ความผูกพันของลูกค้า, การถดถอยเชิงพหุ

Abstract

This study aimed to examine the influence of logistics service quality and customer relationship management on customer engagement in the international freight forwarding business in Thailand. A quantitative research methodology was employed, collecting data through questionnaires from a sample of 400 business customers who used international freight forwarding services. The data were subsequently analyzed using multiple regression analysis. The findings revealed that logistics service quality and customer relationship management could explain 49.3% of the variance in customer engagement. Specifically, the variables with statistically significant influence included Process Quality, Outcome Quality, Customer Orientation, and Information Technology, respectively. Meanwhile, Capability Quality, Organizational Capability, and Customer Knowledge Management showed no significant influence. The results suggested that freight forwarding operators should prioritize developing service processes, creating quality outcomes, establishing a customer-centric organizational culture, and implementing information technology to enhance efficiency. These efforts would lead to building customer engagement and competitive advantage in the international freight forwarding business. This research contributed to the development of logistics service strategies in Thailand by emphasizing the quality of interactions and service experiences for long-term success.

Keywords: Freight Forwarding, Business-to-Business Marketing, Logistics Service Quality, Customer Relationship Management, Customer Engagement, Multiple Linear Regression

1. บทนำ

อุตสาหกรรมโลจิสติกส์มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย โดยมีส่วนร่วมต่อ GDP ถึงร้อยละ 13.4 และมีมูลค่าต้นทุนโลจิสติกส์กว่า 2.38 ล้านล้านบาท [1] ตลาดนี้คาดว่าจะเติบโตจาก 53.38 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2025 ไปสู่ 72.19 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2030 [2] อย่างไรก็ตาม จากดัชนี Logistics Performance Index (LPI) ที่วัดประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์ด้านการค้าระหว่างประเทศ โดยธนาคารโลก พบว่า ประเทศไทยอยู่อันดับที่ 34 ของโลกจาก 139 ประเทศทั่วโลก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ายังมีช่องว่างในการพัฒนาขีดความสามารถในการแข่งขัน [3] ประกอบกับความท้าทายจากต้นทุนที่เพิ่มขึ้นและการแข่งขันจากผู้ประกอบการต่างชาติ ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนผู้ให้บริการของลูกค้าอยู่ในระดับสูง [4] ในบริบทของธุรกิจบริหารจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ (Freight Forwarding) ลักษณะตลาดเป็นธุรกิจที่มุ่งเน้นให้บริการแบบธุรกิจต่อธุรกิจ (B2B) โดยกลุ่มลูกค้า B2B ครอบคลุมแบ่งตลาดมากกว่าร้อยละ 59 [5] โดยลักษณะเฉพาะของตลาด B2B คือกระบวนการตัดสินใจที่ซับซ้อน มีหลายฝ่ายร่วมพิจารณา และเน้นความสัมพันธ์ระยะยาว [6] ในบริบทนี้ ความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) จึงเป็นปัจจัยสำคัญเนื่องจากลูกค้าที่มีความผูกพันจะคงความสัมพันธ์ทางธุรกิจในระยะยาว ลดการพิจารณาผู้ให้บริการรายอื่น และยินดี

จ่ายค่าบริการในระดับที่สูงกว่า [7] นอกจากนี้ วิกฤต COVID-19 ยังส่งผลให้ลูกค้า B2B มีความคาดหวังสูงขึ้นในเรื่องการติดตามสินค้าแบบเรียลไทม์ การสื่อสารที่โปร่งใส และความยืดหยุ่นในการให้บริการ [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบช่องว่างของงานวิจัยที่สำคัญ 3 ประการ ดังนี้ ประการแรก งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาคุณภาพการบริการโลจิสติกส์ (LSQ) และการบริหารความสัมพันธ์ลูกค้า (CRM) แยกจากกัน โดยมุ่งเน้นผลลัพธ์ที่ความพึงพอใจหรือความภักดี [9, 10, 11] แต่ยังขาดการศึกษาเชิงบูรณาการที่พิจารณาอิทธิพลร่วมของทั้งสองตัวแปรที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า ซึ่งเป็นแนวคิดที่ครอบคลุมมิติทางอารมณ์และพฤติกรรมมากกว่าความพึงพอใจเพียงอย่างเดียว ประการที่สอง งานวิจัยด้าน LSQ และ CRM ส่วนใหญ่ดำเนินการในบริบทของประเทศพัฒนาแล้วหรือในอุตสาหกรรมอื่น เช่น ค้าปลีก การธนาคาร หรือโลจิสติกส์ทางอากาศ [12] แต่ยังมีงานวิจัยจำกัดในบริบทของธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะของการให้บริการที่แตกต่าง ประการที่สาม ในบริบทประเทศไทย แม้จะมีการศึกษาด้านโลจิสติกส์หลายชิ้น แต่ส่วนใหญ่เน้นที่ตลาด B2C หรือ E-commerce [13, 14] ขณะที่การศึกษาในตลาด B2B โดยเฉพาะธุรกิจ Freight Forwarding ที่มีมูลค่าสูงและความสัมพันธ์ระยะยาวยังมีอยู่น้อยมาก โดยงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาใน 2 มิติสำคัญ คือ (1) มิติเชิงแนวคิด: ศึกษาอิทธิพลร่วมของ LSQ และ CRM ต่อ Customer Engagement ในรูปแบบบูรณาการ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่มักศึกษาตัวแปรเดียวหรือมุ่งเน้นที่ความพึงพอใจเป็นตัวแปรตาม และ (2) มิติเชิงบริบท: เป็นการศึกษาในบริบทธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศของไทย ซึ่งเป็นตลาด B2B ที่มีลักษณะเฉพาะ ได้แก่ วงจรการตัดสินใจที่ยาวนาน ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างหลายฝ่าย และความคาดหวังด้านความน่าเชื่อถือที่สูง การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์ลูกค้าที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศในประเทศไทย ผลการวิจัยจะสร้างคุณค่าทั้งในเชิงทฤษฎี โดยขยายขอบเขตองค์ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยเชิงสาเหตุของความผูกพันลูกค้าในตลาด B2B และในเชิงปฏิบัติ โดยนำเสนอแนวทางให้ผู้ประกอบการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันท่ามกลางสภาวะตลาดที่ท้าทายในปัจจุบัน รวมถึงสนับสนุนเป้าหมายของรัฐบาลไทยในการพัฒนาประเทศให้เป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์ของภูมิภาค

2. ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ที่มุ่งศึกษาอิทธิพลของคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าที่ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศในประเทศไทย โดยมีการกำหนดขอบเขตและข้อจำกัดของการศึกษาที่ชัดเจนเพื่อให้การวิจัยมีความเป็นไปได้และมีประสิทธิภาพในการตอบคำถามวิจัย ประชากรของการศึกษานี้คือ ลูกค้าธุรกิจที่ใช้บริการธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ (Freight Forwarder) โดยกลุ่มตัวอย่างจะถูกเลือกโดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ที่ผู้วิจัยใช้ดุลยพินิจในการคัดเลือกหน่วยตัวอย่างที่มีคุณสมบัติเฉพาะและเหมาะสมกับวัตถุประสงค์การวิจัย เนื่องจากต้องการกลุ่มตัวอย่างที่มีประสบการณ์ที่เฉพาะเจาะจงในการใช้บริการและสามารถให้ข้อมูลที่มีคุณค่าเกี่ยวกับตัวแปรที่ศึกษา โดยกลุ่มตัวอย่างในการศึกษานี้คือ ลูกค้ากลุ่มธุรกิจที่ใช้บริการรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศในรอบ 6 เดือนที่ผ่านมา จำนวน 400 ตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติบนโปรแกรม IBM SPSS (version 30) ใช้เทคนิค Multiple Linear Regression Analysis เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และอิทธิพลของตัวแปรอิสระหลายตัว (มิติของคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์และมิติของการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า) ต่อตัวแปรตาม (ความผูกพันของลูกค้า)

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ (Logistics Service Quality: LSQ)

คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ เป็นแนวคิดที่ได้รับการพัฒนามาจากทฤษฎีคุณภาพการให้บริการ (Service Quality) จากงานวิจัยของ Parasuraman et al. [10], [15] เกี่ยวกับแนวคิด SERVQUAL ซึ่งระบุมิติของคุณภาพการให้บริการ 5 ด้าน ได้แก่ ความเป็นรูปธรรม (Tangibles) ความน่าเชื่อถือ (Reliability) การตอบสนอง (Responsiveness) การให้ความมั่นใจ (Assurance) และการให้ความเห็นใจ (Empathy) อย่างไรก็ตาม นักวิจัยต่อมาพบว่าแนวคิด SERVQUAL ดั้งเดิมไม่เพียงพอในการอธิบายลักษณะเฉพาะของบริการโลจิสติกส์ การศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์เริ่มต้นจากการตระหนักว่าการให้บริการด้านโลจิสติกส์มีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากบริการทั่วไป โดยเฉพาะในแง่ของความซับซ้อนของกระบวนการ ความเกี่ยวข้องของหลายฝ่าย และความสำคัญของการจัดการห่วงโซ่อุปทาน [16] คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ถูกนิยามโดย Mentzer et al. [16] ว่าหมายถึง "การรับรู้ของลูกค้าเกี่ยวกับประสิทธิผลของการจัดส่งสินค้าและบริการจากจุดกำเนิดไปยังจุดหมายปลายทาง" นิยามนี้เน้นย้ำถึงความสำคัญของมุมมองของลูกค้าในการประเมินคุณภาพบริการ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Service Quality ที่มองว่าคุณภาพของการบริการเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการรับรู้และความคาดหวังของลูกค้า Kilbarda et al. [9] ได้ให้นิยามว่า คือ "การรับรู้ของลูกค้าต่อคุณภาพของการที่ครอบคลุมทั้งกระบวนการการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ ตั้งแต่การวางแผน การดำเนินการ จนถึงการส่งมอบสินค้าและบริการหลังการขาย"

ในบริบทของตลาด Business-to-Business (B2B) คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์มีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากตลาด Business-to-Consumer (B2C) อย่างชัดเจน Mentzer et al. [16] ชี้ให้เห็นว่าในตลาด B2B ลูกค้ามีความคาดหวังที่สูงขึ้นเกี่ยวกับความสม่ำเสมอ ความน่าเชื่อถือ และการสร้างมูลค่าเพิ่มจากบริการโลจิสติกส์ นอกจากนี้ กระบวนการตัดสินใจในตลาด B2B มักเกี่ยวข้องกับหลายคนและใช้เวลานานกว่า ทำให้ความสัมพันธ์ระยะยาวและการสร้างความไว้วางใจมีความสำคัญมาก Mentzer et al. [16] เป็นผู้บุกเบิกในการพัฒนามาตรวัดคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ที่เฉพาะเจาะจง โดยเสนอแนวคิด LSQ ที่ประกอบด้วย 9 มิติ ได้แก่ การติดต่อสื่อสาร (Contact) คุณภาพของบุคลากร (Personnel Contact Quality) คุณภาพของการสั่งซื้อ (Order Quality) คุณภาพของข้อมูล (Information Quality) การจัดการข้อผิดพลาดในการสั่งซื้อ (Order Discrepancy Handling) ความตรงต่อเวลา (Timeliness) ความพร้อมใช้ของสินค้า (Availability) สภาพของสินค้า (Condition) และความถูกต้องของข้อมูล (Accuracy) ภายหลังจากงานวิจัยของ Mentzer et al. [16] นักวิจัยหลายคนได้พัฒนาและปรับปรุงแนวคิดเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์เพื่อให้เหมาะสมกับบริบทต่างๆ มากขึ้น จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ พบว่านักวิจัยได้เสนอกรอบแนวคิดที่หลากหลายในการจำแนกมิติและองค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ โดยหนึ่งในแนวคิดที่ได้รับการยอมรับและนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยสมัยใหม่คือ การจำแนกตามแนวทางของ Sohn et al. [17] ซึ่งได้พัฒนารอบความคิดที่ครอบคลุมและเป็นระบบมากยิ่งขึ้น

Sohn et al. [17] ได้เสนอมิติของคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์เป็น 3 ด้านหลัก ได้แก่ คุณภาพของผลลัพธ์ (Outcome Quality) คุณภาพของกระบวนการ (Process Quality) และ คุณภาพความสามารถ (Capability Quality) การจำแนกนี้สะท้อนถึงลักษณะพหุมิติของการให้บริการโลจิสติกส์ที่ไม่สามารถวัดได้จากมิติเดียว แต่ต้องพิจารณาทั้งผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น กระบวนการที่นำไปสู่ผลลัพธ์ และความสามารถพื้นฐานขององค์กรในการให้บริการ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ (LSQ)

มิติ	คำอธิบาย	ตัวชี้วัดสำคัญ
คุณภาพของผลลัพธ์ (Outcome Quality: OQ)	ผลสุดท้ายที่ลูกค้าได้รับจาก การใช้บริการ	1) ความตรงต่อเวลา; 2) ความถูกต้องแม่นยำ; 3) สภาพสินค้าสมบูรณ์; 4) การลดต้นทุนโลจิสติกส์; 5) ระยะเวลาขนส่งที่แน่นอน
คุณภาพของกระบวนการ (Process Quality: PQ)	การดำเนินงานและขั้นตอน ระหว่างการใช้บริการ	1) การจัดการและแก้ไขปัญหา; 2) การให้ข้อมูล สถานะจัดส่งแบบเรียลไทม์; 3) ความรวดเร็วและ ยืดหยุ่นในการตอบสนอง
คุณภาพความสามารถ (Capability Quality: CQ)	ศักยภาพและความ เชี่ยวชาญขององค์กร	1) ความสามารถในการจัดการคำสั่งซื้อ; 2) การนำ เทคโนโลยีสารสนเทศมาใช้; 3) ความเชี่ยวชาญ ด้านโลจิสติกส์ระหว่างประเทศ; 4) ความมั่นคงและ น่าเชื่อถือขององค์กร

ที่มา: ปรับปรุงจาก Sohn et al. [17]

3.2 การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationship Management: CRM)

การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationship Management: CRM) เป็นแนวคิดทางการจัดการที่ได้รับการพัฒนาและใช้กันอย่างแพร่หลายในธุรกิจสมัยใหม่ โดยเฉพาะในภาคธุรกิจบริการที่ความสัมพันธ์กับลูกค้ามีความสำคัญสูงต่อความสำเร็จของธุรกิจ โดยในยุคดิจิทัลและหลังวิกฤต COVID-19 แนวคิด CRM ได้วิวัฒนาการไปสู่การเป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับตัวของธุรกิจ [8], [18] ซึ่ง CRM ในยุคปัจจุบันถูกนิยามโดย Becker et al. [19] ว่า หมายถึง "กลยุทธ์ธุรกิจที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลและเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อสร้าง พัฒนา และรักษาความสัมพันธ์ที่มีคุณค่าและเป็นส่วนบุคคลกับลูกค้าผ่านการใช้ประโยชน์จาก AI, Machine Learning และ Big Data Analytics" นิยามนี้สะท้อนถึงการวิวัฒนาการของ CRM ที่ไม่เพียงแต่เน้นความสัมพันธ์ แต่ยังรวมถึงการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการเข้าใจและตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้อย่างแม่นยำและทันเวลา Payne and Frow [20] ยังได้เสนอมุมมองที่ครอบคลุมมากขึ้นโดยให้คำนิยาม CRM ว่าหมายถึง "ระบบนิเวศทางธุรกิจที่บูรณาการระหว่างเทคโนโลยี ข้อมูล กระบวนการ และบุคลากร เพื่อสร้างประสบการณ์ลูกค้าที่ไร้รอยต่อ (seamless customer experience) ข้ามทุกช่องทางและจุดสัมผัส" การมองในลักษณะระบบนิเวศนี้เน้นความสำคัญของการบูรณาการและการทำงานร่วมกันของทุกส่วนขององค์กรในการสร้างคุณค่าให้กับลูกค้า

ในบริบทของธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ Bednarski et al. [21] ชี้ให้เห็นว่า CRM มีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างมากในยุคปัจจุบัน เนื่องจากธุรกิจต้องปรับตัวเพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของลูกค้า การหยุดชะงักของห่วงโซ่อุปทานจากภัยสงคราม และความต้องการความโปร่งใสและการติดตามแบบเรียลไทม์ที่เพิ่มขึ้น โดยในการศึกษาของ Abdelhady and Mohamed [22] ได้เสนอกรอบการทำงานของ CRM สมัยใหม่ที่ประกอบด้วย การจัดการข้อมูลลูกค้าและการวิเคราะห์ (Customer Data Management และ Analytics) รวมถึงความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่หลากหลายทั้งข้อมูลที่มีโครงสร้าง (structured data) เช่น ประวัติการซื้อ และข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้าง (unstructured data) เช่น การสนทนาและความคิดเห็น เพื่อช่วยให้องค์กรสามารถคาดการณ์ความต้องการ ระบุโอกาสในการขายเพิ่ม (upselling) และป้องกันการสูญเสียลูกค้า (churn prediction) การสร้างประสบการณ์ที่เป็นส่วนบุคคล (Personalization Engine) อาจรวมถึงการแนะนำเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม การปรับราคาตามปริมาณการใช้บริการ หรือการให้คำปรึกษาเฉพาะด้านตามอุตสาหกรรมของลูกค้า

การใช้ CRM ในธุรกิจ B2B และโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์มีลักษณะเฉพาะที่ต้องการความเข้าใจและการจัดการที่แตกต่างจากธุรกิจ B2C โดย Amin et al. [23] ระบุลักษณะสำคัญของ B2B CRM ในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ ซึ่งต้องสามารถจัดการความสัมพันธ์กับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องและเข้าใจความต้องการที่แตกต่างกันของแต่ละฝ่าย ความต้องการความโปร่งใสสูงในการให้บริการ โดยเฉพาะข้อมูลเกี่ยวกับสถานะการขนส่ง ค่าใช้จ่าย และประสิทธิภาพการให้บริการ นอกจากนี้การศึกษาของ Yin and Sun [24] ชี้ให้เห็นว่า CRM ที่ประสบความสำเร็จในธุรกิจโลจิสติกส์ต้องสามารถช่วยในการระบุและพัฒนาโอกาสในการสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น การปรับปรุงประสิทธิภาพห่วงโซ่อุปทาน การลดต้นทุน หรือการเพิ่มความยืดหยุ่น การพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ กำลังเปลี่ยนแปลงภูมิทัศน์ของ CRM อย่างรวดเร็ว Kumar and Reinartz [25] ระบุเทคโนโลยีหลักที่จะมีผลกระทบต่อ CRM ในอนาคต การพัฒนาของ Conversational AI และ Advanced Chatbots การพัฒนาของ Large Language Models (LLMs) เช่น ChatGPT ทำให้ Chatbots สามารถจัดการกับคำถามที่ซับซ้อนและให้การตอบสนองที่เป็นธรรมชาติมากขึ้น การประยุกต์ใช้ในธุรกิจโลจิสติกส์ จึงสามารถช่วยในการตอบคำถามเกี่ยวกับสถานะการขนส่ง การคำนวณค่าใช้จ่าย และการให้คำปรึกษาเบื้องต้นได้ตลอด 24 ชั่วโมง

Soltani et al. [26] ซึ่งได้จำแนกการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าออกเป็น 4 องค์ประกอบสำคัญที่มีความเชื่อมโยงและเสริมกันในการสร้างความสำเร็จของระบบ CRM ในองค์กร กรอบแนวคิดนี้ให้ความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับธรรมชาติพหุมิติของ CRM ที่ไม่เพียงแต่เน้นด้านเทคโนโลยีเท่านั้น แต่ยังครอบคลุมถึงมิติทางกลยุทธ์ ความสามารถขององค์กร และการจัดการความรู้ โดยกรอบแนวคิดนี้ได้รับการสนับสนุนโดยงานวิจัยของ Kumar and Reinartz [25] ที่เน้นความสำคัญของการมองระบบ CRM ในแบบองค์รวมที่ครอบคลุมทั้งมิติทางกลยุทธ์ เทคโนโลยี และการจัดการองค์กร

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (CRM)

มิติ	คำอธิบาย	ตัวชี้วัดสำคัญ
การมุ่งเน้นลูกค้า (Customer Orientation: CO)	วัฒนธรรมองค์กรที่วางลูกค้าเป็นศูนย์กลาง	1) การทำความเข้าใจความต้องการลูกค้า; 2) การปรับตัวต่อความต้องการที่เปลี่ยนแปลง; 3) การสร้างความสัมพันธ์ระยะยาว; 4) การตอบสนองต่อข้อเสนอแนะ
ขีดความสามารถขององค์กร (Organizational Capability: OC)	ความสามารถในการนำ CRM มาใช้อย่างยั่งยืน	1) การสนับสนุนจากผู้บริหาร; 2) โครงสร้างองค์กรที่ยืดหยุ่น; 3) การพัฒนาทักษะพนักงาน; 4) การประสานงานข้ามฝ่าย
เทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology: IT)	เทคโนโลยีสนับสนุน CRM	1) Operational CRM (ระบบขาย/บริการ/การตลาด); 2) Analytical CRM (การวิเคราะห์ข้อมูล/AI); 3) Collaborative CRM (การทำงานร่วมกัน/Cloud)
การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (Customer Knowledge Management: CK)	การรวบรวมและเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับลูกค้า	1) Knowledge about Customer (ข้อมูลลูกค้า); 2) Knowledge from Customer (ข้อเสนอแนะ); 3) Knowledge for Customer (คู่มือ/คำแนะนำ)

ที่มา: ปรับปรุงจาก Soltani et al. [26] และ Kumar and Reinartz [25]

3.3 ความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement: CE)

ความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ได้กลายเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากในวงการการตลาดและการจัดการความสัมพันธ์กับลูกค้าในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยเฉพาะหลังจากการเกิดขึ้นของเทคโนโลยีดิจิทัลและการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของผู้บริโภคที่ต้องการมีส่วนร่วมมากขึ้นกับแบรนด์และองค์กร ความผูกพันของลูกค้าได้วิวัฒนาการจากการเป็นเพียงแนวคิดเสริมในการตลาดไปสู่การเป็นกลยุทธ์หลักในการสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันและการเติบโตอย่างยั่งยืนของธุรกิจ ซึ่ง Kumar and Pansari [7] ให้คำนิยามพื้นฐานของความผูกพันของลูกค้าว่า "การมีส่วนร่วมทางพฤติกรรมของลูกค้ากับองค์กรหรือแบรนด์ที่เกินกว่าการซื้อขาย" ซึ่งรวมถึงการให้ข้อเสนอแนะ การแนะนำผู้อื่น การป้องกันแบรนด์ และการเข้าร่วมในกิจกรรมต่างๆ ของแบรนด์ โดยในบริบทอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ Hohenstein [8] ชี้ให้เห็นว่า ความผูกพันของลูกค้าไม่เพียงแต่ช่วยในการรักษาลูกค้าเดิม แต่ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความยืดหยุ่นและการปรับตัวของห่วงโซ่อุปทาน โดยเฉพาะในช่วงวิกฤตและความไม่แน่นอน

Kumar et al. [27] เพิ่มเติมว่า ความผูกพันทางอารมณ์ของลูกค้า (emotional engagement) เป็นพื้นฐานสำคัญของความสัมพันธ์ระยะยาว เนื่องจากเมื่อลูกค้าเกิดความผูกพันทางอารมณ์แล้ว พวกเขามักจะมีความภักดีที่แข็งแกร่งและยากที่จะเปลี่ยนไปใช้บริการของคู่แข่ง ในบริบทของธุรกิจ B2B งานวิจัยของ Palmatier et al. [28] พบว่า ความผูกพันทางอารมณ์ของลูกค้ามักเกิดจากความไว้วางใจ ความน่าเชื่อถือ และการได้รับการดูแลเป็นพิเศษจากผู้ให้บริการ นอกจากนี้ความผูกพันของลูกค้ายังมีมิติทางด้านพฤติกรรม (Behavioral Engagement) เช่น การซื้อซ้ำ การแนะนำผู้อื่น การให้ข้อเสนอแนะ การเข้าร่วม กิจกรรม หรือการป้องกันองค์กรเมื่อมีคณวิพากษ์วิจารณ์ ซึ่ง van Doorn et al. [29] เสนอว่า ความผูกพันเชิงพฤติกรรม (behavioral engagement) เป็นมิติของความผูกพันที่สามารถสังเกตและวัดได้ง่ายที่สุด โดยการศึกษาของ Kumar and Pansari [7] พบว่าบริษัทที่มีระดับความผูกพันของลูกค้าสูงมีผลการดำเนินงานที่ดีกว่าในหลายด้าน รวมถึงอัตราการรักษาลูกค้าที่สูงขึ้น มีมูลค่าการซื้อต่อลูกค้าเพิ่มขึ้น มีการแนะนำลูกค้าใหม่เพิ่มขึ้น และความพึงพอใจโดยรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าลูกค้าที่มีความผูกพันสูงมีแนวโน้มที่จะให้อภัยเมื่อเกิดข้อผิดพลาดและยินดีที่จะลองใช้บริการใหม่ที่บริษัทเสนอ นอกจากนี้ Bone et al. [30] พบว่าความผูกพันของลูกค้ายังส่งผลต่อการลดต้นทุนการให้บริการ เนื่องจากลูกค้าที่มีความผูกพันสูงต้องการการดูแลน้อยกว่า มีการร้องเรียนน้อยกว่า และมีความร่วมมือในการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดขึ้น

ตารางที่ 3 มิติของความผูกพันของลูกค้า (CE)

มิติ	คำอธิบาย	ตัวชี้วัดสำคัญ
ความผูกพันทางอารมณ์ (Emotional Engagement)	ความรู้สึกผูกพัน ความไว้วางใจ และความภักดีต่อผู้ให้บริการ	1) ความรู้สึกเป็นส่วนหนึ่งกับผู้ให้บริการ; 2) ความไว้วางใจและความน่าเชื่อถือ; 3) การให้อภัยเมื่อเกิดข้อผิดพลาด
ความผูกพันเชิงพฤติกรรม (Behavioral Engagement)	การกระทำที่แสดงออกถึงความผูกพันที่เหนือกว่าการซื้อขายปกติ	1) การซื้อซ้ำอย่างต่อเนื่อง; 2) การแนะนำผู้อื่น (Word-of-Mouth); 3) การให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงบริการ; 4) การป้องกันแบรนด์เมื่อถูกวิพากษ์วิจารณ์

ที่มา: ปรับปรุงจาก Kumar et al. [27] และ van Doorn et al. [29]

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพการบริการโลจิสติกส์ (LSQ) และความผูกพันของลูกค้า (CE)

ความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างคุณภาพการบริการโลจิสติกส์ และความผูกพันของลูกค้า ถูกยืนยันโดย Rather and Hollebeek [31] ซึ่งพบว่าการบริการโลจิสติกส์ที่มีคุณภาพสูงสามารถสร้างความผูกพันทางอารมณ์และความผูกพันเชิงพฤติกรรมของลูกค้าผ่านการสร้างประสบการณ์ที่เหนือความคาดหว้ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotisarn and Phuthong [32] ที่พบว่าคุณภาพของข้อมูลและความตรงต่อเวลาในบริการโลจิสติกส์เป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความผูกพันทางความรู้ความเข้าใจของลูกค้า การศึกษาของ Lin et al. [33] ยังแสดงให้เห็นว่าการจัดส่งที่รวดเร็วและความยืดหยุ่นในการโลจิสติกส์ส่งผลต่อระดับความผูกพันของลูกค้าที่สูงขึ้นในธุรกิจอีคอมเมิร์ซ โดยพบว่าความยืดหยุ่นในการให้บริการโลจิสติกส์ช่วยเสริมสร้างความผูกพันของลูกค้าในตลาด B2B ผ่านการตอบสนองความต้องการที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ในการศึกษาของ Gil-Saura et al. [34] พบความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญระหว่างความเชื่อถือได้ของบริการโลจิสติกส์กับความผูกพันของลูกค้าในระยะยาว โดยความเชื่อถือได้ส่งผลต่อการสร้างความไว้วางใจซึ่งเป็นรากฐานสำคัญของความผูกพันทางอารมณ์ในธุรกิจโลจิสติกส์ ขณะที่ Murfield et al. [35] ชี้ให้เห็นว่าคุณภาพการบริการโลจิสติกส์แบบองค์รวมซึ่งรวมถึงการติดตามสินค้าแบบเรียลไทม์และการตอบสนองต่อคำร้องเรียนอย่างรวดเร็วมีผลต่อความผูกพันของลูกค้าในทุกช่องทาง Honora et al. [36] พัฒนาแนวคิดนี้เพิ่มเติมโดยพบว่าการจัดการข้อผิดพลาดที่มีประสิทธิภาพในบริการโลจิสติกส์ไม่เพียงแต่ช่วยรักษาความพึงพอใจ แต่ยังช่วยเพิ่มความผูกพันของลูกค้าผ่านการแสดงให้เห็นถึงความมุ่งมั่นในการแก้ไขปัญหา

Kilibarda et al. [37] ศึกษาเฉพาะในธุรกิจ freight forwarding และพบว่าคุณภาพของการติดต่อกับบุคลากรมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญกับความผูกพันทางอารมณ์ของลูกค้า โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ซับซ้อนที่ต้องการการประสานงานระหว่างหลายฝ่าย Becker et al. [19] สนับสนุนผลการวิจัยนี้โดยเสนอว่าความเชี่ยวชาญและความเข้าใจในธุรกิจของลูกค้าที่แสดงออกโดยพนักงานเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความผูกพันทางความรู้ความเข้าใจ ในขณะที่ Singh and Singh [38] พบว่าการบูรณาการเทคโนโลยีในการให้บริการโลจิสติกส์ เช่นระบบ AI และ IoT ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองและสร้างประสบการณ์ที่น่าประทับใจ ซึ่งส่งผลต่อความผูกพันเชิงพฤติกรรมของลูกค้า นอกจากนี้ Pathak et al. [39] ศึกษาในมิติของการสร้างมูลค่าร่วมกันและพบว่าคุณภาพการบริการโลจิสติกส์ที่ช่วยให้ลูกค้าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของห่วงโซ่อุปทานของตนเองส่งผลต่อความผูกพันในทุกมิติ โดยเฉพาะความผูกพันทางพฤติกรรมที่แสดงออกผ่านการแบ่งปันข้อมูลและการมีส่วนร่วมในการวางแผนร่วมกัน

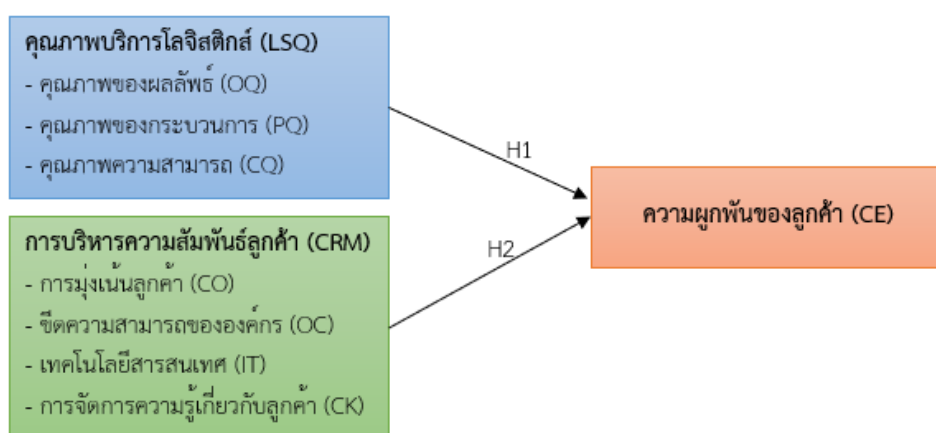
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (CRM) และความผูกพันของลูกค้า (CE)

การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (CRM) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความผูกพันของลูกค้า (CE) โดย Kumar and Reinartz [25] ได้เสนอว่า CRM สมัยใหม่ต้องเน้นการสร้างคุณค่าร่วมกันระหว่างองค์กรและลูกค้า ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มความผูกพันในทุกมิติ ขณะที่ Becker et al. [19] พบว่าการใช้ Customer Data Platform (CDP) ในระบบ CRM ช่วยให้องค์กรเข้าใจลูกค้าได้ลึกซึ้งมากขึ้น และสามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นการสร้างความผูกพันทางความรู้ความเข้าใจ นอกจากนี้ Ali and Shabn [40] กล่าวถึงประโยชน์หลักของการนำ CRM มาใช้ ได้แก่ การปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้า การรักษาลูกค้าเดิม การให้ข้อมูลเชิงกลยุทธ์ และการปรับปรุงมูลค่าตลอดชีวิตของลูกค้า ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการเพิ่มความผูกพันของลูกค้าในระยะยาว Steinhoff et al. [41] สนับสนุนประเด็นนี้โดยพบว่าระบบ CRM ที่มีความสามารถในการปรับแต่งบริการ (Personalization Engine) ช่วยสร้างประสบการณ์ที่เป็นเอกลักษณ์ให้กับลูกค้าแต่ละราย ซึ่งส่งผลต่อความผูกพันเชิงพฤติกรรมที่แสดงออกผ่านการซื้อซ้ำและการแนะนำผู้อื่น

Hohenstein [8] ศึกษาเฉพาะในบริบทของธุรกิจโลจิสติกส์และพบว่าระบบ CRM ที่มีประสิทธิภาพช่วยในการจัดการความคาดหวังของลูกค้าในช่วงวิกฤต COVID-19 โดยการให้ข้อมูลที่โปร่งใสและการสื่อสารที่สม่ำเสมอ ซึ่ง

ช่วยรักษาและเพิ่มความผูกพันของลูกค้าแม้ในสถานการณ์ที่ท้าทาย Chatterjee et al. [42] เสริมว่าการใช้เทคโนโลยี Real-time Communication ในระบบ CRM ช่วยให้ผู้ใช้บริการโลจิสติกส์สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้า B2B ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้การใช้เทคโนโลยี AI และ Machine Learning ในระบบ CRM ช่วยคาดการณ์ความต้องการของลูกค้าได้ล่วงหน้า ทำให้สามารถสร้างความประทับใจและความผูกพันที่เหนือความคาดหมาย

Binsaeed et al. [43] ชี้ให้เห็นว่าความซับซ้อนของการตัดสินใจในตลาด B2B ทำให้ระบบ CRM ต้องสามารถจัดการความสัมพันธ์กับหลายผู้มีส่วนได้เสีย ซึ่งเมื่อทำได้สำเร็จจะส่งผลต่อความผูกพันที่แข็งแกร่งและยั่งยืน ในขณะที่ Sore et al. [44] ศึกษาเฉพาะการสร้างมูลค่าร่วมกัน (Value Co-creation) ผ่านระบบ CRM ในธุรกิจโลจิสติกส์และพบว่าเมื่อลูกค้ามีส่วนร่วมในการออกแบบและปรับปรุงบริการ จะเกิดความผูกพันในทุกมิติ โดยเฉพาะความผูกพันทางความรู้ความเข้าใจที่แสดงออกผ่านการแบ่งปันความรู้และประสบการณ์



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดงานวิจัย

H1: คุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์ (Logistics Service Quality) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H1a: คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H1b: คุณภาพของกระบวนการ (PQ) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H1c: คุณภาพความสามารถ (CQ) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H2: การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (Customer Relationship Management) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H2a: การมุ่งเน้นลูกค้า (CO) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H2b: ชีตความสามารถขององค์กร (OC) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H2c: เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

H2d: การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement) ในธุรกิจ Freight Forwarder ในประเทศไทย

4. การดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเพื่อพัฒนารอบแนวคิดและสมมติฐานการวิจัย ตามแนวทางที่ Creswell and Creswell [45] เสนอไว้สำหรับการวิจัยเชิงปริมาณ จากนั้นได้ดำเนินการสร้างแบบสอบถาม (Questionnaire) ที่มีโครงสร้างแบบปิด (Structured Questionnaire) เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล แบบสอบถามจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม คำถามเกี่ยวกับคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์ คำถามเกี่ยวกับการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า และคำถามเกี่ยวกับความผูกพันของลูกค้า โดยใช้มาตรวัดแบบ Likert Scale 5 ระดับ ตั้งแต่ "ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง" จนถึง "เห็นด้วยอย่างยิ่ง" ตามที่ Sekaran and Bougie [46] แนะนำว่าเหมาะสมสำหรับการวิจัยในธุรกิจ การออกแบบคำถามจะอิงตามทฤษฎีและงานวิจัยที่ได้ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยมีอ้างอิงในงานวิจัยก่อนหน้า ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เครื่องมือวัดในงานวิจัยและแหล่งที่มา

ตัวแปร	ข้อคำถาม	แหล่งที่มา
คุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ (LSQ)		Sohn et al. [17]
- คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ)	10	
- คุณภาพของกระบวนการ (PQ)	9	
- คุณภาพความสามารถ (CQ)	9	
การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า (CRM)		Soltani et al. [26]
- การมุ่งเน้นลูกค้า (CO)	5	
- ชีตความสามารถขององค์กร (OC)	7	
- เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT)	4	
- การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK)	3	
ความผูกพันของลูกค้า (CE)		Kumar and Pansari
- ความผูกพันทางอารมณ์ (EE)	4	[7]
- ความผูกพันเชิงพฤติกรรม (BE)	4	

ข้อคำถามที่ใช้วัดตัวแปรในแบบสอบถามนี้ผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการโลจิสติกส์ ผู้เชี่ยวชาญด้านการตลาด B2B และผู้เชี่ยวชาญด้านระเบียบวิธีวิจัย โดยพิจารณาความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับนิยามเชิงปฏิบัติการ (Index of Item-Objective Congruence: IOC) ผลการประเมินพบว่าทุกข้อคำถามมีค่า IOC ระหว่าง 0.67–1.00 ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนด (≥ 0.50)

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเครื่องมือวิจัยกับกลุ่มตัวอย่างนำร่องก่อนดำเนินการเก็บข้อมูลจริง (Pilot Test) จำนวน 30 ราย ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาจริง ตามคำแนะนำของ Hair et al. [47] โดยในเบื้องต้นได้นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson Correlation) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างข้อคำถามแต่ละข้อของตัวแปรอิสระ (Independent Variables) กับตัวแปรตาม คือ ความผูกพันของลูกค้า (Customer Engagement: CE) ตามแนวทางของ Hair et al. [47] โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดกรองข้อคำถามที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวแปรตามก่อนนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป โดยข้อคำถามที่มีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ต่ำกว่า 0.30 ได้ถูกพิจารณาตัดออก เนื่องจากมีขนาดผลกระทบ (Effect Size) ต่ำเกินไปในทางปฏิบัติ แม้จะมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ก็ตาม ทั้งนี้เป็นไปตามแนวทางของ Hair et al. [47] ที่ระบุค่า r ต่ำกว่า 0.30 ถือว่ามีความสัมพันธ์ในระดับต่ำ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis: CFA) เพื่อตรวจสอบความตรงเชิงโครงสร้าง (Construct Validity) ของแบบสอบถาม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันว่าข้อคำถามแต่ละข้อมีความสัมพันธ์กับตัวแปรแฝง (Latent Variable) ที่ต้องการวัดอย่างแท้จริง ตามแนวทางของ Hair et al. [47] โดยข้อคำถามที่มีค่าน้ำหนักองค์ประกอบต่ำกว่าเกณฑ์ 0.5 จะถูกตัดออก

จากนั้นได้นำข้อคำถามที่ได้ปรับปรุงแล้วของแต่ละตัวแปรมาทดสอบค่าความเชื่อมั่น (Reliability) โดยผลการทดสอบพบว่า ค่า Cronbach's Alpha ระหว่าง 0.724 -- 0.864 ซึ่ง มีค่ามากกว่า 0.7 ตามที่ Nunnally and Bernstein [48] กำหนด ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าความเชื่อมั่น

ตัวแปร	จำนวนตัวชี้วัด	Cronbach's Alpha
คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ)	6	0.726
คุณภาพของกระบวนการ (PQ)	9	0.761
คุณภาพความสามารถ (CQ)	6	0.724
การมุ่งเน้นลูกค้า (CO)	5	0.864
ขีดความสามารถขององค์กร (OC)	3	0.781
เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT)	4	0.813
การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK)	3	0.845
ความผูกพันของลูกค้า (CE)	8	0.757

เนื่องจากการวิจัยนี้เก็บข้อมูลตัวแปรอิสระและตัวแปรตามจากแหล่งเดียวกัน (Single Source) ในเวลาเดียวกัน (Cross-sectional) จึงอาจเกิดปัญหา Common Method Bias (CMB) ซึ่งเป็นความแปรปรวนที่เกิดจากวิธีการวัดมากกว่าตัวแปรที่ศึกษา [48] ผู้วิจัยจึงดำเนินการตรวจสอบ CMB ทางสถิติด้วย Harman's Single-Factor Test โดยได้นำข้อคำถามทั้งหมด 44 ข้อ เข้าสู่การวิเคราะห์หองค์ประกอบเชิงสำรวจ (Exploratory Factor Analysis) โดยไม่หมุนแกน (Unrotated) และกำหนดให้สกัดเพียง 1 องค์ประกอบ ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบเดียวสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 31.24 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ร้อยละ 50 [47] แสดงว่าไม่พบปัญหา CMB ที่รุนแรงในชุดข้อมูล

ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถาม ผู้วิจัยใช้ช่องทางออนไลน์ผ่านแพลตฟอร์ม Google Forms โดยได้ติดต่อโดยตรงกับบริษัทผู้ให้บริการธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศเพื่อขอความร่วมมือในการส่งแบบสอบถามไปยังลูกค้าของพวกเขา โดยมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมจำนวน 370 ตัวอย่าง เพื่อให้ได้กลุ่มตัวอย่างทั้งสิ้น 400 ตัวอย่าง สำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมเมื่อไม่ทราบขนาดของจำนวนประชากรงานวิจัย [47] โดยผู้วิจัยใช้การวิเคราะห์สถิติถดถอยเชิงพหุ (Multiple Linear Regression Analysis) เพื่อทดสอบสมมติฐานการวิจัยและศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตาม ตามแนวทางของ Tabachnick and Fidell [49]

5. ผลการวิจัย

5.1 กลุ่มผู้ตอบแบบสอบถาม

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นของกลุ่มตัวอย่าง 400 ราย พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดเป็นผู้ใช้บริการผู้ให้บริการจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ (Freight Forwarder) โดยเป็นการใช้บริการเชิงพาณิชย์ คิดเป็นร้อยละ 100 ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างที่กำหนดไว้ พบว่าส่วนใหญ่เป็นกิจการประเภทการผลิต จำนวน 250 ราย (ร้อยละ 62.5) รองลงมาคือธุรกิจการเกษตร จำนวน 68 ราย (ร้อยละ 17) ธุรกิจค้าส่ง-ค้าปลีก 28 ราย (ร้อยละ 7) ธุรกิจบริการ 23 ราย (ร้อยละ 5.8) ธุรกิจพลังงาน จำนวน 12 ราย (ร้อยละ 3) และธุรกิจอื่นๆ 19 ราย (ร้อยละ 4.7) ตามลำดับ

ในด้านขนาดธุรกิจ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นธุรกิจขนาดใหญ่ (มากกว่า 100 คน) จำนวน 173 ราย คิดเป็นร้อยละ 43.3 รองลงมาคือธุรกิจขนาดกลาง (50-100 คน) จำนวน 150 ราย (ร้อยละ 37.5) และธุรกิจขนาดเล็ก (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 คน) จำนวน 77 ราย (ร้อยละ 19.3) สำหรับปริมาณการขนส่งเฉลี่ยต่อเดือน พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีการขนส่งมากกว่า 100 ครั้งต่อเดือน จำนวน 242 ราย คิดเป็นร้อยละ 60.5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความถี่ในการใช้บริการที่สูง ซึ่งมีความเหมาะสมในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพการให้บริการ การบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้า และความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจดังกล่าว

5.2 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา

เนื่องจากการวิจัยนี้ใช้มาตรวัดแบบ Likert Scale 5 ระดับ (1 = ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง ถึง 5 = เห็นด้วยอย่างยิ่ง) ผู้วิจัยจึงกำหนดเกณฑ์การแปลความหมายระดับค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีการแบ่งช่วงคะแนนเท่าๆ มีความกว้างของช่วงขึ้นเท่ากับ 0.8 (4.21 - 5.00 = สูงมาก, 3.41 - 4.20 = สูง, 2.61 - 3.40 = ปานกลาง, 1.81 - 2.60 = ต่ำ, และ 1.00 - 1.80 = ต่ำมาก)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (n = 400)

ตัวแปร	Mean	S.D.	Skewness	Kurtosis	ระดับ
คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ)	3.843	0.527	-0.654	0.208	สูง
คุณภาพของกระบวนการ (PQ)	3.878	0.580	-0.576	-0.155	สูง
คุณภาพความสามารถ (CQ)	3.707	0.473	-0.632	0.251	สูง
การมุ่งเน้นลูกค้า (CO)	3.849	0.624	-0.622	0.625	สูง
ขีดความสามารถขององค์กร (OC)	3.713	0.673	-0.364	-0.214	สูง
เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT)	3.888	0.605	-0.806	0.308	สูง
การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK)	3.941	0.719	-0.521	-0.437	สูง
ความผูกพันของลูกค้า (CE)	3.666	0.494	-1.101	1.763	สูง

ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรด้านคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์ทั้ง 3 มิติ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูง (3.41-4.20) ทั้งหมด โดย คุณภาพของกระบวนการ (PQ) มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในกลุ่มนี้ที่ 3.878 (S.D. = 0.580) แสดงให้เห็นว่าผู้ให้บริการประเมินคุณภาพของกระบวนการให้บริการในระดับสูง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงกว่าตัวแปรอื่นบ่งบอกถึงความแตกต่างของความเห็นในกลุ่มตัวอย่าง ตามมาด้วย คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ) มีค่าเฉลี่ย 3.843 (S.D. = 0.527) และ คุณภาพความสามารถ (CQ) มีค่าเฉลี่ย 3.707 (S.D. = 0.473) ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด แสดงว่าผู้ตอบมีความเห็นสอดคล้องกันมากที่สุดในมิตินี้

ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรด้านการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าทั้ง 4 มิติ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูง (3.41-4.20) ทั้งหมด โดย การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK) มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 3.941 (S.D. = 0.719) แต่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดเช่นกัน บ่งบอกว่าแม้จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูง แต่มีความแตกต่างของความเห็นในกลุ่มตัวอย่างค่อนข้างมาก ตามมาด้วย เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) มีค่าเฉลี่ย 3.888 (S.D. = 0.605) สะท้อนให้เห็นว่า ผู้ใช้บริการประเมินการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศในการให้บริการอยู่ในระดับสูง การมุ่งเน้นลูกค้า (CO) มีค่าเฉลี่ย 3.849 (S.D. = 0.624) แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้บริการรับรู้ว่าผู้ให้บริการมีการมุ่งเน้นลูกค้าในระดับสูง และ ชีตความสามารถขององค์กร (OC) มีค่าเฉลี่ย 3.713 (S.D. = 0.673) แสดงให้เห็นว่าผู้ใช้บริการมีความเชื่อมั่นในชีตความสามารถขององค์กร ผู้ให้บริการในระดับสูง

ผลการวิเคราะห์พบว่า ความผูกพันของลูกค้า (CE) มีค่าเฉลี่ย 3.666 (S.D. = 0.494) ซึ่งอยู่ในระดับสูงตามเกณฑ์ที่กำหนด (3.41-4.20) แม้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ต่ำที่สุดในบรรดาตัวแปรทั้งหมด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ (0.494) แสดงให้เห็นว่าผู้ตอบแบบสอบถามมีความเห็นค่อนข้างสอดคล้องกันเกี่ยวกับระดับความผูกพันที่มีต่อผู้ให้บริการ

ค่าความเบ้ (Skewness) ของทุกตัวแปรมีค่าติดลบ -1.101 ถึง -0.364 (เบ้ซ้าย) แสดงว่าผู้ตอบส่วนใหญ่ให้คะแนนสูงกว่าค่าเฉลี่ย ค่าอยู่ในช่วง ± 2 ถือว่ายอมรับได้ ในขณะที่ค่า Kurtosis อยู่ในช่วง -0.437 ถึง 1.763 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ ± 2 ถือว่าข้อมูลมีการแจกแจงใกล้เคียงปกติสามารถนำไปวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุได้ [50]

5.3 การทดสอบสมมติฐาน

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์สถิติถดถอยเชิงพหุ

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error				Tolerance	VIF
(Constant)	.704	.160		4.394	.000		
OQ → CE	.300	.044	.320	6.838	.000	.534	1.874
PQ → CE	.149	.055	.175	2.704	.007	.279	3.580
CQ → CE	.086	.056	.082	1.540	.124	.415	2.412
CO → CE	.109	.044	.138	2.469	.014	.376	2.662
OC → CE	.147	.042	.200	3.494	.001	.356	2.810
IT → CE	.043	.060	.052	.712	.477	.218	4.590
CK → CE	-.056	.037	-.082	-1.513	.131	.402	2.485

a. $R = 0.735$, $R^2 = 0.541$ และ Adjusted $R^2 = 0.533$

จากตารางที่ 7 ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบปัญหา Multicollinearity ก่อนดำเนินการตีความผลการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากค่า Tolerance และ Variance Inflation Factor (VIF) ผลการตรวจสอบพบว่าอิสระทั้ง 7 ตัว มีค่า Tolerance อยู่ระหว่าง 0.218-0.534 ซึ่งมากกว่า 0.10 และค่า VIF อยู่ระหว่าง 1.874-4.590 ซึ่งน้อยกว่า 10 ตามเกณฑ์ที่ Hair et al. [47] กำหนด แสดงว่าตัวแปรอิสระในโมเดลไม่มีปัญหาภาวะร่วมเส้นตรงพหุ (Multicollinearity) จึงสามารถนำผลการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้ในการแปลผลได้อย่างน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม ตัวแปรเทคโนโลยีสารสนเทศมีค่า VIF สูงสุดที่ 4.590 บ่งชี้ว่าอาจมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับตัวแปรอื่น แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ผลการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุแบบ Enter พบว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมในการอธิบายความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ โดยตัวแปรอิสระทั้ง 7 ตัวแปร สามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของความผูกพันของลูกค้าได้ และโมเดลมีความสมเหตุสมผลทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (Adjusted $R^2 = 0.533$)

สมมติฐานหลักที่ 1: อิทธิพลของคุณภาพการให้บริการด้านโลจิสติกส์ต่อความผูกพันของลูกค้า

ผลการทดสอบสมมติฐานหลักที่ 1 พบหลักฐานสนับสนุนบางส่วน ดังนี้

คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.320$, $t = 6.838$, $p < 0.001$) และมีค่าสัมประสิทธิ์มาตรฐานสูงสุดในบรรดาตัวแปรทั้งหมด ผลการวิจัยจึง ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H1a ได้ กล่าวคือ มีหลักฐานเชิงประจักษ์สนับสนุนว่าคุณภาพของผลลัพธ์ส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

คุณภาพของกระบวนการ (PQ) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.175$, $t = 2.704$, $p = 0.007$) ผลการวิจัยจึง ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H1b ได้ กล่าวคือ มีหลักฐานเชิงประจักษ์สนับสนุนว่าคุณภาพของกระบวนการส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

คุณภาพความสามารถ (CQ) ไม่มีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.082$, $t = 1.540$, $p = 0.124$) ผลการวิจัยจึง ปฏิเสธสมมติฐาน H1c กล่าวคือ ไม่พบหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เพียงพอในการสนับสนุนว่าคุณภาพความสามารถส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

สมมติฐานหลักที่ 2: อิทธิพลของการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้าต่อความผูกพันของลูกค้า

ผลการทดสอบสมมติฐานหลักที่ 2 พบหลักฐานสนับสนุนบางส่วน ดังนี้

การมุ่งเน้นลูกค้า (CO) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.138$, $t = 2.469$, $p = 0.014$) ผลการวิจัยจึง ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H2a ได้ กล่าวคือ มีหลักฐานเชิงประจักษ์สนับสนุนว่าการมุ่งเน้นลูกค้าส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

ขีดความสามารถขององค์กร (OC) มีอิทธิพลทางบวกต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.200$, $t = 3.494$, $p = 0.001$) ผลการวิจัยจึง ไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H2b ได้ กล่าวคือ มีหลักฐานเชิงประจักษ์สนับสนุนว่าขีดความสามารถขององค์กรส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) ไม่มีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = 0.052$, $t = 0.712$, $p = 0.477$) ผลการวิจัยจึง ปฏิเสธสมมติฐาน H2c กล่าวคือ ไม่พบหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เพียงพอในการสนับสนุนว่าเทคโนโลยีสารสนเทศส่งผลโดยตรงต่อความผูกพันของลูกค้า

การจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้า (CK) ไม่มีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\beta = -0.082$, $t = -1.513$, $p = 0.131$) ผลการวิจัยจึง ปฏิเสธสมมติฐาน H2d กล่าวคือ ไม่พบหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เพียงพอในการสนับสนุนว่าการจัดการความรู้เกี่ยวกับลูกค้าส่งผลต่อความผูกพันของลูกค้า

ตารางที่ 8 สรุปผลการทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐาน	ตัวแปร	β	t	Sig.	ผลการทดสอบ
H1a	OQ $\rightarrow$ CE	0.320	6.838	0.000	ไม่สามารถปฏิเสธได้
H1b	PQ $\rightarrow$ CE	0.175	2.704	0.007	ไม่สามารถปฏิเสธได้
H1c	CQ $\rightarrow$ CE	0.082	1.540	0.124	ปฏิเสธ
H2a	CO $\rightarrow$ CE	0.138	2.469	0.014	ไม่สามารถปฏิเสธได้
H2b	OC $\rightarrow$ CE	0.200	3.494	0.001	ไม่สามารถปฏิเสธได้

สมมติฐาน	ตัวแปร	β	t	Sig.	ผลการทดสอบ
H2c	IT $\rightarrow$ CE	0.052	0.712	0.477	ปฏิเสธ
H2d	CK $\rightarrow$ CE	-0.082	-1.513	0.131	ปฏิเสธ

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าทั้งคุณภาพการให้บริการโลจิสติกส์และการบริหารความสัมพันธ์กับลูกค้ามีบทบาทต่อความผูกพันของลูกค้าในธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศ โดยเฉพาะในมิติที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์ที่จับต้องได้ กระบวนการให้บริการ การมุ่งเน้นลูกค้า และขีดความสามารถขององค์กร ในขณะที่มิติด้านเทคนิค ได้แก่ คุณภาพความสามารถ เทคโนโลยีสารสนเทศ และการจัดการความรู้ ไม่พบหลักฐานเชิงประจักษ์ที่เพียงพอในการสนับสนุนอิทธิพลโดยตรงต่อความผูกพันของลูกค้า ผลการวิจัยพบว่า คุณภาพของผลลัพธ์ (OQ) และ คุณภาพของกระบวนการ (PQ) มีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Johnson and Park [36] ที่พบว่าการบริการโลจิสติกส์ที่มีคุณภาพสูงสามารถสร้างความผูกพันทางอารมณ์และพฤติกรรมผ่านประสบการณ์ที่เหนือความคาดหวัง รวมถึงงานวิจัยของ Lin et al. [33] ที่ยืนยันว่าความตรงต่อเวลาและคุณภาพของข้อมูลเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความผูกพัน ผลการวิจัยยังสอดคล้องกับ Gil-Saura et al. [34] ที่พบความสัมพันธ์ระหว่างความเชื่อถือได้ของบริการกับความผูกพันระยะยาว

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่ คุณภาพความสามารถ (CQ) ที่ไม่ส่งผลโดยตรงต่อความผูกพัน สามารถอธิบายได้ว่า CQ เป็น "ปัจจัยพื้นฐาน" (Hygiene Factor) ที่ลูกค้าคาดหวังว่าผู้ให้บริการต้องมีอยู่แล้ว ตามแนวคิดของ Russo et al. [15] ที่ระบุว่าลูกค้า B2B มีความคาดหวังสูงเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือและความเชี่ยวชาญเป็นมาตรฐานขั้นต่ำ การมี CQ จึงไม่สร้างความประทับใจเพิ่มเติม แต่การไม่มีจะสร้างความไม่พอใจ ในขณะที่เทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) ที่ไม่ส่งผลโดยตรง สอดคล้องกับมุมมองของ Kumar and Reinartz [25] ที่เห็นว่าเทคโนโลยีเป็นเพียง "เครื่องมือสนับสนุน" ไม่ใช่ตัวสร้างความผูกพันโดยตรง IT อาจส่งผลทางอ้อมผ่านการเพิ่มประสิทธิภาพของ OQ และ PQ มากกว่าส่งผลต่อ CE โดยตรง นอกจากนี้ ในตลาด B2B ที่เน้นความสัมพันธ์ระยะยาว ลูกค้าอาจให้คุณค่ากับ "การปฏิสัมพันธ์กับบุคคล" มากกว่าเทคโนโลยี ตามที่ Singh and Singh [38] พบว่าคุณภาพการติดต่อกับบุคลากรมีความสำคัญในธุรกิจ Freight Forwarding นอกจากนี้ การจัดการความรู้ลูกค้า (CK) ที่ไม่ส่งผล อาจเป็นเพราะ CK เป็นกระบวนการภายในองค์กรที่ลูกค้าไม่ได้สัมผัสโดยตรง ตามกรอบของ Soltani et al. [26] CK เป็นการรวบรวมและจัดการความรู้ซึ่งลูกค้าจะรับรู้ผลลัพธ์ผ่าน CO และ OC มากกว่า นอกจากนี้ Pالماتier et al. [28] ชี้ว่าความผูกพันในธุรกิจ B2B เกิดจากความไว้วางใจและการได้รับการดูแลเป็นพิเศษ ซึ่งเป็นมิติที่จับต้องได้มากกว่าการจัดการความรู้

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

จากผลการวิจัยที่พบว่าตัวแปร 4 ตัวมีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ คุณภาพของผลลัพธ์ ขีดความสามารถขององค์กร คุณภาพของกระบวนการ และการมุ่งเน้นลูกค้า ตามลำดับ ผู้วิจัยได้นำผลการวิจัยไปสอบทวนกับผู้ประกอบการธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศจำนวน 5 ราย เพื่อยืนยันความเหมาะสมและความต้องการที่แท้จริงของภาคธุรกิจ ก่อนจัดทำข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาคุณภาพของผลลัพธ์ (Outcome Quality)

เนื่องจากคุณภาพของผลลัพธ์มีอิทธิพลสูงสุดต่อความผูกพันของลูกค้า ผู้ประกอบการควรให้ความสำคัญกับการพัฒนาความสามารถในการส่งมอบสินค้าตรงเวลา ถูกต้อง และสมบูรณ์ จากการสอบทวนกับ

ผู้ประกอบการ พบว่าลูกค้าธุรกิจให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับ การจัดส่งสินค้ามูลค่าสูง และ สินค้าที่มีกำหนดเวลา ชัดเจน เช่น ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือวัตถุดิบสำหรับสายการผลิต ซึ่งความผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อธุรกิจของลูกค้าอย่างมีนัยสำคัญ ผู้ประกอบการจึงยืนยันว่าการลงทุนในระบบควบคุมคุณภาพการจัดส่งและการประกันความเสียหายที่ครอบคลุม เป็นสิ่งที่ลูกค้าต้องการจริงและยินดีจ่ายค่าบริการเพิ่มเติม

2. การเสริมสร้างขีดความสามารถขององค์กร (Organizational Capability)

ผลการวิจัยพบว่าขีดความสามารถขององค์กรมีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้า จากการสอบถามกับผู้ประกอบการ พบว่าลูกค้า B2B ต้องการผู้ให้บริการที่มี ความยืดหยุ่นในการปรับตัว และ ความสามารถในการประสานงานข้ามฝ่าย โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่ซับซ้อน เช่น การเปลี่ยนแปลงกฎระเบียบศุลกากร หรือการปรับเปลี่ยนทางขนส่งกะทันหัน ผู้ประกอบการยืนยันว่าการพัฒนาทีมงานที่มีความเชี่ยวชาญหลากหลายและสามารถตัดสินใจได้รวดเร็ว เป็นปัจจัยที่ลูกค้าใช้ในการเลือกผู้ให้บริการระยะยาว

3. การพัฒนาคุณภาพของกระบวนการ (Process Quality)

คุณภาพของกระบวนการมีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้า จากการสอบถามกับผู้ประกอบการ พบว่าลูกค้าให้ความสำคัญเป็นพิเศษกับ ระบบการจัดการเหตุฉุกเฉิน และ การสื่อสารเชิงรุก เมื่อเกิดปัญหาระหว่างการขนส่ง ผู้ประกอบการระบุว่าลูกค้ามักไม่พอใจเมื่อต้อง "ตามถาม" สถานะสินค้าเอง แต่จะประทับใจหากได้รับการแจ้งเตือนล่วงหน้าเมื่อมีความล่าช้าหรือปัญหา พร้อมแนวทางแก้ไข ข้อเสนอแนะในการลงทุนระบบติดตามสถานะแบบเรียลไทม์และแพลตฟอร์มการสื่อสาร จึงตรงกับความต้องการที่ผู้ประกอบการยืนยัน

4. การสร้างวัฒนธรรมการมุ่งเน้นลูกค้า (Customer Orientation)

การมุ่งเน้นลูกค้ามีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้า จากการสอบถามกับผู้ประกอบการ พบว่าลูกค้า B2B ต้องการ ความสัมพันธ์ส่วนบุคคล กับทีมงานที่เข้าใจธุรกิจและความต้องการเฉพาะของตน ผู้ประกอบการยืนยันว่าลูกค้ามักให้คุณค่ากับการมี "ผู้จัดการบัญชี" (Account Manager) ที่รู้จักธุรกิจของลูกค้าเป็นอย่างดี มากกว่าการติดต่อผ่านระบบอัตโนมัติ การฝึกอบรมพนักงานให้มีทักษะในการสร้างความสัมพันธ์และความเข้าใจในอุตสาหกรรมของลูกค้า จึงเป็นข้อเสนอแนะที่สอดคล้องกับความต้องการจริง

5. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ

แม้ผลการวิจัยพบว่าเทคโนโลยีสารสนเทศ (IT) ไม่มีอิทธิพลโดยตรงต่อความผูกพันของลูกค้า แต่จากการสอบถามกับผู้ประกอบการ พบว่าเทคโนโลยียังคงมีความสำคัญในฐานะ เครื่องมือสนับสนุน การส่งมอบ OQ และ PQ ที่ดี ผู้ประกอบการระบุว่าลูกค้าไม่ได้ต้องการ "เทคโนโลยีล้ำสมัย" แต่ต้องการ "เทคโนโลยีที่ใช้งานได้จริงและเชื่อถือได้" ดังนั้น การลงทุนในเทคโนโลยีควรมุ่งเน้นที่การเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานและการสื่อสาร มากกว่าการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้เพียงเพื่อสร้างภาพลักษณ์

7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาโดยรวมตัวแปรอื่นๆ ที่อาจมีอิทธิพลต่อความผูกพันของลูกค้า เช่น ภาพลักษณ์ของผู้ให้บริการ นวัตกรรมบริการ หรือความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในธุรกิจโลจิสติกส์ การศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผู้ให้บริการขนาดต่างๆ หรือระหว่างประเทศในภูมิภาคอาเซียนจะให้ความเข้าใจที่ครอบคลุมมากขึ้น นอกจากนี้ การใช้วิธีการวิจัยแบบผสม (Mixed Methods) ที่รวมการวิจัยเชิงคุณภาพจะช่วยให้เข้าใจบริบทและเหตุผลเชิงลึกของพฤติกรรมลูกค้าได้ดีขึ้น การศึกษาระยะยาวเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของความผูกพันของลูกค้าตามเวลาและสถานการณ์ต่างๆ จะให้ข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการพัฒนากลยุทธ์ระยะยาว

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อาทิเช่น มหาวิทยาลัยและคณะที่ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้าและสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้ รวมทั้งอาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และการกำกับดูแลตลอดกระบวนการวิจัยอย่างใกล้ชิด

ขอขอบคุณบริษัทผู้ให้บริการธุรกิจรับจัดการขนส่งสินค้าระหว่างประเทศและลูกค้าทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถามและให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย โดยเฉพาะผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ที่อำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากลูกค้าของบริษัท

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานวิจัยและผู้ช่วยวิจัยที่ช่วยเหลือในการดำเนินงานต่างๆ ตั้งแต่การทบทวนวรรณกรรม การเก็บข้อมูล ไปจนถึงการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล รวมทั้งครอบครัวและเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนตลอดระยะเวลาการวิจัย

สุดท้าย หากงานวิจัยนี้มีข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยขอรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว และหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ของประเทศไทยและเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.), "รายงานโลจิสติกส์ของประเทศไทย ประจำปี 2565 (Thailand's Logistics Report 2022), สศช., 2566. [Online]. Available: <https://www.nesdc.go.th/wordpress/wp-content/uploads/2025/04/LogisticsReportTH.pdf>
- [2] Mordor Intelligence. "Thailand Freight and Logistics Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2026 - 2031)," *Mordor Intelligence*, 2025. Accessed: 9 Apr. 9, 2026. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/thailand-freight-and-logistics-market>
- [3] Department of International Trade Promotion (DITP), "Logistics Industry in Thailand," Ministry of Commerce, 2023. [Online]. Available: https://files-website.ditp.go.th/เจาะลึกตลาดโลก/12_Logistics_Industry_in_Thailand_6307e26e49.pdf
- [4] Krungsri Research Center. "Industry Outlook 2025-2027: Sea Freight Transport," Bank of Ayudhya, Bangkok, 2024. Accessed: Apr. 9, 2026. [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/logistics/sea-freight-transportation/io/sea-freight-transport-2025-2027>
- [5] Global Market Insights. "Freight Forwarding Market Size & Industry Analysis 2025-2034," Global Market Insights Inc., 2024. Accessed: Apr. 9, 2026. [Online]. Available: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/freight-forwarding-market>
- [6] P. Kotler, K. L. Keller, and A. Chernev, *Marketing Management*, 16th ed. Harlow, England: Pearson, 2022.
- [7] V. Kumar and A. Pansari, "Competitive advantage through engagement," *Journal of Marketing Research*, vol. 53, no. 4, pp. 497–514, Aug. 2016, doi: 10.1509/jmr.15.0044.

- [8] N. O. Hohenstein, "Supply chain risk management in the COVID-19 pandemic: Strategies and empirical lessons for improving global logistics service providers' performance," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 33, no. 4, pp. 1336–1365, Oct. 2022, doi: 10.1108/IJLM-02-2021-0109.
- [9] M. Kilibarda, S. Zecevic, and T. Vidovic, "Measuring the quality of logistics service as an element of the logistics provider offering," *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 23, no. 11–12, pp. 1345–1361, Aug. 2012, doi: 10.1080/14783363.2012.704279.
- [10] A. Parasuraman, V. A. Zeithaml, and L. L. Berry, "A conceptual model of service quality and its implications for future research," *Journal of Marketing*, vol. 49, no. 4, pp. 41–50, 1985, doi: 10.2307/1251430.
- [11] S. M. K. I. Shaon and H. Rahman, "A theoretical review of CRM effects on customer satisfaction and loyalty," *Central European Business Review*, vol. 4, no. 1, pp. 23–36, 2015, doi: 10.18267/j.cebr.116.
- [12] M. Kilibarda, M. Andrejic, and V. Popovic, "Research in logistics service quality: A systematic literature review," *Transport*, vol. 35, no. 2, pp. 224–235, 2020, doi: 10.3846/transport.2019.11388.
- [13] P. Tanaveerakul, T. Chuenyindee, and N. Yuduang, "Determining factor influencing consumer behavior during the Covid19 pandemic: Omicron variant," *NKRAFA J. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 110–125, Jul.–Dec. 2024. [Online]. Available: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/nkrafa-sct/article/view/253461>
- [14] N. Chotisarn and T. Phuthong, "Logistics service quality and customer behavior in cross-border e-commerce: a Thai consumer perspective," *Cogent Business & Management*, vol. 12, no. 1, 2025, Art. no. 2486581, doi: 10.1080/23311975.2025.2486581.
- [15] A. Parasuraman, V. A. Zeithaml, and L. L. Berry, "SERVQUAL: A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality," *Journal of Retailing*, vol. 64, no. 1, pp. 12–40, Jan. 1988. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/200827786_SERVQUAL_A_Multiple-item_Scale_for_Measuring_Consumer_Perceptions_of_Service_Quality
- [16] J. T. Mentzer, D. J. Flint, and T. M. Hult, "Logistics service quality as a segment-customized process," *Journal of Marketing*, vol. 65, no. 4, pp. 82–104, 2001, doi: 10.1509/jmkg.65.4.82.18390
- [17] J.-I. Sohn, S.-H. Woo, and T.-W. Kim, "Assessment of logistics service quality using the Kano model in a logistics-triadic relationship," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 28, no. 2, pp. 680–698, May 2017, doi: 10.1108/IJLM-09-2015-0172.
- [18] M. Hryhorak, N. Trushkina, T. Popkowski, and K. Molchanova, "Digital transformations of logistics customer service business models," *Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management*, vol. 1, pp. 57–75, May 2020, doi: 10.46783/smart-scm/2020-1-6.

- [19] J. U. Becker, G. Greve, and S. Albers, "The impact of technological and organizational implementation of CRM on customer acquisition, maintenance, and retention," *International Journal of Research in Marketing*, vol. 26, no. 3, pp. 207–215, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.ijresmar.2009.03.006.
- [20] A. Payne and P. Frow, "A strategic framework for customer relationship management," *Journal of Marketing*, vol. 69, no. 4, pp. 167–176, Oct. 2005, doi: 10.1509/jmkg.2005.69.4.167.
- [21] L. Bednarski, S. Roscoe, C. Blome, and M. C. Schleper, "Geopolitical disruptions in global supply chains: A state-of-the-art literature review," *Production Planning & Control*, vol. 36, no. 4, pp. 536–562, 2025, doi: 10.1080/09537287.2023.2286283.
- [22] M. G. Abdelhady and K. A. Mohamed, "Leveraging artificial intelligence for predictive customer churn modeling in telecommunications: A framework for enhanced customer relationship management," *Scientific Reports*, vol. 15, Dec. 2025, Art. no. 43826, doi: 10.1038/s41598-025-30108-z.
- [23] F. ul Amin et al., "The moderating effect of customer relationship on supply chain risk management and organization performance in logistics sector of Pakistan," *SAGE Open*, vol. 13, no. 1, pp. 1–22, Jan.–Mar. 2023, doi: 10.1177/21582440231164123.
- [24] J. Yin and L. Sun, "Digital logistics, supply chain finance, and supply chain efficiency," *Financial Research Letters*, vol. 85, Nov. 2025, Art. no. 108324, doi: 10.1016/j.frl.2025.108324.
- [25] V. Kumar and W. Reinartz, "Creating enduring customer value," *Journal of Marketing*, vol. 80, no. 6, pp. 36–68, Nov. 2016, doi: 10.1509/jm.15.0414.
- [26] Z. Soltani, N. Zareie, F. S. Milani, and F. F. Navimipour, "The impact of the customer relationship management on the organization performance," *Journal of High Technology Management Research*, vol. 29, no. 2, pp. 237–246, 2018, doi: 10.1016/j.hitech.2018.10.001.
- [27] V. Kumar, A. Aksoy, B. Donkers, R. Venkatesan, T. Wiesel, and S. Tillmanns, "Undervalued or overvalued customers: Capturing total customer engagement value," *Journal of Service Research*, vol. 13, no. 3, pp. 231–248, Aug. 2010, doi: 10.1177/1094670510375602.
- [28] R. W. Palmatier, M. B. Houston, R. P. Dant, and D. Grewal, "Relationship velocity: Toward a theory of relationship dynamics," *Journal of Marketing*, vol. 77, no. 1, pp. 13–30, Jan. 2013, doi: 10.1509/jm.11.0219.
- [29] J. van Doorn et al., "Customer engagement behavior: Theoretical foundations and research directions," *Journal of Service Research*, vol. 13, no. 3, pp. 253–226, 2010, doi: 10.1177/1094670510375599.
- [30] S. A. Bone, P. W. Fombelle, K. R. Ray, and K. N. Lemon, "How customer participation in B2B peer-to-peer problem-solving communities influences the need for traditional customer service," *Journal of Service Research*, vol. 18, no. 1, pp. 23–38, 2015, doi: 10.1177/1094670514537710.

- [31] R. Rather and L. D. Hollebeek, "Customers' service-related engagement, experience, and behavioral intent: Moderating role of age," *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 60, 2021, Art. no. 102453, doi: 10.1016/j.jretconser.2021.102453.
- [32] N. Chotisarn and T. Phuthong, "Logistics service quality and customer behavior in cross-border e-commerce: A thai consumer perspective," *Cogent Business & Management*, vol. 12, no. 1, 2025, Art. no. 2486581, doi: 10.1080/23311975.2025.2486581.
- [33] X. Lin, A. Al Mamun, Q. Yang, and M. Masukujjaman, "Examining the effect of logistics service quality on customer satisfaction and re-use intention," *PLOS ONE*, vol. 18, no. 5, May 2023, Art. no. e0286382, doi: 10.1371/journal.pone.0286382.
- [34] I. Gil-Saura, G. Berenguer-Contrí, and E. Ruiz-Molina, "Satisfaction and loyalty in B2B relationships in the freight forwarding industry: Adding perceived value and service quality into equation," *Transport*, vol. 33, no. 5, pp. 1184–1195, 2018, doi: 10.3846/transport.2018.6648.
- [35] M. Murfield, C. A. Boone, P. Rutner, and R. Thomas, "Investigating logistics service quality in omni-channel retailing," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 47, no. 4, pp. 263–296, May 2017, doi: 10.1108/IJPDLM-06-2016-0161.
- [36] A. Honora, W.-H. Chih, and J. Ortiz, "What drives customer engagement after a service failure? The moderating role of customer trust," *International Journal of Consumer Studies*, vol. 47, no. 5, pp. 1714–1732, Sep. 2023, doi: 10.1111/ijcs.12939.
- [37] M. Kilibarda, S. Nikolicic, and M. Andrejic, "Measurement of logistics service quality in freight forwarding companies: A case study of the Serbian market," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 27, no. 3, pp. 770–794, 2016, doi: 10.1108/IJLM-04-2014-0063.
- [38] P. Singh and V. Singh, "The power of AI: enhancing customer loyalty through satisfaction and efficiency," *Cogent Business & Management*, vol. 11, no. 1, Dec. 2024, Art. no. 2326107, doi: 10.1080/23311975.2024.2326107.
- [39] B. Pathak, M. Ashok, and Y. L. Tan, "Value co-creation in the B2B context: A conceptual framework and its implications," *The Service Industries Journal*, vol. 42, no. 3–4, pp. 178–205, Oct. 2021, doi: 10.1080/02642069.2021.1989414.
- [40] N. Ali and O. S. Shabn, "Customer lifetime value (CLV) insights for strategic marketing success and its impact on organizational financial performance," *Cogent Business & Management*, vol. 11, no. 1, Jun. 2024, Art. no. 2361321, doi: 10.1080/23311975.2024.2361321.
- [41] L. Steinhoff, D. Arli, S. Weaven, and I. V. Kozlenkova, "Online relationship marketing," *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 47, pp. 369–393, May 2019, doi: 10.1007/s11747-018-0621-6.
- [42] S. Chatterjee, R. Chaudhuri, and D. Vrontis, "AI and digitalization in relationship management: Impact of adopting AI-embedded CRM system," *Journal of Business Research*, vol. 150, pp. 437–450, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.06.033.
- [43] R. H. Binsaeed, Z. Yousaf, A. Grigorescu, R. I. Chitescu, A. A. Nassani, and A. Samoila, "Customer engagement and customer relationship management capabilities' effects on innovation

- performance and customer distrust's moderating role," *Sustainability*, vol. 15, no. 12, Jun. 2023, Art. no. 9475, doi: 10.3390/su15129475.
- [44] S. Sore, M. Saunila, J. Ukko, and A. Helkkula, "Business-to-business value co-creation: Suppliers' perspective of essential information systems capabilities," *Journal of Creating Value*, vol. 9, no. 1, pp. 81–106, Oct. 2022, doi: 10.1177/23949643221121857.
- [45] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 5th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2018.
- [46] U. Sekaran and R. Bougie, *Research Methods for Business: A Skill Building Approach*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019.
- [47] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 8th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2019.
- [48] J. C. Nunnally and I. H. Bernstein, *Psychometric Theory*, 3rd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1994.
- [49] B. G. Tabachnick and L. S. Fidell, *Using Multivariate Statistics*, 7th ed. Boston, MA: Pearson, 2019.
- [50] D. George and P. Mallery, *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference*, 17.0 Update, 10th ed. Boston, MA: Pearson, 2010.

**การพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม
เพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่**
**Development of an Augmented Reality (AR) Application for Cultural Tourism
in Nonthaburi Province: A Case Study of Five Cultural Sites**

พรหมบัญชา พรหมมาหล้า^{1*}

¹สาขาวิชาคอมพิวเตอร์แอนิเมชันและมัลติมีเดีย, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

Prombuncha Prommala^{1*}

¹Computer animation and multimedia, Phranakhon Rajabhat University

Corresponding Author Email : bird001new@gmail.com

Received 02 February 2026

Revised 04 April 2026

Accepted 10 April 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษารวบรวมข้อมูลวิเคราะห์ และออกแบบความต้องการในการนำเสนอแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ 2) เพื่อสร้างและพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยและการพัฒนาใช้หลักการพัฒนาระบบแบบ SDLC โดยเริ่มจากศึกษาความต้องการของผู้ใช้บริการนักท่องเที่ยว และบุคคลทั่วไป โดยวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาเนื้อหาที่ต้องการศึกษา วิเคราะห์สภาพปัญหา และสิ่งที่ต้องการพัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จากนั้นลงพื้นที่ในสำรวจเก็บรวบรวมข้อมูล ถ่ายภาพนิ่งและวิดีโอ แหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบการนำเสนอ นำไปสู่การจัดทำโมเดลสถานที่ท่องเที่ยวในรูปแบบ 3 มิติ และพัฒนาเป็นแอปพลิเคชัน โดยแอปพลิเคชันถูกออกแบบให้แสดงผลข้อมูลในรูปแบบความจริงเสริม (AR) ผ่านการผสมข้อมูลมัลติมีเดีย ได้แก่ ภาพ ข้อความ วิดีโอ และโมเดล 3 มิติ เพื่อสร้างประสบการณ์การเรียนรู้แบบมีปฏิสัมพันธ์ให้กับผู้ใช้งาน เครื่องมือในการพัฒนา ได้แก่ โปรแกรม Unity 3D ร่วมกับการพัฒนา AR EasyAR SDK และพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android Studio เพื่อรองรับการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบมัลติมีเดียและความจริงเสริม (AR)

ผลการวิจัยพบว่า จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการใช้งานแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นในสถานที่จริง จำนวน 120 คน ด้วยวิธีการสุ่ม โดยแบ่งเป็นช่วงอายุ ได้แก่ 1) ต่ำกว่า 20 ปี 2) 21 - 30 ปี 3) 31 - 40 ปี 4) 41 ปีขึ้นไป มีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 4.25 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.49 ความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับมาก การประเมินความพึงพอใจแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านเนื้อหา ด้านการออกแบบ และด้านการใช้งาน โดยกลุ่มอายุ 41 ปี ขึ้นไปมีความพึงพอใจสูงสุด หากแบ่งเป็นเนื้อหารายด้านพบว่า ด้านเนื้อหาช่วงอายุ 21-30 ปี มีความพึงพอใจภาพรวมมากที่สุด ส่วนอายุ 41 ปีขึ้นไปจะให้ความพึงพอใจข้อมูลที่น่าสนใจสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมากที่สุด ด้านการออกแบบช่วงอายุต่ำกว่า

20 ปีมีความพึงพอใจน้อยสุดในทุกด้าน ส่วนอายุ 41 ปี ขึ้นไปมีความพึงพอใจภาพรวมสูงทุกด้าน ด้านการใช้งาน ช่วงอายุ 41 ปีขึ้นไปมีความพึงพอใจภาพรวมสูงสุดในทุกด้าน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันความจริงเสริมมีประสิทธิภาพในการพัฒนาการนำเสนอแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ทำให้ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับมาก และสามารถส่งเสริมการรับรู้ข้อมูลทางวัฒนธรรมได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้การพัฒนาแอปพลิเคชันดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความน่าสนใจให้กับแหล่งท่องเที่ยว ส่งเสริมการตัดสินใจเดินทางของนักท่องเที่ยวเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: ความจริงเสริม, แอปพลิเคชัน, การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม

Abstract

This research aimed to 1) study, analyze, and design requirements for presenting cultural tourism sites in Nonthaburi Province through five case study locations; and 2) develop an augmented reality (AR) application to support cultural tourism in these areas. This study employed a research and development (R&D) approach based on the System Development Life Cycle (SDLC). The process began with analyzing user requirements from tourists and the general public, followed by problem analysis and content design. Data were collected through field surveys, including photographs and video recordings of cultural tourism sites, which were used to design presentation formats and develop three-dimensional (3D) models integrated into the application. The application was designed to present information using augmented reality (AR) by integrating multimedia elements, including images, text, video, and three-dimensional (3D) models, in order to create an interactive learning experience for users. The development tools included Unity 3D in conjunction with the EasyAR SDK, and the application was implemented on the Android platform using Android Studio to support multimedia and AR-based content presentation. The application was developed using Unity 3D in conjunction with the EasyAR SDK and implemented on the Android platform to support multimedia and AR-based content presentation.

The results indicated that data collected from 120 participants through random sampling, categorized into four age groups (below 20, 21–30, 31–40, and above 41 years), showed an overall high level of satisfaction (Mean = 4.25, S.D. = 0.49). Satisfaction was evaluated across three dimensions: content, design, and usability. The findings revealed that participants aged over 41 reported the highest overall satisfaction. In terms of individual dimensions, participants aged 21–30 showed the highest satisfaction in content, while those aged over 41 demonstrated the highest

satisfaction across all dimensions. Participants under 20 reported the lowest satisfaction in design.

The findings demonstrated that the AR application effectively enhanced the presentation of cultural tourism sites, resulting in high user satisfaction and improved understanding of cultural information. Furthermore, the development of the application enhanced the attractiveness of tourism destinations and positively influenced tourists' travel decision-making.

Keywords: Augmented Reality, Application, Cultural Tourism

1. บทนำ

อุตสาหกรรมท่องเที่ยวเป็นสาขาเศรษฐกิจภาคบริการที่มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาและเสริมสร้างเสถียรภาพทางเศรษฐกิจของประเทศเป็นแหล่งสร้างรายได้ที่สำคัญของประชากรในประเทศ และเป็นกลไกทางเศรษฐกิจสำคัญที่ก่อให้เกิดการจ้างงาน การสร้างอาชีพ การหมุนเวียนของรายได้ การกระจายรายได้สู่ท้องถิ่น รวมถึงการส่งเสริมศิลปวัฒนธรรมของชุมชนต่างๆ ในท้องถิ่น

การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม เป็นการท่องเที่ยวที่มุ่งเน้นการเรียนรู้และสัมผัสคุณค่าทางประวัติศาสตร์ ศิลปวัฒนธรรม ประเพณี วิถีชีวิต และภูมิปัญญาท้องถิ่นของชุมชน โดยใช้ทรัพยากรทางวัฒนธรรม เช่น แหล่งโบราณสถาน แหล่งประวัติศาสตร์ ศาสนสถาน งานศิลปกรรม สถาปัตยกรรม นาฏศิลป์ การละเล่นพื้นบ้าน เทศกาล งานหัตถกรรม สินค้าท้องถิ่น และวิถีชีวิตความเป็นอยู่ เป็นองค์ประกอบสำคัญในการดึงดูดนักท่องเที่ยว ทั้งนี้การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมยังส่งเสริมการเรียนรู้ความเคารพต่อวัฒนธรรม การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของชุมชนอย่างยั่งยืน

อุปสรรคที่สำคัญอย่างหนึ่งของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม คือสถานที่ท่องเที่ยว หรือหน่วยย่อยของชุมชน ไม่มีแหล่งจัดเก็บรวบรวมข้อมูลที่สำคัญเหล่านั้นไว้เพื่อสำหรับเผยแพร่ และรักษาเป็นมรดกทางวัฒนธรรมอย่างเป็นระบบ ดังนั้นการพัฒนาแอปพลิเคชันนี้จะช่วยจัดเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบ นำเสนอข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ มีการเรียกใช้งานสืบค้นได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว สร้างความสะดวกสบายสำหรับนักท่องเที่ยวในการตัดสินใจวางแผนการท่องเที่ยวได้อย่างสมบูรณ์ ในส่วนของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมนั้นส่งผลอย่างยิ่งต่อการศึกษาแหล่งวัฒนธรรมที่มีความสำคัญทำให้เพิ่มมูลค่ากับชุมชน อย่างไรก็ตาม ในบริบทของจังหวัดนนทบุรี แม้ว่าจะมีแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมที่หลากหลาย แต่ยังขาดสื่อดิจิทัลหรือแอปพลิเคชันที่สามารถรวบรวมและนำเสนอข้อมูลได้อย่างครบถ้วนและเป็นระบบ

จากการทบทวนวรรณกรรมและสื่อที่เกี่ยวข้อง พบว่ายังไม่มีการพัฒนาแอปพลิเคชันที่นำเสนอแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในจังหวัดนนทบุรีโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะการบูรณาการข้อมูลมัลติมีเดียร่วมกับการจำลองโมเดล 3 มิติ เพื่อสร้างประสบการณ์การเรียนรู้แบบมีปฏิสัมพันธ์ให้กับผู้ใช้งาน ซึ่งสะท้อนถึงช่องว่างของงานวิจัย (Research Gap) ที่สำคัญในประเด็นดังกล่าว

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมจังหวัดนนทบุรี โดยเลือกสถานที่ที่สำคัญในจังหวัดนนทบุรี 5 สถานที่ จากข้อมูลการประชาสัมพันธ์ของฝ่ายส่งเสริมการท่องเที่ยวสำนักงานปลัด องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี โดยพัฒนาให้มีการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบต่างๆ เช่น ข้อมูลรูปภาพ ตัวหนังสือ วิดีโอแนะนำสถานที่ และการจำลองโมเดลรูปแบบ 3 มิติในรูปแบบความจริงเสริม (AR) เพื่อให้การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมทั้ง 5 สถานที่เป็นที่รู้จักมากขึ้น และเป็นการรองรับการใช้งานโทรศัพท์มือถือของนักท่องเที่ยว ในการเพิ่มความน่าสนใจสำหรับข้อมูลที่ต้องการจะนำเสนอในอนาคตอีกด้วย ทั้งนี้ยังสามารถเป็น

ต้นแบบเพื่อนำไปต่อยอดในวางแผนการประชาสัมพันธ์ และเข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวอื่นๆ ในจังหวัดนนทบุรี ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

2. ขอบเขตงานวิจัย

2.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ สถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ โดยวิธีเลือกแบบเจาะจง ประกอบไปด้วย 1) วัดโบสถ์บน 2) วัดปรางค์หลวง 3) วัดพิบูลเงิน 4) วัดราษฎร์ประคองธรรม และ 5) วัดอัมพวัน

2.2 ขอบเขตด้านประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ประชากร ได้แก่ นักท่องเที่ยวและบุคคลทั่วไปที่เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในจังหวัดนนทบุรี กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ นักท่องเที่ยวและบุคคลทั่วไปที่เข้ามาใช้บริการแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ จำนวน 120 คน โดยวิธีเลือกแบบสุ่ม

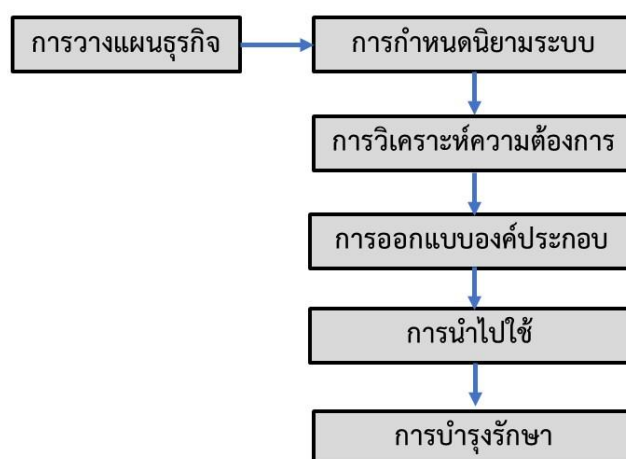
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 แนวคิดเกี่ยวกับทฤษฎีวงจรการพัฒนาระบบ

วงจรชีวิตของการพัฒนาระบบ หรือ SDLC ย่อมาจาก System Development Life Cycle เป็นกระบวนการในการพัฒนาระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป กระบวนการนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเนื่องจากในอดีตมีโครงการที่ประสบความล้มเหลวและเกิดความเสียหายอย่างมากมาย ผู้บริหารโครงการได้หาวิธีการในการพัฒนาระบบสารสนเทศที่จะประสบความสำเร็จและสามารถบำรุงรักษาได้ โดยการแบ่งงานออกเป็นขั้นตอน (Phase) บางองค์การอาจจะมีการแบ่งออกเป็นขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไป บางองค์การมี 7 หรือ 8 ขั้นตอน ในที่นี้แบ่งขั้นตอนในการพัฒนาระบบออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้ [1]

- 1) การกำหนดปัญหา (System Definition)
- 2) การวิเคราะห์ความต้องการ (Requirement Analysis)
- 3) การออกแบบองค์ประกอบ (Component Design)
- 4) การพัฒนา (Implementation)
- 5) การทดสอบ (Verification and Validation)
- 6) การนำไปใช้ (Deployment)
- 7) การบำรุงรักษา (System Maintenance)

วงจรชีวิตของการพัฒนาระบบ จะเริ่มต้นจากกระบวนการวางแผนทางธุรกิจ เพื่อบ่งบอกความต้องการสำหรับระบบใหม่ซึ่งได้รับความเห็นชอบจากผู้บริหารว่าระบบสารสนเทศใหม่นี้จะทำให้องค์กรสามารถบรรลุเป้าหมายและวัตถุประสงค์ได้ ทำการกำหนดนิยามของระบบใหม่ที่ต้องการ โดยใช้ความต้องการระบบที่ได้รับคำบอกกล่าวมา จากผู้บริหารและผู้เกี่ยวข้อง ผลลัพธ์ก็คือจะทำให้เกิดการวางแผนโครงการขึ้นซึ่งจะกลายเป็นอินพุตป้อนเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง คือ การวิเคราะห์ความต้องการ โดยผลลัพธ์ของขั้นตอนที่สองหรือรายการความต้องการของผู้ใช้จะกลายเป็นอินพุตของขั้นตอนการออกแบบองค์ประกอบ หลังจากนั้นจะเป็นการนำไปใช้และทดสอบระบบ เมื่อเวลาผ่านไปผู้ใช้ อาจพบข้อผิดพลาดและปัญหาจากการทำงานก็จะทำการสร้างความต้องการใหม่ๆ ขึ้นมาอีก ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะนำไปเป็นข้อมูลของการบำรุงรักษาระบบ การบำรุงรักษาก็จะนำไปสู่การกำหนดนิยามระบบ นำไปสู่การเริ่มวัฏจักรใหม่ของการพัฒนา ระบบความสัมพันธ์ของขั้นตอนต่างๆ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของขั้นตอนต่างๆ ในวงจรชีวิตของการพัฒนาระบบ [1]

สมมติฐานคุณภาพของระบบอยู่ในระดับดีขึ้นไป การประเมินคุณภาพของระบบได้จากการประเมินแบบสอบถามประสิทธิภาพการพัฒนาระบบจากกลุ่มตัวอย่างหลังจากการใช้โปรแกรม โดยแบ่งการประเมินผลออกเป็น 4 ด้าน 1) ด้าน Functional Requirement Test เป็นการประเมินผลความถูกต้อง และประสิทธิภาพของระบบว่าตรงตามความต้องการของผู้ใช้ระบบมากน้อยเพียงใด 2) ด้าน Functional Test เป็นการประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบว่าสามารถทำงานได้ตามฟังก์ชันงานของระบบมากน้อยเพียงใด 3) ด้าน Usability Test เป็นการประเมินลักษณะการออกแบบระบบว่ามีความง่ายต่อการใช้งานมากน้อยเพียงใด 4) ด้าน Security Test เป็นการประเมินระบบในด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลในระบบว่ามีมากน้อยเพียงใด

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ากระบวนการพัฒนาระบบตามแนวคิด SDLC ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและสื่อดิจิทัล ผู้วิจัย [2] ได้พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการมาตรฐานผลการเรียนรู้ของหลักสูตรอุดมศึกษาโดยใช้กระบวนการ SDLC ครบทุกระยะ ทำให้ระบบที่พัฒนาได้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในสถาบันการศึกษา [3] ได้ใช้แนวทาง SDLC ในการพัฒนาสื่อการเรียนรู้เชิงสร้างสรรค์ร่วมกับเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR) เพื่อส่งเสริมกระบวนการคิดของผู้เรียน พบว่าระบบที่พัฒนาได้มีประสิทธิภาพสูงและผู้เรียนมีความพึงพอใจในระดับมาก ผลงานวิจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่า SDLC เป็นกระบวนการที่สามารถนำมาปรับใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการพัฒนาสื่อและแอปพลิเคชันเชิงสร้างสรรค์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางของงานวิจัยนี้ที่มุ่งใช้ SDLC เป็นกรอบหลักในการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมเพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

3.2 แนวคิดการใช้สื่อเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality หรือ VR) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งจากสภาพแวดล้อมจริง และจากจินตนาการขึ้นมาด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์โดยไม่ได้จำลองเพียงภาพและเสียงเท่านั้น แต่ยังรวมถึงประสาทสัมผัสด้านอื่นด้วย การใส่อุปกรณ์นำเข้าเช่น ถุงมือ เม้าส์ เพื่อการรับรู้ถึงแรงป้อนกลับจากการสัมผัสสิ่งต่างๆ ในโลกเสมือนจริงที่สร้างขึ้นโดยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ เช่น หากสัมผัสเก้าอี้จะต้องรับรู้ถึงมวลความแข็งของเก้าอี้ และอุณหภูมิของวัสดุเป็นต้น เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือนนั้น สามารถแยกออกจากเทคโนโลยีประเภทอื่นที่คล้ายกันได้อย่างชัดเจนด้วยความจดจ่อทางร่างกาย (Physical Immersion) กล่าวคือสำหรับการใช้เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (VR) ผู้ใช้จะรู้สึกตัดขาดจากโลกจริง และความรู้สึกถึงความมีอยู่ (Psychological Presence) โดยที่ความจดจ่อทางร่างกายอยู่ในระดับระบบสัมผัสเต็มรูปแบบ (Fully Immersive)

System) ผู้ใช้รู้สึกตัดขาดจากโลกจริงอย่างสมบูรณ์แบบ โดยสภาพแวดล้อมภาพเสมือนจริงของสมอง กล่าวคือผู้ใช้จะรู้สึกเหมือนอยู่ในโลกจริงแต่ ในความเป็นจริงแล้วอยู่ในโลกที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน ในขณะที่เทคโนโลยีอื่น เช่น เทคโนโลยีเสมือนจริงเสริม (AR) นั้นผู้ใช้อย่างคงสัมผัสอยู่กับโลกจริงระดับความจดจ่อทางร่างกาย ยังคงรับรู้ถึงความมีอยู่ ในโลกจริง กล่าวคือเพียงแค่สัมผัสได้ถึงภาพเสมือนจริงซึ่งอาจจะเป็นรับรู้ด้วยการมองเห็น หรือ การได้ยินแต่ยังไม่ถึงขั้นตัดขาดโลกจริง ซึ่งหากแบ่งประเภทของความเป็นจริงเสมือนออกตามวิธีการติดต่อกับผู้ใช้งาน สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้ [4] 1) เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Desktop VR) เป็นการใช้จอภาพ ธรรมดา (จอคอมพิวเตอร์ทั่วไป) ในการแสดงภาพเสมือนจริง 2) เทคโนโลยีวิดีโอเสริมความจริง (Video Mapping) เป็นการนำวิดีโอมาเป็นอุปกรณ์นำเข้าข้อมูล และใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์ในการแสดงผลกราฟิกแบบ 3 มิติ ซึ่งมีทั้งแบบ สองมิติและสามมิติ ทำให้ผู้ใช้สามารถเห็นตัวเอง และการเปลี่ยนแปลงของตนเองจากจอภาพได้ 3) ระบบเสมือนจริง ผ่านจอภาพ (Immersive Systems) เป็นเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือนสำหรับส่วนบุคคล โดยใช้จอภาพสามมิติระนาบ ในการแสดงภาพและเสียงของโลกเสมือน 4) ระบบการประชุมแบบเสมือนจริง (Telepresence) เป็นระบบเสมือนจริง ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณระยะไกลไว้ที่อุปกรณ์หนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นหุ่นยนต์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น เพื่อให้เชื่อมต่อการใช้งานเข้ากับผู้ใช้ 5) ระบบเสริมความจริง (Augmented Reality Systems) การรวมกันของ ระบบการประชุมแบบเสมือนจริง กับ เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน โดยใช้ ระบบการประชุมแบบเสมือนจริง เป็น ตัวนำเข้าข้อมูล และ เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน ในการแสดงผลภาพเสมือนจริงให้กับผู้ใช้ได้เห็น เช่นการแสดงผล ภาพเสมือนจริงสมองของคนไข้ให้กับศัลยแพทย์ชม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 จำลองอุปกรณ์ในการใช้งานเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน [4]

3.3 ระบบเสมือนจริงเสริม AR (Augmented Reality)

ผู้วิจัย [5] ได้ให้ความหมายของระบบความจริงเสริม (Augmented Reality) ระบบความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) หมายถึง เทคโนโลยีที่ผสมผสานข้อมูลหรือวัตถุดิจิทัลซึ่งสร้างขึ้นโดยคอมพิวเตอร์ เช่น ภาพสามมิติ ข้อความ หรือสื่อมัลติมีเดีย เข้ากับสภาพแวดล้อมจริงของผู้ใช้ในลักษณะการซ้อนทับแบบเรียลไทม์ โดยผู้ใช้สามารถรับรู้และโต้ตอบกับวัตถุเสมือนเหล่านั้นร่วมกับโลกจริงได้ในมิติสามมิติ อันเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการรับรู้และประสบการณ์ของผู้ใช้โดยไม่แยกออกจากสภาพแวดล้อมจริง

ลักษณะสำคัญของ AR

- ผสมผสานโลกจริงกับโลกดิจิทัล โดยไม่แยกผู้ใช้ออกจากสภาพแวดล้อมจริง

- แสดงผลแบบเรียลไทม์ และสามารถโต้ตอบได้
- ทำงานในมิติสามมิติ เพื่อให้วัตถุดิจิทัลสอดคล้องกับตำแหน่งและมุมมองจริง

อุปกรณ์ที่ใช้กับ AR

- สมาร์ทโฟนและแท็บเล็ต (ผ่านกล้องและจอภาพ)
- แว่นตาอัจฉริยะ (เช่น Smart Glasses) อุปกรณ์สวมศีรษะบางประเภท

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้

- การศึกษา สื่อการเรียนรู้สามมิติ โมเดลกายวิภาค หรือการทดลองเสมือน
- ธุรกิจและการตลาด ทดลองสินค้าเสมือนจริงก่อนซื้อ
- อุตสาหกรรม คู่มือซ่อมบำรุงแบบซ้อนทับบนเครื่องจักรจริง
- ความบันเทิงและเกม เกมที่ผสมโลกจริงกับวัตถุเสมือน
- การท่องเที่ยวและวัฒนธรรม ข้อมูลสถานที่หรือโบราณสถานแบบอินเทอร์แอคทีฟ

3.4 วิวัฒนาการเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน

เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือนนั้นถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อประมาณ 40 กว่าปีที่แล้ว โดยนายอีแวน ซูเทอร์แลนด์ (Ivan Sutherland) ได้ทำการประดิษฐ์จอภาพสวมศีรษะสามมิติขึ้นมา และนำไปใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ถูกพัฒนาขึ้นในช่วงดังกล่าว โดยเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือนมีขั้นตอนการแสดงผลคือเมื่อผู้ใช้สวมจอภาพสวมศีรษะจอภาพจะเติมเต็มภาพในการมองเห็นด้วยภาพลักษณะสามมิติที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ที่ถูกเชื่อมต่อเข้ากับจอภาพสวมศีรษะ และเมื่อสัมผัสกับสิ่งของเสมือนก็จะรู้สึกรับรู้เสมือนกับจับต้องของสิ่งนั้นจริง เนื่องจากถุงมือแม่เหล็กนั่นเองในช่วงแรกนั้นเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน ถูกนำไปพัฒนาเป็นเทคโนโลยีจำลองการบิน ซึ่งได้มีการปรับปรุงให้จอภาพสวมหัวสามมิติมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ให้นักบินที่สวมใส่เกิดความกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมเสมือนมากยิ่งขึ้น และมีการสร้างภาพจำลองเสมือนมีเครื่องบินลำอื่นปรากฏอยู่ด้วยเพื่อใช้ในการฝึกบินด้วยประสบการณ์เสมือนจริง อีกทั้งในช่วงเวลาเดียวกันนี้ยังมีการวิจัยเทคโนโลยีความเป็นจริงประดิษฐ์ (Augmented Reality) ไปพร้อมกันด้วย [6]

วิวัฒนาการของเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) หมายถึง กระบวนการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้คอมพิวเตอร์สร้างสภาพแวดล้อมเสมือนสามมิติให้ผู้ใช้สามารถรับรู้และโต้ตอบได้เสมือนอยู่ในโลกจริง โดยเริ่มจากระบบจำลองพื้นฐานที่มีข้อจำกัดด้านการแสดงผลและการโต้ตอบไปสู่ระบบที่มีความสมจริงสูงรองรับอุปกรณ์แสดงผลและอุปกรณ์ป้อนข้อมูลที่หลากหลาย และสามารถตอบสนองต่อการกระทำของผู้ใช้ได้แบบเรียลไทม์ [7]

ในบริบทของประเทศไทยวิวัฒนาการของเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เริ่มจากการศึกษาเชิงแนวคิดและการทดลองใช้งานในระดับสถาบันการศึกษา ก่อนพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้จริงในด้านการศึกษา การท่องเที่ยว และสื่อดิจิทัล โดยงานวิจัยช่วงแรกมุ่งอธิบายลักษณะ แนวคิด และศักยภาพของเทคโนโลยี VR ในการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนเพื่อเพิ่มประสบการณ์การเรียนรู้ของผู้ใช้ขณะที่งานวิจัยระยะหลังให้ความสำคัญกับการพัฒนาระบบและแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่รวมถึงการบูรณาการ VR ร่วมกับเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR) เพื่อส่งเสริมการเรียนรู้และการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ผลการศึกษาส่วนใหญ่สะท้อนว่าเทคโนโลยีดังกล่าวได้รับการยอมรับในระดับสูง และมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในบริบทสังคมไทย [8]

ในบริบทของประเทศไทย วิวัฒนาการของเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เริ่มจากการศึกษาเชิงแนวคิดและการทดลองใช้งานในสถาบันการศึกษาก่อนพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้จริงผ่านระบบและแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ปัจจุบัน VR ถูกนำมาใช้เพื่อสนับสนุนการเรียนรู้ การท่องเที่ยว และสื่อดิจิทัลอย่างแพร่หลาย และมีแนวโน้มการบูรณาการร่วมกับเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) อย่างต่อเนื่อง

3.5 การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม

การท่องเที่ยวเชิงศิลปวัฒนธรรมประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ 1) ประวัติศาสตร์และร่องรอยทางประวัติศาสตร์ 2) โบราณคดีและพิพิธภัณฑ์ 3) งานสถาปัตยกรรมเก่าแก่ดั้งเดิม 4) ศิลปะหัตถกรรม ประติมากรรม ภาพวาด รูปปั้น และงานแกะสลัก 5) ศาสนาและพิธีกรรมทางศาสนา 6) ดนตรี การแสดง ละคร และภาพยนตร์ 7) ภาษาและวรรณกรรม 8) วิถีชีวิต การแต่งกาย และอาหาร 9) ประเพณี วัฒนธรรมพื้นบ้าน และเทศกาลต่าง ๆ 10) ลักษณะงานและเทคโนโลยีภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ใช้เฉพาะพื้นที่ [9]

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องกลยุทธ์การพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม [10] ได้ให้ความหมายของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมว่าเป็นรูปแบบการท่องเที่ยวที่นักท่องเที่ยวได้รับแรงจูงใจให้เดินทางไปยังแหล่งท่องเที่ยว เพื่อสังเกต เรียนรู้ มีประสบการณ์ร่วม และตระหนักถึงคุณค่าทางวัฒนธรรมของชุมชนในพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งครอบคลุมงานสร้างสรรค์ ประเพณี ขนบธรรมเนียม และกิจกรรมต่างๆ ของชุมชน โดยนักท่องเที่ยวและคนในชุมชนควรเคารพ เรียนรู้และเข้าใจซึ่งกันและกัน เพื่อก่อให้เกิดมิตรภาพและความยั่งยืนทางสังคม ทั้งนี้การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้และเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ

การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมเป็นที่นิยมมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งสัมพันธ์กับงานวิจัยเรื่องการพัฒนาคุณภาพการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [11] กล่าวว่า การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมเป็นการนำวัฒนธรรมท้องถิ่นที่มีความโดดเด่นและเป็นเอกลักษณ์ของวิถีชีวิต ภูมิปัญญา และศิลปวัฒนธรรมมาใช้เป็นทรัพยากรเพื่อดึงดูดนักท่องเที่ยว ได้แก่ แหล่งโบราณวัตถุสถาน แหล่งประวัติศาสตร์ ศาสนสถาน งานศิลปกรรม สถาปัตยกรรม นาฏศิลป์ การละเล่นพื้นบ้าน เทศกาล งานประเพณี งานศิลปหัตถกรรม สินค้าท้องถิ่น และวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของชุมชน

ทั้งนี้การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมยังสามารถสะท้อนถึง ความเป็นเอกลักษณ์ ประวัติศาสตร์ ความเป็นมาของวิถีการใช้ชีวิตชุมชนในสมัยอดีต [12] กล่าวว่า การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมเป็นการท่องเที่ยวที่มุ่งเน้นแหล่งท่องเที่ยวที่เกี่ยวข้องกับมรดกทางวัฒนธรรมที่สืบทอดกันมา เช่น สถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์ โบราณวัตถุ โบราณสถาน พิพิธภัณฑ์สถาน ศิลปวัตถุ ลักษณะการประกอบอาชีพที่มีเอกลักษณ์ การแสดงพื้นเมือง งานหัตถกรรม สินค้าท้องถิ่น และวิถีชีวิตความเป็นอยู่ของชุมชน

4. การดำเนินการวิจัย

4.1 ศึกษาความต้องการของผู้ใช้บริการ/นักท่องเที่ยว

จากข้อมูลการประชาสัมพันธ์ของฝ่ายส่งเสริมการท่องเที่ยวสำนักงานปลัด องค์การบริหารส่วนจังหวัดนนทบุรี ได้มีประชาสัมพันธ์แหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม 5 สถานที่ พื้นที่ริมคลองอ้อมนนท์ อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรีที่สำคัญได้แก่ 1) วัดโบสถ์บน 2) วัดปรังค์หลวง 3) วัดพิบูลเงิน 4) วัดราษฎร์ประคองธรรม 5) วัดอัมพวัน ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ และวิเคราะห์วัตถุประสงค์ของงานวิจัยรวมถึงสภาพปัญหา และสิ่งที่ต้องการปรับปรุงแก้ไขพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมในลำดับต่อไป

ผู้วิจัยได้ทำการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ทั้ง 5 สถานที่ เช่น ถ่ายภาพนิ่ง ถ่ายวิดีโอ และสอบถามข้อมูลอื่นๆ จากการสนทนากับนักท่องเที่ยว ตัวแทนชุมชน เจ้าอาวาส ผู้ใหญ่บ้าน ผู้ดูแลหรือผู้ครอบครองสถานที่ท่องเที่ยวนั้นๆ โดยใช้แบบสัมภาษณ์เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล ประเด็นคำถามที่ใช้ในการสัมภาษณ์ประกอบด้วย 1) ความต้องการข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งท่องเที่ยว เช่น ประวัติ ความสำคัญ จุดเด่น 2) รูปแบบการนำเสนอข้อมูลที่น่าสนใจ เช่น ภาพ วิดีโอ หรือสื่อ 3 มิติ 3) ปัญหาที่พบในการเข้าถึงข้อมูลแหล่งท่องเที่ยว 4) ความคาดหวังต่อการนำเทคโนโลยีในการท่องเที่ยว เช่น AR หรือแอปพลิเคชันมือถือ ซึ่งกลุ่มผู้ให้ข้อมูลได้แก่นักท่องเที่ยว ตัวแทนชุมชน เจ้าอาวาส ผู้ใหญ่บ้าน และผู้ดูแลสถานที่ โดยดำเนินการเก็บข้อมูลผ่านการสัมภาษณ์และการสนทนาอย่างไม่เป็นทางการ ผลการวิเคราะห์ความต้องการพบว่าผู้ใช้งานต้องการสื่อที่สามารถนำเสนอข้อมูลใน

รูปแบบที่เข้าใจง่าย น่าสนใจ และมีปฏิสัมพันธ์ เช่น การใช้วิดีโอ การใช้เสียงและข้อความประกอบ การแสดงผลโมเดล 3 มิติ และการใช้เทคโนโลยี AR เพื่อช่วยอธิบายข้อมูลเชิงวัฒนธรรม และเพิ่มประสบการณ์การเรียนรู้ของผู้ใช้งาน จากข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมในลำดับต่อไป

- ออกแบบรายละเอียดของเนื้อหาที่จะปรากฏอยู่ในแอปพลิเคชันส่งเสริม การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม รายละเอียดของเนื้อหาที่ปรากฏประกอบไปด้วยโมเดล 3 มิติ ภาพนิ่ง วิดีโอ เสียง และข้อความ

- ออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface หรือ UI) โดยออกแบบรายละเอียดในการทำงานของ แอปพลิเคชัน ทั้งส่วนที่เป็นหน้าหลัก ส่วนแสดงผล AR แบบ 3 มิติ และส่วนแสดงผลข้อมูลวิดีโอ สำหรับใช้ เป็น AR code หรือ Marker ประกอบด้วย รูปภาพ ข้อความ วิดีโอ และรายละเอียดของเนื้อหาที่อธิบายแหล่งท่องเที่ยวเชิง วัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี

- พัฒนาแอปพลิเคชันตามที่ได้ออกแบบไว้ การพัฒนาแอปพลิเคชันในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามขั้นตอนของ SDLC ซึ่งมุ่งเน้นการสร้างระบบ AR ที่สามารถแสดงผลข้อมูลเชิงวัฒนธรรมในรูปแบบเสมือนจริงแบบโต้ตอบได้ มี ขั้นตอนการพัฒนา ดังนี้

1) การสร้างโมเดลสามมิติ (3D Modeling) ผู้วิจัยได้สร้างโมเดลสถานที่ท่องเที่ยวด้วยโปรแกรม Maya โดยอ้างอิงจากภาพถ่ายและข้อมูลภาคสนาม เพื่อให้ได้โมเดลที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับสถานที่จริงมีการปรับลด จำนวน Polygon (Low-Poly Optimization) เพื่อให้เหมาะสมกับการแสดงผลบนอุปกรณ์มือถือ

2) การเตรียมทรัพยากร (Asset Preparation) ทำการจัดเตรียมไฟล์มัลติมีเดีย ได้แก่ ภาพนิ่ง วิดีโอ เสียง และข้อความ พร้อมปรับขนาดไฟล์ (Compression) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการโหลดข้อมูล

3) การพัฒนา AR ด้วย Unity และ EasyAR นำโมเดล 3 มิติและสื่อมัลติมีเดียเข้าสู่ Unity 3D และเชื่อมต่อกับ EasyAR SDK เพื่อพัฒนาระบบ AR แบบ Marker-based Tracking โดยมีการกำหนดการทำงานดังนี้

- กำหนด Marker หรือ AR Code สำหรับแต่ละสถานที่ท่องเที่ยว
- ตั้งค่าการตรวจจับภาพ (Image Target Detection)
- กำหนดตำแหน่ง (Position) ขนาด (Scale) และการหมุน (Rotation) ของโมเดล 3 มิติให้ สอดคล้องกับ Marker

4) การพัฒนา Interaction ของผู้ใช้งานออกแบบการโต้ตอบ (User Interaction) เช่น การแตะ หน้าจอเพื่อแสดงข้อมูล การหมุนหรือขยายโมเดล (Rotate/Zoom) และการเลือกเมนูข้อมูลเพิ่มเติม

5) การเชื่อมโยงข้อมูล (Data Integration) เชื่อมโยงเนื้อหาแต่ละประเภท (ข้อความ ภาพ วิดีโอ และ เสียง) เข้ากับวัตถุ AR เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ผ่านการสแกน Marker

6) การ Build และ Deploy แอปพลิเคชันทำการ Build แอปพลิเคชันผ่าน Android Studio และ ติดตั้งลงบนอุปกรณ์สมาร์ทโฟน เพื่อทดสอบการทำงานในสภาพแวดล้อมจริง

7) การทดสอบและปรับปรุง (Debugging & Optimization) ตรวจสอบความถูกต้องของการแสดงผล AR ความเสถียรของระบบ และประสิทธิภาพในการทำงาน เช่น ระยะเวลาในการโหลด และความสิ้นเปลืองของการ แสดงผล พร้อมทั้งปรับปรุงข้อผิดพลาด (Bug Fixing) และเพิ่มประสิทธิภาพ (Performance Optimization)

4.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างประชากร

ประชากร ได้แก่ นักท่องเที่ยวและบุคคลทั่วไปที่เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในจังหวัดนนทบุรี กลุ่ม ตัวอย่าง ได้แก่ นักท่องเที่ยวและบุคคลทั่วไปที่เข้ามาใช้บริการแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี ทัศนศึกษา 5 สถานที่ จำนวน 120 คน โดยวิธีเลือกแบบสุ่ม

4.3 เครื่องมือในการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือใน 3 ลักษณะ ดังนี้

1) ด้านฮาร์ดแวร์ เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows 10 (64-bit) หรือใหม่กว่า ใช้หน่วยประมวลผลกลางแบบหลายแกน (อย่างน้อย 4 Core) หน่วยความจำไม่น้อยกว่า 8 GB การ์ดจอที่รองรับ DirectX 10 ขึ้นไป และใช้หน่วยจัดเก็บข้อมูลแบบ SSD และสามารถเข้าถึงอินเทอร์เน็ต และอุปกรณ์สมาร์ตโฟนระบบปฏิบัติการ Android ที่รองรับการทำงานของเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR) เช่น กล้องความละเอียดสูง เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว และระบบประมวลผลที่เพียงพอสำหรับการแสดงผลโมเดล 3 มิติแบบเรียลไทม์

2) ด้านซอฟต์แวร์ ได้แก่ ภาษาโปรแกรม C และ ภาษา PHP, โปรแกรมที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบปฏิบัติการ Android Studio, โปรแกรม Unity 3D ,โปรแกรม Maya, โปรแกรมชุดพัฒนา AR EasyAR SDK โดยระบบแอปพลิเคชันถูกออกแบบให้รองรับการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบมัลติมีเดีย ได้แก่ ข้อความ ภาพนิ่ง วิดีโอ และโมเดลสามมิติ (3D) ผ่านเทคโนโลยี AR แบบ Marker-based Tracking ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกับเนื้อหาเสมือนจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) แบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานแอปพลิเคชันโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม เพื่อใช้ในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ แบบสอบถามนี้เป็นการสอบถามข้อมูลความพึงพอใจภายหลังจากที่ได้ทดลองใช้แอปพลิเคชัน โดยมีลักษณะเป็นแบบประมาณค่า 5 ระดับ ลิเคิร์ต [13] ตามแบบของลิเคิร์ต (Likert Scale) มีเกณฑ์ดังนี้

- 5 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด
- 4 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจมาก
- 3 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจปานกลาง
- 2 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจน้อย
- 1 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

4) การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือ ก่อนนำแบบสอบถามไปใช้จริง ผู้วิจัยได้ตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือในสองด้าน ดังนี้

- ความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity)

แบบสอบถามได้ผ่านการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อการศึกษา ด้านการท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์ และด้านสถิติประยุกต์ เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item-Objective Congruence: IOC) ผลการตรวจสอบพบว่าข้อคำถามมีค่า IOC อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ตามเกณฑ์ของ [13]

- ความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม (Reliability)

ผู้วิจัยได้ทดลองใช้แบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างนำร่อง (Try-out) จำนวน 10 คน ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจริง เพื่อนำข้อมูลมาคำนวณค่าความเที่ยงของแบบสอบถามด้วยสถิติ ค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ผลการคำนวณได้ค่า $\alpha = 0.95$ ซึ่งอยู่ในระดับสูง แสดงว่าแบบสอบถามมีความเชื่อมั่นและสามารถนำไปใช้ในการเก็บข้อมูลจริงได้อย่างเหมาะสม

5) นอกจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้ว ผู้วิจัยได้ใช้สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของระดับความพึงพอใจระหว่างช่วงอายุ และใช้

การทดสอบความแตกต่างรายคู่ (Post Hoc Analysis: Tukey's HSD) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

6) จริยธรรมการวิจัย การวิจัยครั้งนี้ได้คำนึงถึงจริยธรรมในการวิจัยในมนุษย์ โดยผู้เข้าร่วมวิจัยได้รับการชี้แจงวัตถุประสงค์ ขั้นตอน และสิทธิในการเข้าร่วมการวิจัยอย่างชัดเจน พร้อมทั้งให้ความยินยอมโดยสมัครใจ ข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวบรวมจะถูกเก็บรักษาเป็นความลับ และนำเสนอในภาพรวมโดยไม่เปิดเผยตัวตนของผู้ให้ข้อมูล เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสิทธิส่วนบุคคลของผู้เข้าร่วมวิจัย

4.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

หลังจากที่ได้พัฒนาแอปพลิเคชันเสร็จแล้ว ได้นำไปเก็บข้อมูลจากแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี 5 สถานที่ ได้แก่

- 1) วัดโบสถ์บน
- 2) วัดปรังค์หลวง
- 3) วัดพิบูลเงิน
- 4) วัดราษฎร์ประคองธรรม
- 5) วัดอัมพวัน

โดยเลือกเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างโดยวิธีเลือกแบบสุ่ม จำนวน 120 คน เพื่อวัดและประเมินผลความพึงพอใจหลังการใช้งาน แบบสอบถามมีลักษณะเป็นแบบประมาณค่า 5 ระดับ มีเกณฑ์ดังนี้

- 5 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด
- 4 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจมาก
- 3 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจปานกลาง
- 2 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจน้อย
- 1 หมายถึง แอปพลิเคชันที่ใช้มีระดับความพึงพอใจน้อยที่สุด

4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้สถิติพื้นฐานเพื่อสรุปและอธิบายลักษณะของข้อมูลที่รวบรวมมา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าเฉลี่ย (Mean) ใช้ในการแสดงค่ากลางของข้อมูลเพื่อสรุปแนวโน้มศูนย์กลางของตัวแปรที่ศึกษา ร้อยละ (Percentage) ใช้เพื่อแสดงการกระจายตัวของข้อมูลในรูปแบบสัดส่วนที่เข้าใจง่าย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ใช้ในการวัดการกระจายตัวของข้อมูลรอบค่าเฉลี่ย ซึ่งช่วยให้เข้าใจถึงความผันผวนหรือความแปรปรวนในชุดข้อมูล ทั้งนี้การเลือกใช้สถิติเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้การแสดงผลข้อมูลมีความชัดเจน เข้าใจง่าย และสามารถนำไปตีความได้อย่างเหมาะสมสำหรับการตอบโจทย์การวิจัยหรือวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

5. ผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนวิจัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1 ผลออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

โดยผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้า เอกสาร แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิง วัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม และดำเนินการออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชันที่เน้นการนำเสนอด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality) มีดังนี้

5.1.1 การออกแบบแอปพลิเคชัน

1) แอปพลิเคชันพัฒนาสำหรับใช้งานบนสมาร์ทโฟน (Smart Phone) ในระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android)



รูปที่ 3 ตัวอย่างหน้าจอหลัก

2) การออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface หรือ UI) ประกอบไปด้วยหน้าจอหลัก หน้าจอแนะนำการใช้งาน โดยออกแบบพื้นหลังอย่างเรียบง่ายและใช้ภาพประกอบที่สื่อความหมายถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่



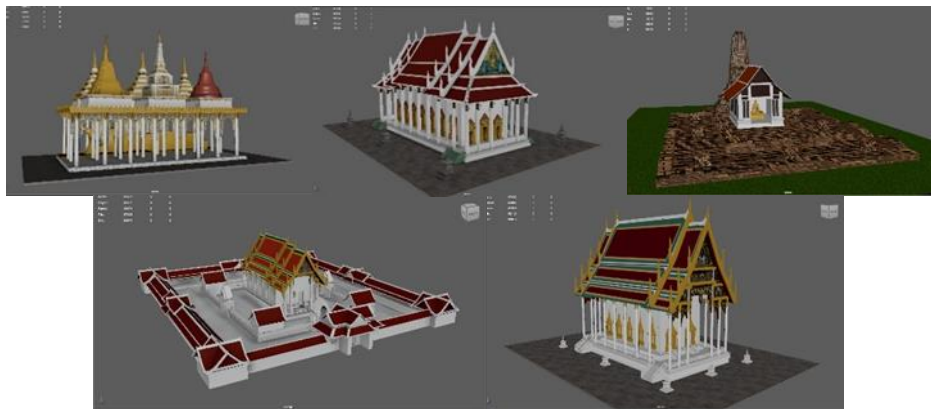
รูปที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน

3) การนำเสนอข้อมูลในรูปแบบสื่อต่างๆ ประกอบไปด้วยข้อความประกอบ ภาพนิ่ง และ QR Code วิดีโอ



รูปที่ 5 ตัวอย่างการนำเสนอข้อมูล

5.1.2 สร้างโมเดล 3 มิติ



รูปที่ 6 ตัวอย่างตัวอย่างการสร้างโมเดล 3 มิติ

5.1.3 การพัฒนาระบบเสมือนจริง



รูปที่ 7 ตัวอย่างการทำงานแอปพลิเคชัน

5.2 แบบสำรวจข้อมูลส่วนตัวผู้ใช้งานแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลในสถานที่จริง ผู้ใช้บริการ นักท่องเที่ยว และบุคคลทั่วไป ที่เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี 5 สถานที่ จำนวน 120 คน ด้วยวิธีการสุ่ม มีผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบสำรวจข้อมูลส่วนตัวผู้ใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม
ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

ที่	รายการสำรวจ	ตัวเลือก	ร้อยละ
1	เพศ	1. เพศชาย	34%
		2. เพศหญิง	59%
		3. ไม่ระบุเพศ	7%
2	ช่วงอายุ	1. ต่ำกว่า 20 ปี	4%
		2. 21 - 30 ปี	10%
		3. 31 - 40 ปี	29%
		4. 41 ปีขึ้นไป	57%
3	อาชีพ	1. นักเรียน/นักศึกษา	4%
		2. ข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจ	47%
		3. พนักงานบริษัทเอกชน	32%
		4. ธุรกิจส่วนตัว	15%
		5. อื่นๆ	2%
4	ระดับการศึกษาสูงสุด	ต่ำกว่าระดับปริญญาตรี	28%
		ปริญญาตรี	58%
		ปริญญาโท	11%
		ปริญญาเอก	3%
5	สถานภาพ	โสด	32%
		สมรส	66%
		หม้าย/หย่าร้าง	2%
6	เดินทางท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ในจังหวัดนนทบุรี และจังหวัดอื่นๆ	น้อยกว่า 1 ครั้ง/เดือน	18%
		2 - 5 ครั้ง/เดือน	72%
		มากกว่า 5 ครั้ง/เดือน	10%

จากตารางที่ 1 พบว่าผู้ตอบแบบสำรวจข้อมูลส่วนตัวผู้ใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ 1) เป็นเพศหญิงมากที่สุด คิดเป็น 59% รองลงมาเป็นเพศชาย คิดเป็น 34% และไม่ระบุเพศน้อยที่สุด คิดเป็น 7% 2) ช่วงอายุมากที่สุดคือ อายุ 41 ปีขึ้นไป คิดเป็น 57% รองลงมาอายุ 31-40 ปี คิดเป็น 29% รองลงมาอายุ 21-30 ปี คิดเป็น 10% และน้อยที่สุดอายุต่ำกว่า 20 ปี คิดเป็น 4% 3) ประกอบอาชีพมากที่สุดคือ ข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจคิดเป็น 47% รองลงมาพนักงาน

บริษัทเอกชน คิดเป็น 32% รองลงมาธุรกิจส่วนตัว คิดเป็น 15% รองลงมานักเรียน/นักศึกษา คิดเป็น 4% และน้อยที่สุดคือ อื่นๆ คิดเป็น 2% 4) ระดับการศึกษามากที่สุดคือ ปริญญาตรี คิดเป็น 58% รองลงมาต่ำกว่าปริญญาตรี คิดเป็น 28% รองลงมาปริญญาโท คิดเป็น 11% และน้อยที่สุดปริญญาเอก คิดเป็น 3% 5) สถานะภาพสมรส มากที่สุดคิดเป็น 66% รองลงมาคือ โสด คิดเป็น 32% และน้อยที่สุดคือ หม้าย/หย่าร้าง คิดเป็น 2 % 6) มีการเดินทางท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ในจังหวัดนนทบุรี และจังหวัดอื่นๆ มากที่สุด คือ 2 – 5 ครั้ง/เดือน คิดเป็น 72% รองลงมาคือน้อยกว่า 1 ครั้ง/เดือน คิดเป็น 18% และน้อยที่สุด คือ มากกว่า 5 ครั้ง/เดือน คิดเป็น 10%

5.3 ผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น

ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลในสถานที่จริง ผู้ใช้บริการ นักท่องเที่ยว และบุคคลทั่วไป ที่เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี 5 สถานที่ จำนวน 120 คน ด้วยวิธีการสุ่ม โดยแบ่งเป็นช่วงอายุ ได้แก่ 1) ต่ำกว่า 20 ปี 2) 21 - 30 ปี 3) 31 - 40 ปี 4) 41 ปีขึ้นไป มีผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 2 – 5 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถาม ช่วงอายุต่ำกว่า 20 ปี
ต่อการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม
สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
ด้านเนื้อหา			
1. ข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมครบถ้วน	3.90	0.40	มาก
2. ข้อมูลที่นำเสนอสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีความน่าสนใจ	4.25	0.52	มาก
3. ปริมาณข้อมูลที่น่าสนใจมีความเหมาะสม	4.19	0.49	มาก
4. ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับ อธิบายข้อมูลชัดเจน	4.29	0.52	มาก
5. การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม	4.32	0.54	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านเนื้อหา	4.19	0.49	มาก
ด้านการออกแบบ			
1. แอปพลิเคชัน ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน	4.20	0.46	มาก
2. โมเดล 3 มิติ มีความสวยงาม สอดคล้องกับแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่	4.26	0.47	มาก
3. ภาพนิ่ง และวิดีโอที่ใช้ในแอปพลิเคชันมีความสวยงาม และน่าสนใจ	4.03	0.57	มาก
4. การตอบสนองของแอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการทำตามคำสั่งของผู้ใช้	4.06	0.51	มาก
5. ความเหมาะสมของรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในภาพรวม	4.19	0.45	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการออกแบบ	4.15	0.49	มาก
ด้านการใช้งาน			
1. สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม สำหรับศึกษาหาความรู้ได้	4.21	0.42	มาก

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
2. แอปพลิเคชันมีความแปลกใหม่และทันสมัย	4.10	0.38	มาก
3. แอปพลิเคชันทำให้รู้สึกใกล้ชิดกับสถานที่ท่องเที่ยว	4.25	0.42	มาก
4. แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง	4.33	0.50	มาก
5. ภาพรวมท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน โมเดล 3 มิติ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (AR)	4.25	0.47	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการใช้งาน	4.23	0.44	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	4.19	0.47	มาก

จากตารางที่ 2 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามในช่วงอายุต่ำกว่า 20 ปี สำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ มีความพึงพอใจภาพรวมทุกด้านอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.19 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.47 เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า

ด้านเนื้อหา การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม ค่าเฉลี่ย 4.32 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.54 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการออกแบบ โมเดล 3 มิติ มีความสวยงาม สอดคล้องกับแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่ ค่าเฉลี่ย 4.26 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.47 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการใช้งาน แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง ค่าเฉลี่ย 4.33 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถาม ช่วงอายุ 21 - 30 ปี

ต่อการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม
สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
ด้านเนื้อหา			
1. ข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมครบถ้วน	4.23	0.50	มาก
2. ข้อมูลที่นำเสนอสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีความน่าสนใจ	4.25	0.52	มาก
3. ปริมาณข้อมูลที่นำเสนอมีความเหมาะสม	4.30	0.49	มาก
4. ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับ อธิบายข้อมูลชัดเจน	4.32	0.52	มาก
5. การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม	4.35	0.32	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านเนื้อหา	4.29	0.47	มาก
ด้านการออกแบบ			
1. แอปพลิเคชัน ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน	4.26	0.42	มาก

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
2. โมเดล 3 มิติ มีความสวยงาม สอดคล้องกับแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่	4.28	0.31	มาก
3. ภาพนิ่ง และวิดีโอที่ใช้ในแอปพลิเคชันมีความสวยงาม และน่าสนใจ	4.38	0.30	มาก
4. การตอบสนองของแอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการทำตามคำสั่งของผู้ใช้	4.24	0.45	มาก
5. ความเหมาะสมของรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในภาพรวม	4.20	0.34	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการออกแบบ	4.27	0.34	มาก
ด้านการใช้งาน			
1. สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม สำหรับศึกษาหาความรู้ได้	4.13	0.45	มาก
2. แอปพลิเคชันมีความแปลกใหม่และทันสมัย	4.15	0.41	มาก
3. แอปพลิเคชันทำให้รู้สึกใกล้ชิดกับสถานที่ท่องเที่ยว	4.10	0.35	มาก
4. แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง	4.28	0.50	มาก
5. ภาพรวมท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน โมเดล 3 มิติ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (AR)	4.25	0.47	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการใช้งาน	4.18	0.44	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	4.25	0.42	มาก

จากตารางที่ 3 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามในช่วงอายุ 21 - 30 ปี กับการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี ทัศนศึกษา 5 สถานที่ มีความพึงพอใจภาพรวมทุกด้านอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.25 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.42 เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า

ด้านเนื้อหา การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม ค่าเฉลี่ย 4.35 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.32 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการออกแบบ ภาพนิ่ง และวิดีโอที่ใช้ในแอปพลิเคชันมีความสวยงาม และน่าสนใจ ค่าเฉลี่ย 4.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.30 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการใช้งาน แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง ค่าเฉลี่ย 4.28 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถาม ช่วงอายุ 31 - 40 ปี
การใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม
สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
ด้านเนื้อหา			
1. ข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมครบถ้วน	4.18	0.46	มาก
2. ข้อมูลที่นำเสนอสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีความน่าสนใจ	4.25	0.52	มาก
3. ปริมาณข้อมูลที่น่าสนใจมีความเหมาะสม	4.20	0.49	มาก
4. ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับ อธิบายข้อมูลชัดเจน	4.32	0.52	มาก
5. การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม	4.23	0.50	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านเนื้อหา	4.24	0.50	มาก
ด้านการออกแบบ			
1. แอปพลิเคชัน ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน	4.33	0.41	มาก
2. โมเดล 3 มิติ มีความสวยงาม สอดคล้องกับแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่	4.36	0.32	มาก
3. ภาพนิ่ง และวิดีโอที่ใช้ในแอปพลิเคชันมีความสวยงาม และน่าสนใจ	4.26	0.45	มาก
4. การตอบสนองของแอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการทำตามคำสั่งของผู้ใช้	4.38	0.30	มาก
5. ความเหมาะสมของรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในภาพรวม	4.28	0.34	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการออกแบบ	4.32	0.36	มาก
ด้านการใช้งาน			
1. สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม สำหรับศึกษาหาความรู้ได้	4.38	0.40	มาก
2. แอปพลิเคชันมีความแปลกใหม่และทันสมัย	4.29	0.43	มาก
3. แอปพลิเคชันทำให้รู้สึกใกล้ชิดกับสถานที่ท่องเที่ยว	4.24	0.37	มาก
4. แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง	4.30	0.40	มาก
5. ภาพรวมท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน โมเดล 3 มิติ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (AR)	4.27	0.37	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการใช้งาน	4.30	0.35	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	4.29	0.44	มาก

จากตารางที่ 4 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามในช่วงอายุ 31 - 40 ปี สำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ มีความพึง

พอใจภาพรวมทุกด้านอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.29 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.44 เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า

ด้านเนื้อหา ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับ อธิบายข้อมูลชัดเจน ค่าเฉลี่ย 4.32 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.52 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการออกแบบ การตอบสนองของแอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการทำตามคำสั่งของผู้ใช้ ค่าเฉลี่ย 4.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.30 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการใช้งาน สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม สำหรับศึกษาหาความรู้ได้ ค่าเฉลี่ย 4.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.40 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจของผู้ตอบแบบสอบถาม 41 ปีขึ้นไป

ต่อการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม

สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	แปลผล
ด้านเนื้อหา			
1. ข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมครบถ้วน	4.19	0.78	มาก
2. ข้อมูลที่นำเสนอสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีความน่าสนใจ	4.36	0.53	มาก
3. ปริมาณข้อมูลที่นำเสนอมีความเหมาะสม	4.16	0.64	มาก
4. ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับ อธิบายข้อมูลชัดเจน	4.32	0.58	มาก
5. การนำเสนอข้อความ ภาพ และวิดีโอ มีความเหมาะสม	4.20	0.76	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านเนื้อหา	4.25	0.66	มาก
ด้านการออกแบบ			
1. แอปพลิเคชัน ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน	4.42	0.50	มาก
2. โมเดล 3 มิติ มีความสวยงาม สอดคล้องกับแหล่งท่องเที่ยวในแต่ละสถานที่	4.37	0.58	มาก
3. ภาพนิ่ง และวิดีโอที่ใช้ในแอปพลิเคชันมีความสวยงาม และน่าสนใจ	4.35	0.58	มาก
4. การตอบสนองของแอปพลิเคชันมีความรวดเร็วในการทำตามคำสั่งของผู้ใช้	4.26	0.65	มาก
5. ความเหมาะสมของรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในภาพรวม	4.32	0.54	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการออกแบบ	4.34	0.57	มาก
ด้านการใช้งาน			
1. สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม สำหรับศึกษาหาความรู้ได้	4.40	0.53	มาก
2. แอปพลิเคชันมีความแปลกใหม่และทันสมัย	4.42	0.61	มาก
3. แอปพลิเคชันทำให้รู้สึกใกล้ชิดกับสถานที่ท่องเที่ยว	4.25	0.72	มาก

รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล
4. แอปพลิเคชันสามารถนำไปใช้งานได้จริง	4.37	0.61	มาก
5. ภาพรวมท่านมีความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชัน โมเดล 3 มิติ เพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวโดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (AR)	4.40	0.53	มาก
ค่าเฉลี่ยด้านการใช้งาน	4.37	0.60	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	4.32	0.61	มาก

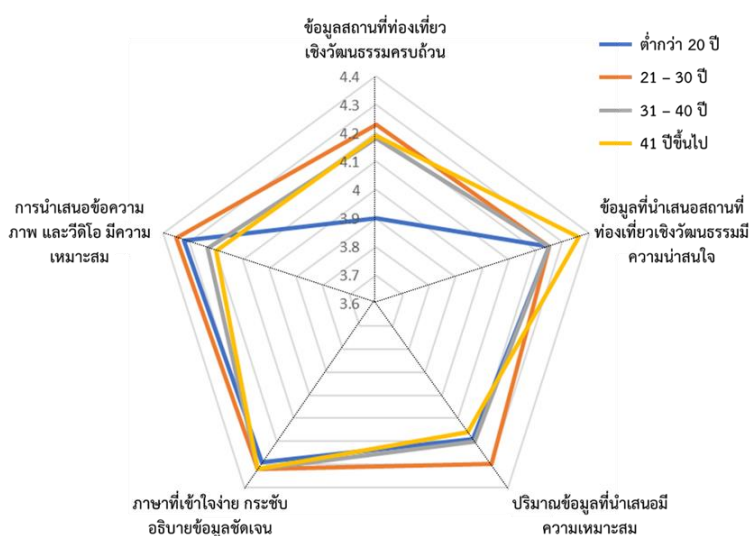
จากตารางที่ 5 พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามในช่วงอายุ 41 ปี ขึ้นไป สำหรับการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ มีความพึงพอใจภาพรวมทุกด้านอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.32 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.61 เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า

ด้านเนื้อหา ข้อมูลที่นำเสนอสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมีความน่าสนใจ ค่าเฉลี่ย 4.36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.53 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

ด้านการออกแบบ แอปพลิเคชัน ใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน ค่าเฉลี่ย 4.42 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

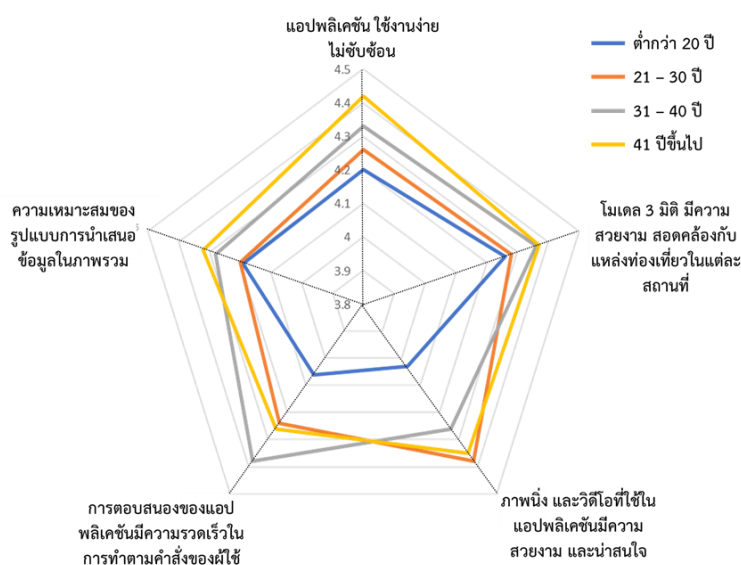
ด้านการใช้งาน แอปพลิเคชันมีความแปลกใหม่และทันสมัย ค่าเฉลี่ย 4.42 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.61 ความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก

เมื่อวิเคราะห์ความพึงพอใจแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ ทั้ง 3 ด้าน แยกตามอายุเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานและการเข้าถึงข้อมูล ความพึงพอใจด้านข้อมูล แสดงไว้ในรูปที่ 8 ด้านการออกแบบ แสดงไว้ในรูปที่ 9 และด้านการใช้งาน แสดงไว้ในรูปที่ 10



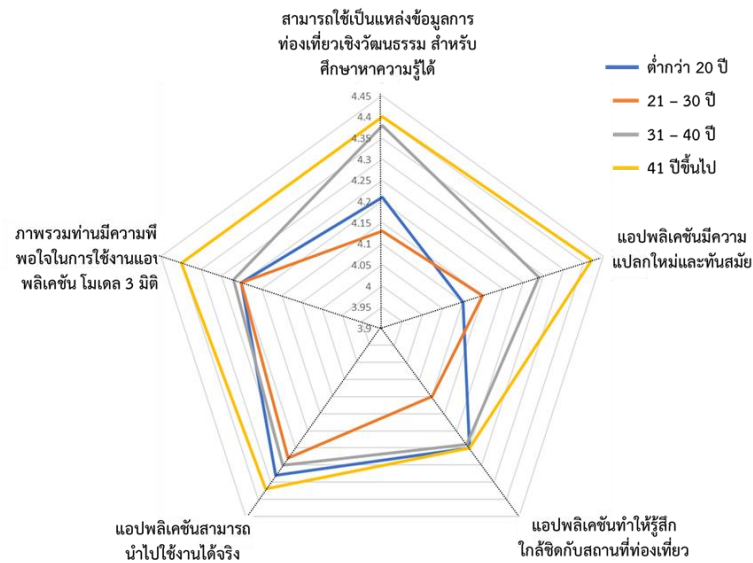
รูปที่ 8 ความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชัน ด้านข้อมูล

จากค่าในตารางที่ 2-5 เมื่อพิจารณาความพึงพอใจด้านข้อมูล ประกอบกับรูปที่ 8 พบว่า ช่วงอายุ 21 – 30 มีความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับสูงเกือบทุกด้าน แต่หัวข้อความสนใจของข้อมูลสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จะได้รับความสนใจในกลุ่มช่วงอายุ 41 ปีขึ้นไปมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมของผู้สูงอายุ [14] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมของนักท่องเที่ยวผู้สูงอายุกรณีศึกษาพญาศรีสัตตนาคราช จังหวัดนครพนม พบว่าช่วงอายุ 40 ปีขึ้นไปมีความสนใจข้อมูลท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมสูงสุด



รูปที่ 9 ความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชัน ด้านการออกแบบ

จากค่าในตารางที่ 2-5 เมื่อพิจารณาความพึงพอใจด้านการออกแบบ ประกอบกับรูปที่ 9 พบว่า ช่วงอายุต่ำกว่า 20 ปี มีความพึงพอใจด้านการออกแบบน้อยกว่าทุกช่วงอายุในทุกด้าน อาจเป็นเพราะมีการใช้ สีสัน ข้อความ ที่ไม่ดึงดูดและไม่เป็นที่ชื่นชอบในช่วงอายุนี้นี้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมสังคมออนไลน์ของช่วงอายุ [16] โดยพบว่าพฤติกรรมการใช้สื่อสังคมออนไลน์ เจนเนอเรชันซี (Generation Z) และ เจนเนอเรชันอัลฟา (Gen Alpha) มีความสนใจศานน้อย พฤติกรรมทำบุญตักบาตรไม่สนใจน้อย รวมถึงสิ่งต่างๆที่เกี่ยวข้องแอปพลิเคชันส่งเสริมด้านศาสนา แต่จะมีความสุขในการ แบ่งปัน เรื่องราว รูปภาพ และวิดีโอ ผ่านสื่อสังคมออนไลน์มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมสังคมออนไลน์ของช่วงอายุ [15] และทุกด้านช่วงอายุ 41 ปีขึ้นไป มีความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับสูงเกือบทุกด้าน แต่ด้านการตอบสนองของแอปพลิเคชันมีค่าน้อยกว่าช่วงอายุ 31 – 40 ปี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเลือกใช้ออปพลิเคชัน [16] แต่มีข้อสังเกตช่วงอายุ 31-40 ปี มีความพึงพอใจด้านการตอบสนองของแอปพลิเคชันสูงกว่าทุกช่วงอายุ อาจเป็นเพราะเป็นช่วงวัยที่มีประสบการณ์การใช้ออปพลิเคชันเพื่อการดำรงชีวิต การงาน อยู่เป็นประจำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่อง พฤติกรรมการเลือกใช้ออปพลิเคชันบนมือถือเคลื่อนที่สำหรับวัยกลาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเลือกใช้ออปพลิเคชัน [16] กล่าวไว้ว่าวัยกลางคน (30 – 50 ปี) มีความสนใจใช้งานแอปพลิเคชันในการดำรงชีวิตเพิ่มขึ้น โดยให้ความสำคัญต่อการตอบสนองการใช้งานที่รวดเร็ว



รูปที่ 10 ความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชัน ด้านการใช้งาน

จากค่าในตารางที่ 2-5 เมื่อพิจารณาความพึงพอใจด้านการใช้งาน ประกอบกับรูปที่ 10 พบว่า ช่วงอายุ 21 – 30 ปี มีความพึงพอใจด้านการใช้งานภาพรวมน้อยที่สุด เนื่องจากช่วงอายุนี้นี้เป็นช่วงที่มีการใช้การแอปพลิเคชันในการดำรงชีวิตเป็นหลัก แอปพลิเคชันนี้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการได้อย่างตรงจุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมสังคมออนไลน์ของช่วงอายุ [15] สำหรับช่วงอายุ 41 ปี ขึ้นไปมีความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับมาก และสูงกว่าทุกช่วงอายุในทุกด้าน เนื่องจากแอปพลิเคชันมีการออกแบบโดยใช้ภาพ เสียง โมเดล 3 มิติ และข้อความที่เหมาะสม เข้าใจง่าย มีความทันสมัย สามารถเป็นข้อมูลประกอบการท่องเที่ยวได้จริง รู้สึกเข้าถึงสถานที่นั้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเรื่องพฤติกรรมเลือกใช้แอปพลิเคชันบนมือถือเคลื่อนที่สำหรับวัยกลางของผู้วิจัย [16]

สรุปจากผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลในสถานที่จริง ผู้ใช้บริการ นักท่องเที่ยว และบุคคลทั่วไป ที่เข้าถึงแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม จังหวัดนนทบุรี 5 สถานที่ จำนวน 120 คน ด้วยวิธีการสุ่ม โดยแบ่งเป็นช่วงอายุ ได้แก่ 1) ต่ำกว่า 20 ปี 2) 21 - 30 ปี 3) 31 - 40 ปี 4) 41 ปีขึ้นไป มีค่าเฉลี่ยรวมทั้ง 4 ช่วงอายุอยู่ที่ 4.25 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.49 ความพึงพอใจภาพรวมอยู่ในระดับมาก

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA)

แหล่งความแปรปรวน (Source)	SS	df	MS	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม (Between Groups)	1.284	3	0.428	4.216	0.007*
ภายในกลุ่ม (Within Groups)	11.768	116	0.101		
รวม (Total)	13.052	119			

จากตารางที่ 6 พบว่า ค่า $F = 4.216$ และค่า $p\text{-value} = 0.007$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ .05 แสดงให้เห็นว่าระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างช่วงอายุ

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบรายคู่ (Post Hoc: Tukey's HSD)

กลุ่มเปรียบเทียบ	Mean Difference	p-value	สรุป
<20 vs 21-30	-0.06	0.412	ไม่แตกต่าง
<20 vs 31-40	-0.10	0.128	ไม่แตกต่าง
<20 vs 41+	-0.13	0.018*	แตกต่าง
21-30 vs 31-40	-0.04	0.536	ไม่แตกต่าง
21-30 vs 41+	-0.07	0.267	ไม่แตกต่าง
31-40 vs 41+	-0.03	0.621	ไม่แตกต่าง

* $p < .05$

จากตารางที่ 7 พบว่าความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD พบว่ากลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปีมีความพึงพอใจต่ำกว่ากลุ่มอายุ 41 ปีขึ้นไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.018$) ขณะที่กลุ่มอื่นไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

สรุปผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของระดับความพึงพอใจระหว่างช่วงอายุด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) พบว่า ความพึงพอใจด้านการออกแบบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05 ($p < .05$) เมื่อทำการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Tukey's HSD พบว่ากลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปีมีความพึงพอใจด้านการออกแบบต่ำกว่ากลุ่มอายุ 41 ปีขึ้นไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงพรรณนาที่พบว่ากลุ่มดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยต่ำสุด ยืนยันว่าความแตกต่างของระดับความพึงพอใจด้านการออกแบบระหว่างกลุ่มอายุไม่ได้เกิดจากความคลาดเคลื่อนของข้อมูล แต่เป็นความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมและความคาดหวังที่แตกต่างกันของผู้ใช้งานในแต่ละช่วงวัย โดยเฉพาะกลุ่มผู้ใช้งานอายุต่ำกว่า 20 ปีที่มีความคาดหวังต่อรูปแบบ UX/UI ในระดับสูงกว่ากลุ่มอื่น

6. สรุป

แอปพลิเคชันการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ เมื่อนำไปใช้งานจริงในพื้นที่ริมคลองอ้อมนนท์ อำเภอบางกรวย จังหวัดนนทบุรี และผู้ใช้งานให้การตอบแบบสำรวจความพึงพอใจแบ่งตามช่วงอายุพบว่า

ส่วนที่ 1 ความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วย เทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ ในแต่ละช่วงอายุ

- 1) อายุต่ำกว่า 20 ปี : 4.19 ± 0.47 ระดับ พอใจมาก
- 2) อายุ 20 – 30 ปี : 4.25 ± 0.42 ระดับ พอใจมาก
- 3) อายุ 31 - 40 ปี : 4.29 ± 0.44 ระดับ พอใจมาก
- 4) อายุ 41 ปี ขึ้นไป : 4.32 ± 0.61 ระดับ พอใจมาก

ความพึงพอใจในภาพรวม : 4.25 ± 0.49 โดยกลุ่มอายุ 41 ปี ขึ้นไปมีความพึงพอใจสูงสุด

ส่วนที่ 2 ความพึงพอใจการใช้งานแอปพลิเคชันท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วย เทคโนโลยีความจริงเสริม สำหรับแหล่งท่องเที่ยวในจังหวัดนนทบุรี กรณีศึกษา 5 สถานที่ ทั้ง 3 ด้านเมื่อเปรียบเทียบทุกช่วงอายุ

1) ด้านเนื้อหา : ช่วงอายุ 21-30 ปี มีความพึงพอใจภาพรวมมากที่สุด ส่วนอายุ 41 ปีขึ้นไปจะให้ความพึงพอใจข้อมูลที่น่าสนใจสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมมากที่สุด

2) ด้านการออกแบบ : ช่วงอายุต่ำกว่า 20 ปีมีความพึงพอใจน้อยสุดในทุกด้าน ส่วนอายุ 41 ปี ขึ้นไปมีความพึงพอใจภาพรวมสูงทุกด้าน

3) ด้านการใช้งาน : ช่วงอายุ 41 ปีขึ้นไปมีความพึงพอใจภาพรวมสูงสุดในทุกด้าน

ผลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้ใช้งานแอปพลิเคชันฯ ช่วงอายุต่ำกว่า 20 ปี พบว่ามีความพึงพอใจด้านการออกแบบน้อยกว่าทุกช่วงอายุในทุกด้าน อาจเป็นเพราะมีการใช้สีสัน ข้อความ และองค์ประกอบกราฟิกที่ยังไม่สอดคล้องกับความสนใจของผู้ใช้งานในช่วงวัยดังกล่าว เมื่อพิจารณาเชิงพฤติกรรมพบว่ากลุ่มผู้ใช้งานอายุต่ำกว่า 20 ปี มีความคุ้นเคยกับเทคโนโลยีดิจิทัลในระดับสูง และมีประสบการณ์ใช้งานแอปพลิเคชันที่มีรูปแบบการออกแบบที่ทันสมัย เช่น แอปโซเชียลมีเดียและเกม ซึ่งมักเน้นกราฟิกที่มีความโดดเด่น การเคลื่อนไหว และการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ ดังนั้นระดับความพึงพอใจด้านการออกแบบที่ต่ำกว่ากลุ่มอื่นจึงไม่ได้สะท้อนถึงคุณภาพของระบบที่ต่ำ แต่สะท้อนถึงความคาดหวังด้าน UX/UI ที่สูงกว่าของผู้ใช้งานกลุ่มนี้ ในเชิงการออกแบบระบบ (System Design Implication) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาแอปพลิเคชันในอนาคตควรเพิ่มองค์ประกอบด้านประสบการณ์ผู้ใช้ เช่น การออกแบบ Motion UI การใช้สีและ Typography ที่ทันสมัย การเพิ่ม Gamification และการออกแบบ Interaction ที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้งานกลุ่มเยาวชน

ในการพัฒนาระบบด้วยการใช้เทคโนโลยี AR ร่วมกับการแสดงผลโมเดล 3 มิติ ให้ได้ซึ่งแอปพลิเคชันการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม มีส่วนสำคัญในการเพิ่มระดับการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน และความเข้าใจในเนื้อหา เนื่องจากผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกับข้อมูลได้โดยตรงผ่านการสแกนภาพ และการแสดงผลแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสบการณ์เสมือนจริงให้กับผู้ใช้งาน ผลการวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมโยงระหว่างความต้องการของผู้ใช้งาน กับการออกแบบระบบมีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของแอปพลิเคชัน โดยการนำข้อมูลจากการศึกษาความต้องการมาพัฒนาเป็นฟังก์ชันการทำงาน เช่น การแสดงผลโมเดล 3 มิติ และการนำเสนอข้อมูลแบบมัลติมีเดีย ส่งผลให้ระบบสามารถตอบสนองต่อบริบทของการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ ในเชิงประโยชน์ต่อชุมชน แอปพลิเคชันดังกล่าวสามารถเป็นเครื่องมือในการเผยแพร่อัตลักษณ์และคุณค่าทางวัฒนธรรมของท้องถิ่นให้เป็นที่รู้จักในวงกว้าง ส่งผลต่อการเพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจของชุมชน เช่น การเพิ่มจำนวนผู้เข้าชมแหล่งท่องเที่ยวจากการนำเสนอข้อมูลที่น่าสนใจและเข้าถึงได้ง่าย การสร้างรายได้ การกระตุ้นการใช้จ่ายในพื้นที่ และการสนับสนุนผลิตภัณฑ์หรือบริการในพื้นที่ ในเชิงนโยบาย ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล โดยหน่วยงานภาครัฐหรือองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นสามารถนำรูปแบบแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนประชาสัมพันธ์ การบริหารจัดการแหล่งท่องเที่ยว และการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Smart Tourism) ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

แอปพลิเคชันดังกล่าวสามารถส่งเสริมรายได้ให้กับชุมชนผ่านกลไกทางเศรษฐกิจหลายประการ ได้แก่ การเพิ่มจำนวนผู้เข้าชมแหล่งท่องเที่ยวจากการนำเสนอข้อมูลที่น่าสนใจและเข้าถึงได้ง่าย การกระตุ้นการใช้จ่ายในพื้นที่ เช่น ร้านค้าและบริการในชุมชน การเพิ่มมูลค่าให้กับแหล่งท่องเที่ยวผ่านประสบการณ์เสมือนจริงด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR) รวมถึงการเป็นช่องทางประชาสัมพันธ์ดิจิทัลที่ช่วยขยายการรับรู้ไปยังนักท่องเที่ยวในวงกว้าง ซึ่งส่งผลให้เกิดการกระจายรายได้และสนับสนุนเศรษฐกิจฐานรากของชุมชนอย่างยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 ในจังหวัดนนทบุรีมีสถานที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมอีกมาก หากเป็นไปได้อยากให้มีการพัฒนาแอปพลิเคชันการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมให้ครอบคลุมพื้นที่ในจังหวัดนนทบุรี เพื่อต่อยอดการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวที่สำคัญให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น สามารถส่งเสริมการสร้างรายได้ให้กับชุมชนในแหล่งท่องเที่ยวนั้นๆ และควรมีการวิจัยหรือพัฒนาเกี่ยวกับแอปพลิเคชันส่งเสริมการท่องเที่ยวในรูปแบบอื่นๆ เช่น การท่องเที่ยวสายสุขภาพ การท่องเที่ยวสายมู การท่องเที่ยวสายชา-กาแฟ การท่องเที่ยวร้านอาหาร ฯลฯ เพื่อพัฒนาต้นแบบไปสู่การต่อยอดอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวอัจฉริยะในระดับประเทศ ในลำดับต่อไป

7.2 แนวทางพัฒนาสำหรับกลุ่มอายุต่ำกว่า 20 ปี สำหรับกลุ่มผู้ใช้งานอายุต่ำกว่า 20 ปี ซึ่งมีความพึงพอใจด้านการออกแบบต่ำกว่ากลุ่มอื่น งานวิจัยนี้เสนอแนวทางในการพัฒนาแอปพลิเคชันในอนาคตเพื่อเพิ่มความสนใจในการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมดังนี้

7.2.1 การเพิ่มองค์ประกอบแบบ Gamification เช่น ระบบสะสมคะแนน (Point System) ภารกิจ (Mission-based Learning) หรือ Badge เพื่อสร้างแรงจูงใจในการใช้งาน

7.2.2 การพัฒนาเนื้อหาในรูปแบบ Storytelling หรือ Interactive Narrative เพื่อเชื่อมโยงประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมให้มีความน่าสนใจมากขึ้น

7.2.3 การออกแบบ UX/UI ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้งานยุคดิจิทัล เช่น การใช้ Motion Design, Micro-interaction และกราฟิกที่มีความทันสมัย

7.2.4 การเชื่อมต่อกับแพลตฟอร์มโซเชียลมีเดีย เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถแชร์ประสบการณ์หรือเนื้อหาจากแอปพลิเคชันได้ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้งานในกลุ่ม Generation Z และ Generation Alpha

7.2.5 การพัฒนา AR ให้มีลักษณะเสมือนจริงมากขึ้น (Immersive AR) เช่น การใช้เสียงประกอบแบบ Spatial Audio หรือการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ที่ซับซ้อนขึ้น

แนวทางดังกล่าวจะช่วยปรับปรุงแบบการนำเสนอให้สอดคล้องกับพฤติกรรมและความคาดหวังของผู้ใช้งานกลุ่มเยาวชน ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มระดับความสนใจต่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในระยะยาว

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ รวมถึงขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถาม และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในพื้นที่การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมจังหวัดนนทบุรี ให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. B. Leau, W. K. Loo, W. Y. Tham, and S. F. Tan, "Software development life cycle AGILE vs traditional approaches," in *International Conference on Information and Network Technology*, 2012, pp 162–167. [Online]. Available: <https://ku-fpg.github.io/files/agile-traditional.pdf>
- [2] ภาณุวัฒน์ เรืองกุลทรัพย์, ศรัณยู บุตรโคตร, และ อธิชัย อินฺทุพเท, "การพัฒนาสื่อแอปพลิเคชันบน อุปกรณ์เคลื่อนที่สำหรับการเรียนรู้คำศัพท์ภาษาญี่ปุ่นระดับพื้นฐานด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม," *วารสารวิชาการและวิจัยมหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, หน้า 298–312, เม.ย.–มิ.ย. 2565. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/neuarj/article/view/258580/175896>
- [3] เบญญา พัฒนาพิภพ และนัจฉก มีอุสาห์, "การพัฒนาสื่อการเรียนรู้เพื่อส่งเสริมกระบวนการคิดเชิงสร้างสรรค์ในการสร้างสื่อยุคดิจิทัลร่วมกับเทคโนโลยีความเป็นจริงเสริม (AR)," *วารสารมหาวิทยาลัยศิลปากร (สังคมศาสตร์ มนุษยศาสตร์ และศิลปะ)*, ปีที่ 42, ฉบับที่ 1, หน้า 15–30, ม.ค.–ก.พ. 2565, doi: 10.14456/sujthai.2022.2.
- [4] คลังความรู้ SciMath สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.), "Virtual Reality เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน," เข้าถึงเมื่อ: 20 ต.ค. 2568. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://www.scimath.org/article-technology/item/4818-virtual-reality>
- [5] Azuma, R. T, "A survey of augmented reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, Aug. 1997, doi: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

- [6] ภทรพรรณ กุลด้วง, ต้นศักดิ์ สนิตนาม และ สุวัตร์ ผาทอง, “การพัฒนาสื่อการเรียนรู้เทคโนโลยีเสมือนจริง ภูมิศาสตร์ เพื่อส่งเสริมผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนภูมิศาสตร์ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3,” *วารสารสหวิทยาการวิจัยและนวัตกรรมการศึกษา*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, หน้า 33–42, ก.ค.–ธ.ค. 2566. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so08.tci-thaijo.org/index.php/JIREI/article/view/2112>
- [7] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual reality technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Wiley-IEEE Press, 2003.
- [8] พจนศิริพันธ์ ลิ้มปิ่นทน, “การส่งเสริมแหล่งท่องเที่ยวจังหวัดมหาสารคามโดยใช้เทคโนโลยีเสมือนจริง,” *วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม*, ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 8–16, ม.ค.–มิ.ย., 2562. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/abc/article/view/54197>
- [9] บุญเลิศ จิตตั้งวัฒนา, *อุตสาหกรรมการท่องเที่ยว*, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: เพรสแอนด์ดีไซน์, 2548.
- [10] นุชนารถ รัตนสูงศักดิ์ชัย, “กลยุทธ์การพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม,” *บทความในวารสารมนุษยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 1, หน้า 31–50, ม.ค.–มิ.ย. 2554. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/abc/article/view/54197>
- [11] กาญจนา สุคันธสิริกุล, “การพัฒนาคุณภาพการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ,” *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี*, 2556. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/6225/2/Fulltext.pdf>
- [12] ชัยชาญ ปฐมกาญจนา และ นรินทร์ สังข์รักษา, “แนวทางการส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมแบบมีส่วนร่วมของชุมชนตลาดบางหลวง อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม,” *วารสารวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 1, หน้า 118–129, 2558, doi: 10.14456/asj-psu.2015.2.
- [13] บุญชม ศรีสะอาด, *การวิจัยเบื้องต้น*, พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น, 2545.
- [14] วรวิสา ยุระรัตน์, รินลดา อามาศย์สมบัติ และ สุรารักษ์ ศรีลาศักดิ์, “ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมของนักท่องเที่ยวผู้สูงอายุ กรณีศึกษาพญาศรีสัตตนาคราช จังหวัดนครพนม,” *วารสารศิลปะศาสตร์ราชชมงคลพระนคร*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, หน้า 19–31, ม.ค.–มิ.ย. 2567. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so07.tci-thaijo.org/index.php/LiberaU/article/view/5201>
- [15] อติพล เอื้อจรัสพันธุ์, “พฤติกรรมการใช้สื่อสังคมออนไลน์ ทศนคติ ความพึงพอใจ และความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสื่อสังคมออนไลน์ของคนรุ่นใหม่เนอเรนซ์ X เนอเรนซ์ Y และเนอเรนซ์ Z,” *วารสารวิจัยสหวิทยาการนานาชาติ PSAKU*, เล่มที่ 10, ฉบับที่ 2, หน้า 44–58, 2564. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/PSAKUIJR/article/view/255898>
- [16] จันทรา แซ่เตียว และสุริรัตน์ อินทร์หม้อ, “พฤติกรรมการเลือกใช้อุปกรณ์เคลื่อนที่สมาร์ทโฟนสำหรับวัยกลางคน,” *วารสารรัชต์ภาคย์*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 23, หน้า 43–52, พ.ค.–ส.ค. 2560. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้: <https://so05.tci-thaijo.org/index.php/RJPJ/article/view/171870/123387>

Analysis of an SVIR Epidemic Model with Vaccination and Nonlinear Incidence

Satchukorn Dueannuan¹ and Ekkachai Kunnawuttipreechachan^{1*}

¹Department of Mathematics, Faculty of Applied Science,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok
Corresponding Author Email : ekkachai.k@sci.kmutnb.ac.th

Received 11 March 2026

Revised 6 May 2026

Accepted 11 May 2026

Abstract

This paper studies an SVIR epidemic model that incorporates vaccination and a nonlinear incidence term to represent behavioral responses and saturation in disease transmission. The population was divided into four classes—susceptible, vaccinated, infectious, and recovered states—and both vaccine-induced and naturally acquired immunity were allowed to wane, so that individuals could return to the susceptible class. The original model is an SIR model with nonmonotone incidence. Then we added a vaccinated compartment and assumed imperfect vaccination, meaning that vaccinated individuals may still become infected at a reduced rate. We derived the disease-free and endemic equilibria and computed the basic reproduction number R_0 by the next-generation method, obtaining a threshold that separated disease elimination from persistence. Stabilities of the equilibria were investigated under appropriate parameter conditions using Jacobian and Routh–Hurwitz criteria. Numerical simulations then illustrated how changes in the vaccination rate and other key parameters shaped the long-term dynamics, including convergence to a disease-free equilibrium or approach to an endemic equilibrium with a nonzero infectious population. The findings indicated that maintaining vaccination coverage above a critical level was essential to keep $R_0 < 1$ and prevented sustained endemic transmission in the presence of nonlinear incidence and waning immunity.

Keywords: SVIR Model, Basic Reproduction Number, Disease-free Equilibrium, Endemic Equilibrium, Global Stability

1. Introduction

Epidemiology studies factors affecting population health and illness, analyzing disease outbreaks, distribution, causes, and prevention methods at population level. With easy travel and

population movement today, diseases spread rapidly as seen in COVID-19, tuberculosis, dengue, chickenpox, and hand-foot-mouth outbreaks. These situations require mathematical modeling for single or multiple populations across regions, using classical SIR, SEIR, SIRS models [1], [2], [3], [4]. Compared with the classical SIR model, the proposed SVIR model includes a vaccinated compartment to represent individuals who have received vaccination but may still become infected because the vaccine is not fully protective or because immunity wanes over time. This extension is important in real epidemiological settings, since vaccination does not always eliminate infection completely and recovered or vaccinated individuals may later return to the susceptible class. Therefore, the SVIR model provides a more realistic description of disease transmission under vaccination than the classical SIR model. In addition, mathematical models are now widely used as quantitative tools to support public health policy, for example to evaluate vaccination strategies, identify high-risk groups, and estimate the effort required to eliminate infection from a population. They have played an important role in real outbreaks such as the 2009 influenza pandemic, the West Africa Ebola epidemic, and the COVID-19 pandemic by providing estimates of the basic reproduction number and assessing the impact of interventions like isolation, quarantine, and social distancing. Recent studies also emphasize that nonlinear incidence terms are needed to capture behavioral responses, media influence, and saturation of contacts, which cannot be described adequately by simple bilinear incidence. For vaccination, SVIR- and SVEIR-type models have been developed to study the combined effects of vaccine efficacy, waning immunity, and optimal vaccination policies on long-term disease dynamics.

A key component of epidemic modeling is the infection incidence rate, which is often assumed to follow a constant contact structure. However, real-world behavioral changes and contact saturation can lead to nonlinear transmission patterns. Capasso et al. [5] first proposed $\beta(I) = (kI)/(1 + \alpha I)$ a nonlinear incidence function to describe saturation effects, and Ruan et al. [6] examined generalized forms such as $g(I)S = (kI^2S)/(1 + \alpha I^2)$. Xiao et al. [7] stated the SIR model with nonmonotone incidence rate. In that model, vaccination was not included, and the analysis focused on how behavioral responses alone affect the global dynamics of disease transmission. In contrast, the present study incorporates a vaccinated compartment into the same incidence framework, leading to an SVIR system with imperfect vaccination and waning immunity. This extension allows us to investigate how vaccination coverage interacts with nonlinear incidence to determine whether the disease is eliminated or persists at an endemic equilibrium, and to identify critical vaccination levels separating these regimes. The model without vaccination stated by Xiao et al. [7] is

$$\frac{dS}{dt} = b - \frac{kIS}{1 + \alpha I^2} - dS + \gamma R, \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{kIS}{1 + \alpha I^2} - (d + \mu)I, \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \mu I - (d + \gamma)R. \quad (3)$$

The classic SIR neglects vaccination effects crucial for influenza, COVID-19 control. Recent vaccination models also address imperfect vaccines, waning immunity, and the possibility of reinfection among vaccinated individuals. Yang et al. [8] studied a vaccination model with varying population and imperfect vaccination, showing that vaccination coverage strongly affects disease eradication and persistence. Velasco-Hernández and co-authors [9] also demonstrated that vaccination can alter the number and stability of endemic equilibria. Motivated by these studies, the present work combines nonlinear incidence with vaccination and waning immunity in an SVIR framework, allowing both threshold analysis and a clearer investigation of how vaccination coverage influences long-term disease dynamics. In contrast to the original SIR framework of Xiao et al. [7], the present model incorporates a vaccinated compartment and thus provides a more realistic description of disease transmission under imperfect vaccination.

2. Scope of the Study

In this work, we construct and analyze a mathematical SVIR epidemic model, with compartments representing Susceptible (S), Vaccinated (V), Infectious (I), and Recovered (R) populations. We find the model's equilibria and investigate the basic reproduction number R_0 of the model. Finally, to illustrate the theoretical results, we show some results with a mathematical program.

3. Theoretical Background

3.1 Equilibrium Points and Stability.

A point $\tilde{x}$ is an equilibrium point of $\dot{x} = f(x)$ if $f(\tilde{x}) = 0$. The equilibrium is stable if solutions starting sufficiently close remain close for all future time; it is asymptotically stable if, in addition, solutions converge to $\tilde{x}$ as $t \rightarrow \infty$ otherwise it is unstable [10].

3.2 Basic Reproduction Number.

The basic reproduction number R_0 is the expected number of secondary infections produced by a single infected individual in a fully susceptible population. The disease-free equilibrium (DFE) is asymptotically stable if $R_0 < 1$ and unstable if $R_0 > 1$. When $R_0 \ll 1$ the disease dies out rapidly; when $R_0 \gg 1$ it spreads rapidly. If $R_0 \approx 1$, then the dynamics change slowly [10].

3.3 Linearization and Jacobian Analysis.

To analyze local stability, the nonlinear system $\dot{x} = f(x)$ is linearized about an equilibrium point $\tilde{x}$ via a first-order Taylor expansion, yielding the linearized system $\dot{u} = Ju$, where $J = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\tilde{x}}$ is the Jacobian matrix. The equilibrium is asymptotically stable if all eigenvalues of J have negative real parts, and unstable if any eigenvalue has a positive real part [10].

3.4 Routh-Hurwitz Criteria.

For a characteristic polynomial $P(\lambda) = \lambda^k + a_1\lambda^{k-1} + a_2\lambda^{k-2} + \dots + a_k$, the Routh-Hurwitz

criteria provide necessary and sufficient conditions, expressed as determinant inequalities $\Delta_i > 0$ ($i=1,2,3,4$) on the Hurwitz matrices, for all roots to have negative real parts. In this work, we apply the criteria for the case $n = 4$, requiring $\Delta_i > 0$ for $i=1,2,3,4$, which guarantees asymptotic stability of the equilibrium [10].

4. The SVIR model

A chart of the dynamics of the SVIR model is shown in Fig. 1. Our model is built on the SIR system with nonmonotone incidence proposed by Xiao et al. [7], but we add a vaccinated class V to represent individuals who have received an imperfect vaccine and may still be infected at a reduced rate. Recovered individuals lose immunity and return to the susceptible class, so that both vaccine-induced and naturally acquired immunity can wane over time. These additional flows modify the threshold structure of the original SIR model and introduce the vaccination rate v as a key controllable parameter in the basic reproduction number. The system of equations for the SVIR model that we use is given in Eqs. (4)–(7). Definitions of the parameters in the model are given in Table. 1. This study extends the SIR model of Xiao et al., given in Eqs. (1)–(3), by introducing a vaccinated compartment V to account for imperfect vaccination and waning immunity.

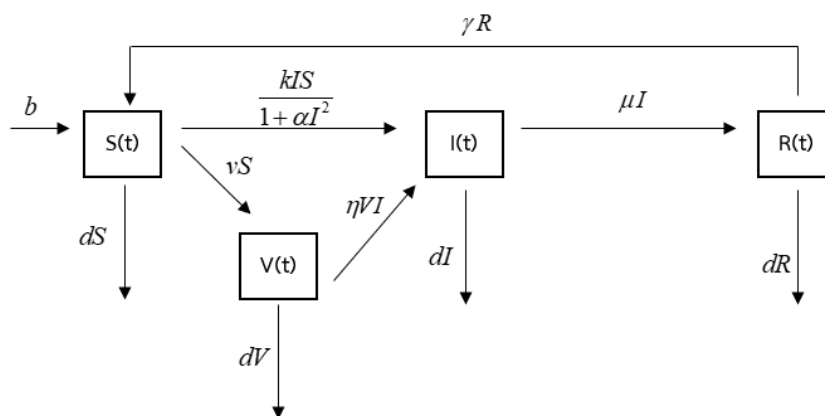


Fig. 1 The flow chart of the SVIR model.

Table. 1 Parameters for the SVIR model (rates are per day).

Parameter	Definition
b	Recruitment rate into the susceptible class (births or immigration)
k	Transmission (contact) rate from infectious to susceptible individuals
α	Saturation (crowding) parameter in the nonlinear incidence term
d	Natural death rate for all living classes
γ	Recovery rate from infectious to recovered class
μ	Loss of immunity rate from recovered to susceptible class
v	Vaccination rate of susceptible individuals
η	Infection rate of vaccinated individuals due to imperfect/waning immunity

The model to be studied takes the following form:

$$\frac{dS}{dt} = b - \frac{kIS}{1 + \alpha I^2} - dS - \nu S + \gamma R, \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dt} = \nu S - \eta VI - dV, \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{kIS}{1 + \alpha I^2} + \eta VI - (d + \mu)I, \quad (6)$$

$$\frac{dR}{dt} = \mu I - (d + \gamma)R, \quad (7)$$

With the initial conditions $S(0) > 0, V(0) > 0, I(0) > 0, R(0) > 0$. The total population at time t is $N = S + V + I + R$, so we have $\frac{dN}{dt} = b - dN$. Hence, it is deduced that N is positive and bounded inside a set $\left\{ (S, E, I, R) \in R_+^4 : 0 \leq N(t) \leq \frac{b}{d} \right\}$.

4.1. Equilibrium analysis

From Eqs. (4)–(7) equilibrium states:

$$1. \text{ Disease-free: } (S_0, V_0, I_0, R_0) = \left(\frac{b}{d + \nu}, \frac{\nu b}{d(d + \nu)}, 0, 0 \right). \quad (8)$$

$$2. \text{ Endemic: } (S^*, V^*, I^*, R^*) = \left(\frac{d + \mu}{H(I^*)}, \frac{\nu}{\eta I^* + d} \cdot \frac{d + \mu}{H(I^*)}, I^*, \frac{\mu}{(d + \gamma)} I^* \right). \quad (9)$$

where

$$H(I^*) = \frac{k}{1 + \alpha I^{*2}} + \frac{\eta \nu}{\eta I^* + d}. \quad (10)$$

The equilibrium points are solutions of the system of nonlinear algebraic equations obtained by setting $\frac{dS}{dt} = \frac{dV}{dt} = \frac{dI}{dt} = \frac{dR}{dt} = 0$ in Eqs. (4) - (7).

We start by solving the system of nonlinear algebraic equations for S^*, V^*, I^* and R^* in

terms of I^* to obtain the expressions in (8)–(9). Then, substituting these expressions into (4), we obtain

$$\frac{kI^*}{1+\alpha I^{*2}} \frac{d+\mu}{H(I^*)} = b - (d+\nu) \frac{d+\mu}{H(I^*)} + \frac{\gamma\mu}{(d+\gamma)} I^*. \quad (11)$$

Therefore, there are two possible values for I^* , namely $I_1^* = 0$ and the value I_2^* given in (9). The proof is complete.

4.2 Basic reproduction number and stability of the equilibria

From Eqs. (4)–(7) always has a disease-free equilibrium point in which no infected individual is present. The disease-free equilibrium is $E_0 = (b/(d+\nu), \nu b/(d^2+dv), 0, 0)$. We define the basic reproduction number R_0 using the next-generation method. Thus R_0 defined as the spectral radius of the next generation matrix FV^{-1} with F and V are the Jacobian matrices of F and V at the disease-free equilibrium point, where

$$F(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{kIS}{1+\alpha I^2} + \eta VI \\ 0 \end{bmatrix}, V(X) = \begin{bmatrix} -dS - \nu S + \gamma R - b + \frac{kIS}{1+\alpha I^2} \\ \nu S - \eta VI - dV \\ (d+\mu)I \\ -\mu I + (d+\gamma)R \end{bmatrix}. \quad (12)$$

The basic reproduction number is given by

$$R_0 = \frac{k \frac{b}{d+\nu} + \eta \frac{\nu b}{d(d+\nu)}}{d+\mu} = \frac{b}{(d+\nu)(d+\mu)} \left(k + \frac{\eta\nu}{d} \right). \quad (13)$$

The local stability of the disease-free equilibrium point is given in the following theorem.

Theorem 1. If $R_0 < 1$ then the disease-free equilibrium is locally asymptotically stable. If $R_0 > 1$ then the disease-free equilibrium is unstable.

Jacobian matrix at an equilibrium point (S^*, V^*, I^*, R^*) given by:

$$J^* = \begin{bmatrix} -\frac{kI^*}{1+\alpha I^{*2}} - d - \nu & 0 & -\frac{kS^*(1-\alpha I^{*2})}{(1+\alpha I^{*2})^2} & \gamma \\ \nu & -(d+\eta I^*) & -\eta V^* & 0 \\ \frac{kI^*}{1+\alpha I^{*2}} & \eta I^* & -\frac{kS^*(1-\alpha I^{*2})}{(1+\alpha I^{*2})^2} + \eta V^* - (d+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & \mu & -(d+\gamma) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

The eigenvalues of J^* are the solutions of the characteristic equation

$$P(\lambda) = \det(J^* - \lambda I) = 0. \quad (15)$$

The characteristic equation is a polynomial of degree 4:

$$\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0, \quad (16)$$

where

$$a_1 = \frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} + (d + v) + d + \eta I^* + \mu - \eta V^* + (d + \gamma) + \mu, \quad (17)$$

$$a_2 = \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} + (d + v) \right] \left[\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} + \eta V^* - (d + \mu) \right] - \left[-\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} \right] \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} \right] \quad (18)$$

$$+ (d + \gamma)\mu + a_1\mu + a_1(d + \gamma),$$

$$a_3 = \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} + (d + v) \right] \left[\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} + \eta V^* - (d + \mu) \right] - \left[-\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} \right] \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} \right] \mu$$

$$+ \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} + (d + v) \right] \left[\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} + \eta V^* - (d + \mu) \right] (d + \gamma) \quad (19)$$

$$- \left[-\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} \right] \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} \right] (d + \gamma) + a_1\mu(d + \gamma),$$

$$a_4 = \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} + (d + v) \right] \left[\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} + \eta V^* - (d + \mu) \right] \mu(d + \gamma) \quad (20)$$

$$- \left[-\frac{kS^*(1 - \alpha I^{*2})}{(1 + \alpha I^{*2})^2} \right] \left[\frac{kI^*}{1 + \alpha I^{*2}} \right] \mu(d + \gamma),$$

the coefficients a_1, a_2, a_3, a_4 are given in (17) - (20). It can be shown that $a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0, a_1a_2 > a_3$ and $a_1a_2a_3 - a_3^2 - a_1^2a_4 > 0$ whenever $R_0 < 1$. By the Routh-Hurwitz criterion for a quartic polynomial, these inequalities imply that all eigenvalues of J^* have negative real parts, and hence the equilibrium point is locally asymptotically stable for $R_0 < 1$. Conversely, when $R_0 > 1$ we obtain $a_4 < 0$, so the Routh-Hurwitz conditions are violated and at least one eigenvalue of J^* has positive real part, therefore the equilibrium point is unstable for $R_0 > 1$.

5. Numerical results

In this section, we present numerical simulations of the SVIR model to illustrate how vaccination alters the long-term effects of the nonlinear incidence on disease transmission. Using a parameter set similar to that considered by Xiao et al. [7] for a generic directly transmitted infection, we vary the vaccination rate ν to explore two qualitatively different regimes: a disease-free regime with high vaccination coverage and an endemic regime with reduced coverage. This approach highlights scenarios that do not arise in the original SIR framework without vaccination and makes it possible to quantify the critical vaccination level required for disease elimination. Using the parameter set in Table. 1 and two values of the vaccination rate ν corresponding to the disease-free and endemic regimes, we compute time-dependent solutions of the Eqs. (4)–(7) and the associated basic reproduction number and sensitivity indices. The results show that increasing the vaccination rate reduces the effective reproduction number below one, drives the infectious class to zero, and accelerates convergence to a disease-free equilibrium, whereas low vaccination coverage allows persistent oscillatory outbreaks around an endemic equilibrium.

The parameter values in Table. 2 are adapted primarily from Xiao et al. [7], while the vaccination-related parameter ν is varied in this study to examine the impact of vaccination coverage on the qualitative dynamics of the SVIR model. We will use these SVIR model parameters for a generic infectious disease outbreak. Also, we use $\nu = 0.6$ which gives the disease-free equilibrium and $\nu = 0.35$ which gives the endemic equilibrium.

Table. 2 Parameter values for SVIR.

Parameter	Value	unit
b	1	none
k	0.20	day ⁻¹
d	0.20	day ⁻¹
γ	0.30	day ⁻¹
μ	0.15	day ⁻¹
η	0.001	day ⁻¹
α	4	none

Substituting the parameters in Table. 2 into the system of differential equations for disease transmission in Eqs. (4)–(7), we obtain

$$\frac{dS}{dt} = 1 - \frac{0.2IS}{1 + 4I^2} - 0.2S - \nu S + 0.3R, \quad (21)$$

$$\frac{dV}{dt} = \nu S - 0.001VI - 0.2V, \quad (22)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{0.2IS}{1+4I^2} + 0.001VI - (0.2+0.15)I, \quad (23)$$

$$\frac{dR}{dt} = 0.15I - (0.2+0.3)R, \quad (24)$$

For the first set of initial conditions, we use the values given in Xiao et al. [7].

$$S(0) = 4, V(0) = 1, I(0) = 2, R(0) = 1. \quad (25)$$

5.1. Disease-free equilibrium point and asymptotic stability

For the parameter values in Table. 2 and the vaccination rate $\nu = 0.6$, the disease-free equilibrium point is

$$(S^*, V^*, I^*, R^*) = (1.25, 3.75, 0, 0), \quad (26)$$

so only the disease-free equilibrium exists and no endemic equilibrium is present. The disease-free and basic reproduction numbers are:

$$R_0 = 0.725 < 1. \quad (27)$$

That is, the disease-free equilibrium is locally asymptotically stable, whereas the state in which the whole population is susceptible (without vaccination) is unstable.

These conclusions can also be checked by using MATLAB to compute the eigenvalues for the disease-free equilibrium. The eigenvalues are:

$$\lambda_1 = -0.2, \lambda_2 = -0.8, \lambda_3 = -0.5, \lambda_4 = -0.09625. \quad (28)$$

Since the real parts of all eigenvalues for the disease-free equilibrium are negative, the disease-free equilibrium state will be locally asymptotically stable.

5.2. Dynamical solutions for disease-free equilibrium

Using the MATLAB program, we computed time-dependent solutions of system (21)–(24) for the initial conditions given above. The trajectories in Fig. 2 show that, for all initial conditions, the solutions approach a disease-free equilibrium state; the I and R populations tend to zero, while the S and V populations converge to the steady states $S^* = 1.25$ and $V^* = 3.75$, respectively. Since some initial conditions are far from the equilibrium, this suggests that the disease-free equilibrium is asymptotically stable for these parameter values. This pattern agrees with the basic reproduction number $R_0 = 0.725 < 1$.

5.3. Sensitivity Analysis of the Basic Reproduction Number

In this section we study how the basic reproduction number R_0 of the SVIR model changes when the parameters b, d, v, k, η, μ vary. The goal is to identify which parameters have the strongest effect on disease transmission. We use the normalized (dimensionless) sensitivity index, which allows us to compare the influence of parameters with different units and scales.

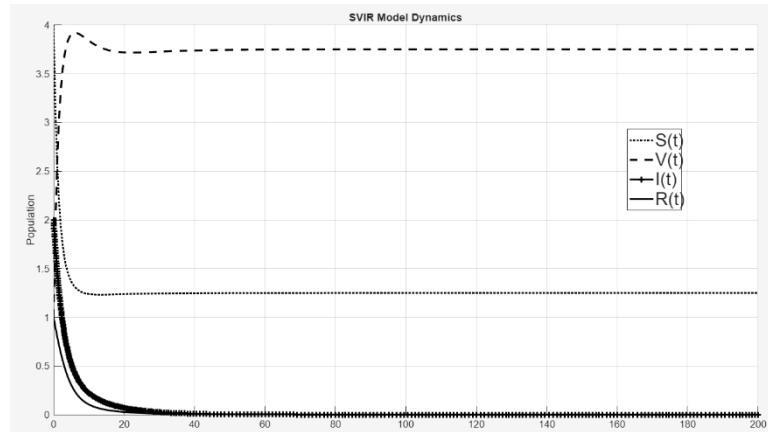


Fig. 2 Example of convergence to a disease-free equilibrium for initial conditions (25).

The I, R populations rapidly converge to zero and the S and V populations converge to equilibrium values $S^* = 1.25$ and $V^* = 3.75$.

For any parameter h , the normalized sensitivity index of R_0 with respect to h is defined by

$$\phi_h = \frac{\partial R_0}{\partial h} \frac{h}{R_0}. \quad (29)$$

A positive value of ϕ_h means that increasing h increases R_0 , whereas a negative value means that R_0 decreases when h increases.

Using the analytical results (29) and numerical computations, we determine the normalized sensitivity indices of R_0 for the parameters in Table. 2 (with $v = 0.60$ and $R_0 = 0.725 < 1$). The indices are summarized in Table. 3. For these parameter values, the sensitivity indices $b, k, d, v, \gamma, \mu, \eta$ and α are positive.

For $R_0 < 1$, a reduction in R_0 corresponds to a faster approach to the disease-free equilibrium. Table. 3 provides the sensitivity indices and the percentage change in parameter values required to achieve a 1% decrease in R_0 . For instance, a 1% reduction in R_0 requires a 1% decrease in b and k , a 67.667% decrease in η , or a 1.2397%, 1.3386%, and 2.3333% increase in d, v and μ respectively. Given that natural death rate d is difficult to modify, the most effective strategies for reducing R_0 are decreasing contact rate k and infectiousness, increasing vaccination rate v , and reducing the recruitment rate b .

Table. 3 Normalized sensitivity indices and required % changes in parameter for 1% reduction in R_0 for disease-free equilibrium state.

Parameter	Sensitivity indices of R_0	required % change
b	+1.000000	-1.000000%
k	+0.985220	-1.015000%
η	+0.014778	-67.667000%
d	-0.806650	+1.239700%
v	-0.747040	+1.338600%
μ	-0.428570	+2.333333%

5.4. Endemic equilibrium point and asymptotic stability

In the sensitivity analysis we do not vary the recruitment rate ν or the natural death rate d , because these parameters represent demographic processes that cannot easily be modified in human populations. Instead, we focus on parameters that can be influenced by public-health interventions, such as the vaccination rate ν . The vaccination rate ν is selected as the main control parameter because it represents a public-health intervention that can be adjusted in practice, unlike demographic parameters such as the recruitment rate or natural death rate. Moreover, ν directly influences the basic reproduction number and therefore plays a central role in determining whether the disease-free or endemic regime occurs. Using the same MATLAB program, we next simulated Eqs. (21)–(24) with the vaccination rate $\nu = 0.35$. In the numerical experiments, $\nu = 0.60$ represents a relatively high vaccination effort, sufficient to reduce the basic reproduction number below one and drive the system toward the disease-free equilibrium. In contrast, $\nu = 0.35$ represents a lower vaccination effort, for which the basic reproduction number exceeds one and the disease persists at an endemic equilibrium. The solutions plotted in Fig. 3 indicate that the S, V, I and R populations all converge to positive equilibrium values, with the infectious class approaching a non-zero steady state after a transient phase. These numerical results support the analytical finding that, when $R_0 = 1.048052 > 1$, the disease-free equilibrium is unstable and the endemic equilibrium is locally asymptotically stable.

For the parameter values in Table. 2 and $\nu = 0.35$, we obtain the endemic equilibrium point

$$(S^*, V^*, I^*, R^*) = (1.7500, 3.0625, 0.0010, 0.0003). \quad (30)$$

The eigenvalues of the characteristic equation at the endemic equilibrium

$$\lambda_1 = -0.2000, \lambda_2 = -0.6961, \lambda_3 = -0.5519, \lambda_4 = -0.4991. \quad (31)$$

We see that the real parts of all eigenvalues are negative, and therefore the endemic

equilibrium is asymptotically stable.

As a check, we compute the Routh-Hurwitz conditions discussed for the polynomial term of degree 4. For the coefficients

$$a_1 = 1.947133, a_2 = 1.356516, a_3 = 0.393170, a_4 = 0.038351. \quad (32)$$

We obtain Routh–Hurwitz conditions

$$\begin{aligned} a_1 &= 1.947133 > 0, a_2 = 1.356516 > 0, a_3 = 0.393170 > 0, a_4 = 0.038351 > 0, \\ a_1 a_2 &= 2.641316 > a_3 = 0.393170, a_1 a_2 a_3 = 1.038488 > a_1^2 a_4 a_3^2 + a_3^2 = 0.299983. \end{aligned} \quad (33)$$

Since the determinants are all positive, the Routh-Hurwitz criteria show that the endemic equilibrium is asymptotically stable in agreement with the results from the eigenvalues and the numerical solutions.

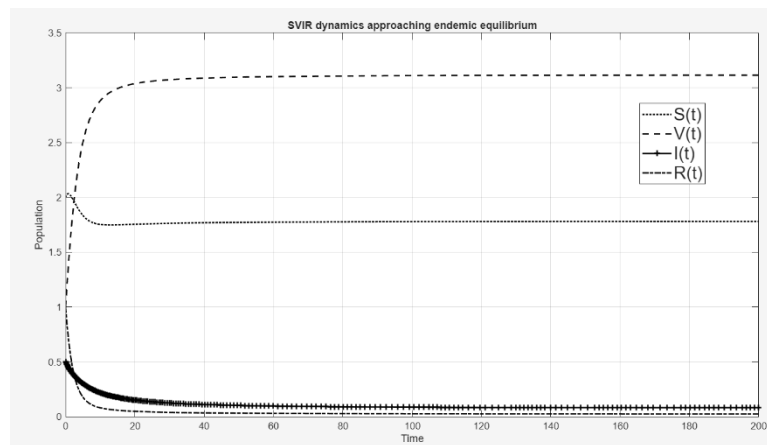


Fig. 3 Example of convergence to an endemic equilibrium for initial conditions (25).

The S, V, I and R populations approach positive equilibrium values, with $I(t)$ converging to a nonzero steady state.

6. Discussion and conclusions

Whereas Xiao et al. [7] established global stability results for an SIR model with the same nonmonotone incidence term, their framework did not account for vaccination or waning immunity. This work analyzed an SVIR epidemic model with nonlinear incidence and imperfect vaccination in order to understand how changes in the vaccination rate affected the long-term behavior of disease transmission. For the parameter set in Table. 2, two representative values of the vaccination rate were considered. When $\nu = 0.6$, the basic reproduction number satisfies $R_0 < 1$, the infectious class tended to zero, and all trajectories converged to the disease-free equilibrium. This regime corresponded to a sufficiently high vaccination coverage that could eliminate the infection from the population.

In contrast, when the vaccination rate was reduced to $v = 0.35$, the basic reproduction number exceeded one, $R_0 > 1$, the disease-free equilibrium lost stability and a unique endemic equilibrium appeared. Numerical simulations showed that, for this lower vaccination rate, the solution converged to a positive endemic equilibrium, with the infectious population approaching a non-zero steady state after a transient phase. These findings are consistent with general results for SVIR/SVEIR models in the literature, which also report that increasing vaccination pushes R_0 below one and drives the system to a disease-free state, whereas inadequate vaccination allows persistent endemic infections.

From a public-health perspective, the model highlights the importance of maintaining vaccination coverage above a critical threshold. In practical terms, if the vaccination rate drops from $v = 0.6$ to $v = 0.35$ or lower, the model predicts a transition from disease elimination to sustained endemic transmission. This behavior reflects the epidemiological principle that, once the effective reproduction number rises above one, each infectious individual generates more than one secondary case on average and outbreaks can be sustained. Thus, reductions in vaccine uptake, waning immunity, or disruptions to immunization programs may lead to the re-emergence or persistence of vaccine-preventable diseases.

The present analysis has some limitations. The model assumes homogeneous mixing, constant parameter values and a closed population without age structure or spatial heterogeneity. In reality, vaccination coverage, contact patterns and waning immunity may vary across age groups, locations and time. Future work could extend the SVIR framework to include age-structured contact matrices, time-dependent vaccination strategies, optimal control, or stochastic effects, and could be calibrated to data for specific diseases such as measles, pertussis or COVID-19. Nevertheless, the results obtained here clearly demonstrate that, in the presence of nonlinear incidence and imperfect vaccination, maintaining a sufficiently high vaccination rate is crucial to keep $R_0 < 1$ and prevent the disease from becoming endemic.

7. Acknowledgements

The author is deeply thankful to the faculty members and staff of the Department of Mathematics, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, for their valuable suggestions and for providing a friendly academic environment.

Special thanks are extended to classmates and friends for many helpful discussions, moral support, and cooperation during the preparation of this work. Finally, the author wishes to thank his family for their constant encouragement, patience, and understanding, which made this research possible.

8. Reference

- [1] K. Ergen, A. Çilli, and N. Yahnioğlu, "Predicting epidemic diseases using mathematical modelling of SIR," *Acta Physica Polonica A*, vol. 128, no. 2-B, pp. B-273–B-275, Aug. 2015, doi: 10.12693/APhysPolA.128.B-273.

- [2] B. Dubey, P. Dubey, and U. S. Dubey, "Role of media and treatment on an SIR model," *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, vol. 21, no. 2, pp. 185–200, Mar. 2016, doi: 10.15388/NA.2016.2.3.
- [3] Y. Uçkan, S. Gulen, and K. Koklu, "Analysing of tuberculosis in Turkey through SIR, SEIR and BSEIR mathematical models," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 179–202, Mar. 2021, doi: 10.1080/13873954.2021.1881560.
- [4] S. Paul, A. Mahata, U. Ghosh, and B. Roy, "Study of SEIR epidemic model and scenario analysis of COVID-19 pandemic," *Ecological Genetics and Genomics*, vol. 19, 2021, Art. no. 100087, doi: 10.1016/j.egg.2021.100087.
- [5] V. Capasso and G. Serio, "A generalization of the Kermack-McKendrick deterministic epidemic model," *Mathematical Biosciences*, vol. 42, no. 1–2, pp. 43–61, Nov. 1978, doi: 10.1016/0025-5564(78)90006-8.
- [6] S. Ruan and W. Wang, "Dynamical behavior of an epidemic model with a nonlinear incidence rate," *Journal of Differential Equations*, vol. 188, no.1, pp. 135–163, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0022-0396(02)00089-X.
- [7] D. Xiao and S. Ruan, "Global analysis of an epidemic model with nonmonotone incidence rate," *Mathematical Biosciences*, vol. 208, no.2, pp. 419–429, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.mbs.2006.09.025.
- [8] W. Yang, C. Sun, and J. Arino, "Global analysis for a general epidemiological model with vaccination and varying population," *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 372, no. 1, pp. 208–223, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.jmaa.2010.07.017.
- [9] C.M. Kribs-Zaleta and J.X. Velasco-Hernandez, "A simple vaccination model with multiple endemic states," *Mathematical Biosciences*, vol. 164, pp. 183–201, 2000, doi: 10.1016/S0025-5564(00)00003-1.
- [10] D. G. Luenberger, *Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models and Applications*, New York: John Wiley & Sons, 1979, pp. 336–337.

Investigating Safety Behavior, Accidents, and Safety Standards: The Role of Strategic Design and Education in Enhancing Laboratory Safety

Duangporn Garshasbi^{1*}, Pattadon Sukkapan¹, Jureebhorn Kaewjunda¹, Krisada Masomboon¹,
Kanyakorn Kunwaneeworaya¹, Supunnee Pladsrichuay² and Sasawat Pengpae²

¹Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

²Faculty of Humanities and Social Sciences, Chandrakasem Rajabhat University

Corresponding Author Email : duangporn.g@chandra.ac.th

Received 13 November 2025

Revised 27 February 2026

Accepted 02 March 2026

Abstract

This study aims to analyze unsafe behaviors and examine their association with laboratory accident occurrence by comparing physical and chemical safety behaviors among first-year science students at Chandrakasem Rajabhat University. A mixed-method research design was employed with a sample of 111 participants. Data were collected using structured questionnaires, behavioral observation checklists, and self-reported accident experience records. Descriptive statistics and the Chi-square test were used for data analysis at a significance level of 0.05.

The findings indicated a high level of compliance with chemical safety standards, with 96.4% of students avoiding the use of expired chemicals and 81.1% properly storing chemicals. However, inconsistencies were observed in physical safety behaviors. Specifically, 59.5% of students reported inconsistent use of personal protective equipment (PPE), and 40.5% admitted to using mobile phones during laboratory experiments. The Chi-square analysis revealed a statistically significant association between unsafe physical behaviors and laboratory accident occurrence ($\chi^2 = 6.841$, $df = 1$, $p = 0.009$), whereas unsafe chemical behaviors were not significantly associated with accidents ($\chi^2 = 1.152$, $p = 0.283$). These results demonstrated a structural distinction between chemical safety compliance and physical safety behaviors. Strategic design components—such as spatial layout planning, hazard zoning, safety signage, and emergency evacuation routes—were found to strongly support chemical safety compliance. In contrast, improving physical safety behaviors required behavioral reinforcement through practice-oriented training, structured supervision, and integration within the institutional Safety Management System. The findings could

inform the development of laboratory design guidelines, behavior-focused safety training curricula, and PPE monitoring tools to enhance the sustainability of laboratory safety systems in higher education contexts.

Keywords: Laboratory Safety, Safety Non-compliance, Physical Hazards, Chemical Hazards, Safety Management System

1. Introduction

Education in science, particularly in chemistry, relies heavily on laboratory-based instruction, where students translate theoretical knowledge into practical experience through experiments involving chemicals, laboratory glassware, electrical devices, and analytical instruments. These laboratories are essential components of educational built environments, providing experiential learning that enhances scientific competence. However, due to the presence of hazardous substances, reactive materials, and complex equipment, chemistry laboratories are inherently high-risk environments that require structured and systematic safety management [1, 2].

Extensive research has shown that unsafe human behavior is a leading cause of laboratory accidents in academic institutions [3, 4]. Studies examining university laboratory incidents highlight the role of behavioral non-compliance, inadequate supervision, and weaknesses in safety culture as key contributors to injury and property damage [5, 6]. According to hazard theory, laboratory risks can be categorized into physical, chemical, ergonomic, electrical, and general safety hazards [7]. In many safety frameworks, ergonomic and electrical risks are treated as subsets of broader physical hazards [8]. For analytical clarity, this study therefore classifies unsafe behaviors into two principal domains: behaviors contributing to physical hazards and behaviors contributing to chemical hazards.

Unsafe behaviors related to physical hazards include inconsistent use of personal protective equipment (PPE), distractions such as mobile phone use, horseplay during laboratory operations, careless handling of equipment, and failure to inspect tools before use. Unsafe behaviors associated with chemical hazards include failure to read chemical labels before use, improper chemical storage, inadequate spill response, unsafe handling practices, and other deviations from chemical safety protocols [9, 10]. While both categories present significant risks, the extent to which each domain directly contributes to laboratory accident occurrence has not been systematically compared.

Despite the growing body of international literature on laboratory safety, several important research gaps remain. First, many prior studies treat unsafe behavior as a generalized construct without distinguishing between unsafe physical behaviors and unsafe chemical behaviors when analyzing accident causation [3, 9-10]. Limited empirical evidence exists that quantitatively compares the distinct statistical effects of these two behavioral domains on accident incidence. Second, within the context of Thai higher education institutions—particularly public universities—research has primarily focused on safety awareness, compliance perception, or chemical management practices

[4] rather than examining the direct relationship between categorized unsafe behaviors and laboratory accident occurrence. Third, although strategic laboratory design and safety education are widely recognized as critical elements of risk management, few studies have empirically evaluated their differentiated influence on physical versus chemical safety compliance in educational laboratory environments.

From a safety science and management perspective, laboratory safety should be understood as an integrated system combining environmental control mechanisms and behavioral reinforcement strategies. Strategic Design represents a structural risk mitigation approach that optimizes spatial organization, equipment placement, safety signage visibility, and emergency route accessibility to reduce the probability of human error. Education and training function as behavioral interventions that strengthen safety awareness, risk perception, and compliance consistency. However, the comparative effectiveness of these system-level approaches in influencing distinct categories of unsafe behavior remains underexplored in academic laboratory contexts.

To provide structural context for interpreting behavioral findings, the laboratory environment examined in this study was referenced against established laboratory safety evaluation frameworks, including criteria comparable to the ESPReL Checklist, which assesses infrastructure adequacy, safety equipment availability, emergency preparedness systems, and workspace organization. Although a full architectural audit was beyond the scope of this research, this benchmarking approach provides a structured reference for understanding the interaction between environmental conditions and observed safety behaviors.

In response to these identified gaps, this study investigates the safety behaviors of undergraduate science students during chemical laboratory activities by systematically comparing unsafe physical behaviors and unsafe chemical behaviors and examining their statistical relationship with laboratory accident occurrence. Furthermore, the study evaluates the relative roles of Strategic Design and Education in enhancing safety compliance. By integrating hazard theory [7, 8], behavioral safety principles [9, 10] and systemic safety design approaches, this research contributes to the advancement of laboratory safety management knowledge and provides evidence-based insights applicable to educational laboratory environments beyond a single institutional setting.

2. Scope of the Study

This study focuses on examining the safety behaviors of undergraduate science students during chemical laboratory activities at Chandrakasem Rajabhat University. The scope includes identifying behaviors that contribute to physical and chemical hazards, assessing students' compliance with standard safety practices such as PPE use, equipment handling, and chemical management, and analyzing the relationship between unsafe behaviors and laboratory accidents. Data were collected using questionnaires, observational checklists, and reports of accident experiences, limited to students enrolled in laboratory-based science courses. The study also considers students'

perceptions of strategic design and safety education, though it does not involve a full architectural or environmental assessment of laboratory facilities.

3. Literature Review

The review is organized into three core areas, including safety behavior in chemical laboratory environments, unsafe behaviors associated with physical and chemical hazards, and the role of strategic design and education in enhancing safety, as follows:

3.1 Safety Behavior in the Chemical Laboratory Environment

Safety behavior refers to actions or responses to various situations or stimuli that adhere to safety regulations, with the aim of preventing accidents, injuries, fatalities, occupational diseases, as well as loss or damage to property [11-13]. Such behavior reflects an intention to perform tasks within a safe environment or to minimize exposure to potential hazards. Specifically, safety behavior in the chemical laboratory environment refers to actions, decision-making, and practices undertaken carefully and responsibly, aiming to prevent accidents and minimize risks associated with the proper and effective handling of chemical and physical hazards.

3.2 Unsafe Behavior related to Physical Hazards and Chemical Hazards

Unsafe behavior refers to actions or decisions that violate established safety protocols and increase the likelihood of accidents or injuries [14, 15]. In chemical laboratory environments, such behaviors span both physical and chemical hazards [6]. Physical-hazard behaviors include mishandling equipment, improper or inconsistent use of PPE, unsafe storage of sharp or heavy objects, failure to manage spills or broken glassware, and disregard for fire or electrical safety. Chemical-hazard behaviors involve improper handling, labeling, and storing of chemicals, incorrect operation of fume hoods, and negligence in responding to spills or exposures, all of which heighten risks of burns, toxic inhalation, explosions, and fires [16]. These unsafe behaviors arise from factors such as inadequate safety training, complacency, time pressure, risk underestimation, and weak organizational safety culture, making it essential to address these root causes to reduce laboratory accidents and strengthen overall safety management [17].

3.3 Laboratory Safety Through Strategic Design and Education

Laboratory safety is a critical component of risk management in academic institutions, particularly in chemical laboratory environments where hazardous substances, reactive processes, and complex equipment coexist. From a safety science and management perspective, effective laboratory safety relies on the integration of structural controls and behavioral interventions. Two key components underpin this integrated approach: strategic design and education [18].

Strategic design refers to the deliberate planning and organization of laboratory infrastructure to reduce hazard exposure and support safe operational behavior. It encompasses both architectural and functional elements of laboratory environments, including spatial configuration, equipment placement, ventilation systems, and emergency preparedness infrastructure [19]. Well-designed laboratory environments reduce reliance on individual vigilance by

embedding safety principles into the physical layout, thereby minimizing the probability of human error.

International laboratory safety standards, including OSHA laboratory safety guidelines and ISO-based occupational health and safety management systems, emphasize several essential components of strategic laboratory design [17, 18]. These include:

- (1) hazard zoning and segregation of incompatible chemical processes;
- (2) adequate ventilation systems and compliance with fume hood performance standards;
- (3) clearly marked and unobstructed emergency egress routes;
- (4) standardized safety signage and hazard communication systems;
- (5) accessible emergency response equipment such as eyewash stations, safety showers, and fire extinguishers; and
- (6) systematic risk assessment integrated into laboratory layout planning.

These structural components function as primary prevention mechanisms by reducing exposure probability, mitigating consequence severity, and providing environmental cues that promote safe behavior.

Importantly, strategic design may influence different categories of unsafe behavior in distinct ways. Design elements such as ventilation systems, hazard zoning, and chemical segregation primarily support chemical hazard control and reduce risks related to improper storage, spill mismanagement, and hazardous substance exposure. In contrast, spatial organization, clear safety signage, and unobstructed pathways more directly influence physical safety compliance by reducing tripping hazards, equipment misuse, and unsafe movement within the laboratory. This differentiation provides a theoretical basis for examining how strategic design may disproportionately affect physical versus chemical safety behaviors—an issue empirically investigated in the present study.

While structural controls form the foundation of laboratory safety, education serves as a complementary behavioral intervention. Education ensures that laboratory users understand hazard characteristics, internalize safety norms, and consistently follow established safety protocols [20]. Effective safety education programs typically include regular training sessions, safety briefings, emergency response simulations, and reinforcement of proper personal protective equipment (PPE) usage and chemical handling procedures [21].

Empirical evidence suggests that safety education and training significantly reduce unsafe behaviors and accident rates, particularly when training addresses both cognitive understanding and practical skill development [22]. Education strengthens compliance in key areas such as proper PPE usage, chemical labeling and storage practices, emergency response procedures, and incident reporting [23]. However, educational interventions may exert varying degrees of influence across different hazard domains. For example, training may more strongly impact behavioral compliance related to physical safety practices, such as PPE use and safe equipment handling, whereas structural design elements may play a more decisive role in chemical hazard control.

When combined, strategic design and education create a holistic and mutually reinforcing safety system. Strategic design provides structural safeguards that reduce environmental risk factors, while education enhances individuals' ability to recognize hazards and respond appropriately. This integrated framework supports the development of a proactive laboratory safety culture, in which both environmental conditions and user behavior are systematically aligned to prevent accidents rather than merely react to them. The present study builds upon this theoretical foundation by empirically examining how these two system-level components influence distinct categories of unsafe behavior and laboratory accident occurrence.

3.4 Synthesis of Literature and Research Gaps

The literature reviewed in the preceding sections consistently emphasized three core dimensions of laboratory safety: (1) unsafe behavior as a primary contributor to accident causation, (2) the classification of hazards into physical and chemical domains, and (3) the importance of systemic interventions such as strategic design and safety education in promoting compliance. Collectively, these studies established that laboratory accidents arise from the interaction between behavioral factors and environmental conditions rather than from isolated events [3, 9-10].

However, a critical synthesis of the literature revealed several unresolved issues that warranted further investigation. First, although unsafe behavior was widely acknowledged as a major cause of laboratory incidents, there was a distinct lack of empirical studies that systematically compared the differential effects of unsafe physical behaviors and unsafe chemical behaviors on actual laboratory accident rates. Most existing research examined unsafe behavior as a generalized construct, evaluated specific hazard types independently, or focused on qualitative descriptions of safety culture, without conducting statistical analyses that directly compared these two behavioral domains in relation to accident occurrence.

Second, while hazard classification frameworks clearly distinguished between physical and chemical risks [7, 8], behavioral studies rarely investigated whether these categories exhibited different patterns of accident contribution or varying levels of statistical association with incident frequency. Without such differentiation, safety interventions may remain broadly defined and insufficiently targeted to specific hazard mechanisms.

Third, although strategic design and education were consistently recognized as complementary pillars of laboratory safety management [17-23], the existing body of literature insufficiently analysed how these system-level factors differentially or disproportionately influence physical and chemical safety compliance. Structural design elements—such as ventilation systems, hazard zoning, and equipment placement—may primarily support chemical hazard control by reducing exposure pathways. In contrast, educational interventions may exert stronger influence on individual behaviors associated with physical safety practices, such as PPE compliance and safe equipment handling. Nevertheless, empirical evidence systematically examining these differentiated influences remained limited.

Therefore, a clear research gap exists at the intersection of hazard categorization, unsafe

behavior analysis, and systemic safety interventions. There is a need for empirical research that (1) systematically compares unsafe physical and unsafe chemical behaviors in relation to laboratory accident rates, and (2) evaluates how strategic design and education contribute differently to these distinct domains of safety compliance.

The present study addresses this gap by statistically examining the relationship between categorized unsafe behaviors and laboratory accident occurrence while simultaneously assessing the relative influence of strategic design and education on physical and chemical safety behaviors. By integrating hazard theory, behavioral safety principles, and systemic safety management frameworks, this research advances laboratory safety scholarship and provides a more nuanced understanding of how structural and behavioral factors interact within academic laboratory environments.

4. Research Method

4.1 Case Study Profile

The study was conducted within the chemical laboratories of the Faculty of Science at Chandrakasem Rajabhat University, located in Bangkok, Thailand. These laboratories serve as core facilities for undergraduate students enrolled in science-related programs, including Chemistry, Biology, Environmental Science, and Physics. Students use these laboratories extensively for practical experiments, coursework, and research projects as part of their academic curriculum.

The laboratories are equipped with essential scientific instruments necessary for a variety of chemical experiments. Facilities include chemical storage rooms, fume hoods for ventilation and the safe handling of volatile substances, and designated areas for waste disposal. Personal protective equipment (PPE) such as lab coats, gloves, and safety goggles are provided to students to support safe laboratory practices.

Two chemical laboratory rooms were included in this study. Each laboratory room has an approximate usable area of 17.14 square meters (3.71×4.62 meters), resulting in a combined total laboratory area of approximately 34.28 square meters. Each room accommodates up to 30 students per practical session. Laboratory instruction is organized into four groups per day (two morning and two afternoon sessions), allowing the facilities to accommodate a maximum of 120 students daily ($30 \text{ students} \times 4 \text{ groups}$), depending on academic scheduling requirements.

The laboratory facilities are designed and managed in alignment with national laboratory safety regulations and reference internationally recognized safety management frameworks, including ISO-based occupational health and safety management systems and laboratory design guidelines [17], [18]. Core strategic design elements include hazard zoning, fume hood placement to optimize ventilation flow, accessible emergency exits, visible safety signage, and readily available emergency equipment such as eyewash stations and fire extinguishers.

These structural elements reflect the principles of Strategic Design discussed in Section 3.3 and provide a practical context for examining how environmental layout and safety infrastructure interact with student safety behavior.

Despite the presence of standard safety infrastructure, challenges remain in ensuring consistent safety behavior among students. Laboratory sessions often involve multiple groups working simultaneously, which increases the complexity of maintaining strict adherence to safety protocols. As such, these laboratories present a realistic and practical setting for investigating the relationship between safety behavior, laboratory accidents, and the effectiveness of strategic design and education in promoting a safer learning environment.

4.2 Research Design

This study employs a mixed-methods research design, integrating quantitative and qualitative approaches to provide a comprehensive analysis of laboratory safety behavior.

The quantitative component consisted of structured questionnaires and statistical analysis to examine the relationship between categorized unsafe behaviors and laboratory accident occurrence. The qualitative component involved thematic analysis of open-ended responses to explore students' perspectives on strategic design and safety education.

The questionnaire was used to measure self-reported safety behaviors and perceptions. The observational checklist was employed to record real-time behavioral compliance during laboratory sessions. Accident records were analyzed to examine the statistical association between unsafe behaviors and actual incident occurrence. The integration of these methods enhances methodological triangulation and strengthens analytical validity.

4.3 Participants and Sampling Technique

The population of this study consisted of first-year undergraduate students enrolled in laboratory-based courses requiring the use of chemical laboratories during the academic year. A total of 111 students participated in the study, representing the following academic programs: Food Science and Technology ($n = 20$), Civil Engineering and Construction Management ($n = 38$), Chemistry ($n = 14$), and General Science ($n = 39$).

A census sampling approach was employed, whereby all eligible first-year students enrolled in laboratory-based courses during the data collection period were invited to participate. Eligibility criteria required participants to be actively enrolled in a program that included chemical laboratory coursework and to provide voluntary informed consent. Students who were absent on the day of data collection or who did not complete the questionnaire were excluded from the analysis.

Participation was voluntary, and informed consent was obtained from all participants prior to data collection.

4.4 Research Instruments

4.4.1 Questionnaire

The questionnaire was developed based on hazard theory and laboratory safety literature. Items were categorized into two domains: unsafe physical behaviors and unsafe chemical behaviors. Responses were measured using a structured Likert-scale format. The questionnaire was divided into four sections including Section A focused on demographic information and general experiences with laboratory accidents, Section B examined the perceived causes of accidents, Section

C explored behaviors associated with physical hazards, and Section D addressed behaviors contributing to chemical hazards.

4.4.2 Observational Checklist

Direct observations were conducted during laboratory practical sessions to record instances of unsafe behavior in real time. An observational checklist was developed based on established hazard theory [7], [8] and laboratory safety management literature. The checklist incorporated both behavior-related indicators (e.g., failure to wear personal protective equipment) and situational risk factors (e.g., improper chemical storage or unsafe handling practices).

Unsafe behavior was operationally defined as any observable action that deviated from established laboratory safety protocols. Behavioral indicators were categorized into two domains: unsafe physical behaviors and unsafe chemical behaviors. The frequency of each unsafe behavior was systematically recorded during structured observation sessions.

Observations were conducted across eight laboratory sessions over multiple days to enhance reliability and reduce situational variability. To minimize the Hawthorne effect, observations were performed unobtrusively and at a distance. Repeated exposure to observation sessions allowed students to become accustomed to the observer's presence, thereby reducing behavior modification associated with awareness of being observed.

4.4.3 Data Validity and Reliability

To ensure methodological rigor, content validity was evaluated by three experts in chemical laboratory safety and occupational safety management. The Index of Item-Objective Congruence (IOC) was assessed for each item to ensure alignment with research objectives. Items meeting acceptable criteria were retained. The Content Validity Index (CVI) was calculated to assess the level of agreement among experts, confirming satisfactory content validity of the instrument.

Prior to full-scale data collection, pilot testing was conducted with a group of undergraduate laboratory users to evaluate item comprehensibility, wording clarity, and response consistency. Minor revisions were implemented based on participant feedback to eliminate ambiguity and enhance measurement precision.

Internal consistency reliability was assessed using Cronbach's Alpha, yielding a coefficient of $\alpha = 0.86$. This value exceeds the commonly accepted threshold of 0.70, indicating high internal consistency and reliability of the measurement instrument.

To enhance external applicability, the categorization of unsafe behaviors was grounded in established hazard theory [7], [8], and the strategic design constructs were aligned with internationally recognized laboratory safety standards [17], [18]. This theoretical grounding strengthens the generalizability of the findings to other academic institutions with comparable laboratory environments.

4.4.4 Data Analysis

Data from the survey and observation were analyzed using descriptive and inferential statistics. Descriptive statistics were used to summarize the demographics of the sample, the

frequency of unsafe behaviors, and the rate of safety protocol compliance. Inferential statistics, including Chi-square tests, were employed to examine the relationship between unsafe behaviors and laboratory accidents. The analysis aimed to identify significant patterns or correlations between specific unsafe behaviors (e.g., improper chemical handling or mishandling of equipment) and the occurrence of accidents. Additionally, the research utilized thematic analysis to identify recurring themes in students' responses related to their understanding of safety measures and the perceived effectiveness of safety education and protocols.

Quantitative data were analyzed using statistical software (SPSS version 24). Descriptive statistics were used to summarize behavioral frequencies. Inferential analysis, including Chi-square tests, was conducted to examine associations between categorized unsafe behaviors and laboratory accident occurrence. Statistical significance was determined at $\alpha = 0.05$.

Qualitative data from open-ended responses were analyzed using thematic analysis to identify recurring patterns related to strategic design and safety education.

5. Results and Discussions

5.1 Demographic Characteristics and Accident Experience

The results revealed that the majority of respondents were 18 years old, totaling 68 individuals (61.30%), followed by 19-year-olds, totaling 43 individuals (38.70%). Regarding gender, most respondents were female, accounting for 67 individuals (60.40%), while male respondents accounted for 44 individuals (39.60%). In terms of academic major, most respondents were enrolled in the General Science Education program under the Faculty of Science, totaling 39 individuals (35.10%). This was followed by students majoring in the Environment and Safety Management program, with 38 individuals (34.20%). Additionally, 20 respondents (18.00%) were from the Food Science and Technology program, and 14 respondents (12.60%) were from the Chemistry Education program, all within the Faculty of Science.

Demographic characteristics were relevant to laboratory safety research because age, academic discipline, and early-stage laboratory exposure may influence safety awareness, risk perception, and behavioral compliance. As first-year students, participants may have limited prior experience in formal chemical laboratory environments, which could affect their familiarity with laboratory protocols and hazard recognition. Furthermore, differences across academic programs may reflect variations in laboratory intensity, prior safety training, and exposure to risk management principles. Understanding these demographic factors provided important contextual information for interpreting patterns of unsafe behavior and accident occurrence.

Regarding accident experience, Table 1 presents the number and percentage of respondents who reported injuries sustained specifically in university-level chemistry laboratory settings. The majority of students (89.20%) reported never having experienced an accident in the laboratory, while 10.80% indicated that they had encountered at least one laboratory-related

incident. Only accident experiences occurring within the university laboratory context were included in inferential analysis to ensure consistency with the scope of this study

Table. 1 Number and Percentage of Respondents Regarding Experiences of Accidents in the Chemistry Laboratory.

Accident Experience Topics	Frequency (n)	Percentage (%)
Experience of Laboratory Accidents		
Never experienced	99	89.20
Experienced	12	10.80
<i>Number of Accidents Experienced</i>		
1 time	8	66.70
2 times	3	25.00
3 times	1	8.30
<i>Types of Injuries (n = 12)</i>		
Slip/Fall	6	50.00
Cuts from Sharp Objects	2	16.70
Objects Falling on Body Parts	3	25.00
Chemical Splash	1	8.30
Fire Burns	0	00.00
Electric Shock	0	00.00
<i>Injured Body Parts (n = 12)</i>		
Hands and Fingers	7	58.30
Arms	1	8.30
Legs	1	8.30
Feet and Toes	3	25.00
Eyes	0	00.00
Head	0	00.00
<i>Property Damage (n = 12)</i>		
No damage	8	66.70
Damaged	4	33.30
Total	111	100.00

Table 2 presents the frequency and percentage distribution of reported contributing factors associated with accidents occurring in the university-level chemistry laboratory. The findings indicated that the most frequently reported contributing factor was a crowded and limited workspace (44.00%). This suggested that spatial constraints may have restricted students' movement and increased the likelihood of unintended contact with equipment or hazardous materials. The second most common contributing factor was horseplay during laboratory operations (36.00%), reflecting behavioral non-compliance and insufficient adherence to safety protocols.

Other reported factors included lack of caution (8.00%), inadequate lighting (4.00%), improper arrangement of equipment or chemicals (4.00%), and the use of defective equipment, tools, or materials (4.00%). Although these factors were reported less frequently, they represent important environmental and procedural vulnerabilities within the laboratory environment.

Overall, the findings demonstrated that both environmental constraints and behavioral risk factors contributed to accident occurrence. While spatial limitations increased exposure risk, unsafe behaviors such as horseplay directly elevate the probability of injury. These results reinforced the importance of integrating effective strategic laboratory design with active behavioral supervision and safety enforcement mechanisms.

The results presented in Tables 2–4 are derived from self-reported questionnaire responses completed by all 111 participants. These findings reflected students' reported perceptions and behaviors rather than direct observational counts. Observational checklist data were collected separately across eight laboratory sessions to validate behavioral patterns; however, they were not the primary source of the reported frequency distributions.

Table. 2 Percentage of Causes of Injuries or Accidents in the Chemistry Laboratory.

Cause of Injuries/Accidents	Frequency (n)	Percentage (%)
Crowded and limited working area	11	44.00
Horseplay during laboratory operations	9	36.00
Lack of caution	2	8.00
Inadequate lighting	1	4.00
Improper arrangement of equipment/chemicals	1	4.00
Defective equipment/ tools/ materials	1	4.00
Total	25	100.00

Noted: The total frequency (n = 25) exceeds the number of students who experienced accidents (n = 12) because multiple contributing factors could be reported for a single incident.

5.2 Analysis of Unsafe Behaviors Leading to Physical and Chemical Hazards

5.2.1 Survey Questionnaire

Table 3 provides a detailed overview of the frequency with which respondents engage in behaviors that contribute to physical hazards during laboratory work. The table categorizes various unsafe behaviors based on the respondents' reported frequency, ranging from "Always" to "Never." For example, 42.3% of students reported disturbing others during experiments "sometimes," while 40.5% frequently used mobile phones during experiments ("almost every time"). Additionally, 27% of participants reported using equipment carelessly "sometimes," with another 32.4% stating that it occurred "rarely." The table highlights the varying degrees of unsafe behaviors, with certain actions, such as disturbing others and using mobile phones, occurring more frequently than others.

The table also sheds light on other behaviors that could contribute to physical hazards, such as improper use of equipment and failure to check equipment conditions. For instance, 39.9% of students reported checking equipment conditions "rarely," and 33.3% engaged in improper use of equipment "rarely." Interestingly, behaviors like not wearing personal protective equipment were reported very infrequently, with only 0.9% of students admitting to doing so regularly. Furthermore, very few students engaged in activities like taking antihistamines while working (71.2% reported never doing this), and there was no report of alcohol consumption before or during laboratory work. The data underscores the variability in unsafe behaviors and suggests areas where safety education and interventions could be beneficial.

Table. 3 Number and Percentage of Respondents Classified by Behaviors Leading to Physical Hazards.

Behavior Leading to Physical Hazards	Always (%)	Almost Always (%)	Sometimes (%)	Rarely (%)	Never (%)	Total (n)
1. Disturbing others during experiments	2 (1.8)	22 (19.8)	47 (42.3)	31 (27.9)	9 (8.1)	111
2. Not checking equipment condition	3 (2.7)	23 (20.7)	31 (27.9)	44 (39.9)	10 (9.0)	111
3. Improper use of equipment	1 (0.9)	1 (0.9)	5 (4.5)	37 (33.3)	67 (60.4)	111
4. Not wearing personal protective equipment	0 (0.0)	1 (0.9)	21 (18.9)	66 (59.5)	23 (20.7)	111
5. Taking antihistamines/cold	0 (0.0)	1 (0.9)	1 (0.9)	30 (27.0)	79 (71.2)	111

Behavior Leading to Physical Hazards	Always (%)	Almost Always (%)	Sometimes (%)	Rarely (%)	Never (%)	Total (n)
medicine while working						
6. Careless use of equipment	1 (0.9)	7 (6.3)	30 (27.0)	36 (32.4)	37 (33.3)	111
7. Insufficient rest before working	0 (0.0)	6 (5.4)	28 (25.2)	56 (50.5)	21 (18.9)	111
8. Using mobile phones during experiments	11 (9.9)	45 (40.5)	36 (32.4)	11 (9.9)	8 (7.2)	111
9. Horseplay during laboratory work	0 (0.0)	2 (1.8)	16 (14.4)	76 (68.5)	17 (15.3)	111
10. Drinking alcohol before/during laboratory work	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	111 (100.0)	111

5.2.2 Unsafe behaviors related to Chemical Hazard

Table 4 presents a breakdown of the frequency with which respondents engage in behaviors that could lead to chemical hazards during laboratory work. The table categorizes unsafe behaviors based on how often they occur, ranging from "Always" to "Never." One notable behavior is "not reading chemical labels before use," with 34.2% of participants admitting to doing this "sometimes" and 33.3% doing so "rarely." Another behavior, "failing to report chemical spills/leaks," was reported as "rarely" by 47.7% of respondents and "sometimes" by 7.2%. Importantly, more serious safety violations, such as "smoking during chemical operations" and "using the mouth to pipette chemicals," were reported as never occurring, with 100% of participants stating they never engaged in these highly dangerous behaviors.

The table also shows that some other behaviors, such as "not following prohibitory signs and warnings," were reported with relatively low frequency, as 36.9% of students indicated they did so "rarely," and 58.6% said they never engaged in this behavior. Similarly, 51.4% of respondents reported "not turning off lights/unplugging after use" as a "rare" practice, while 38.7% indicated they never did so. Regarding chemical storage, only 17.1% of respondents reported improper chemical storage "rarely," and 81.1% never engaged in such behavior. Additionally, the use of expired chemicals was reported as a rare occurrence, with 96.4% of students stating they never used expired chemicals. This data highlights a generally positive safety attitude, but it also suggests that occasional lapses in following safety protocols still persist.

Table. 4 Number and Percentage of Respondents Classified by Behaviors Leading to Chemical Hazards.

Behavior Leading to Chemical Hazards	Always (%)	Almost Always (%)	Sometimes (%)	Rarely (%)	Never (%)	Total (n)
1. Not reading chemical labels before use	5 (4.5)	18 (16.2)	38 (34.2)	37 (33.3)	13 (11.7)	111
2. Not turning off lights/unplugging after use	0 (0.0)	2 (1.8)	9 (8.1)	57 (51.4)	43 (38.7)	111
3. Not following prohibitory signs and warnings	1 (0.9)	0 (0.0)	4 (3.6)	41 (36.9)	65 (58.6)	111
4. Smoking during chemical operations	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	111 (100.0)	111
5. Using mouth to pipette chemicals	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	0 (0.0)	111 (100.0)	111
6. Failing to report chemical spills/leaks	0 (0.0)	1 (0.9)	8 (7.2)	53 (47.7)	49 (44.1)	111
7. Improper chemical storage	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (1.8)	19 (17.1)	90 (81.1)	111
8. Using expired chemicals	0 (0.0)	0 (0.0)	2 (1.8)	2 (1.8)	107 (96.4)	111

5.3 Statistical Association Between Unsafe Behaviors and Accident Occurrence

In this section, the relationship between unsafe behaviors and laboratory accidents is examined. The hypotheses are as follows:

- H_0 : There is no significant relationship between unsafe behavior and the incidence of laboratory accidents among chemistry students.
- H_1 : There is a significant relationship between unsafe behavior and the incidence of laboratory accidents among chemistry students.

To test these hypotheses, a Chi-square test was conducted, and the results are summarized in Table 5.

Table 5 presents the Chi-square test results for two types of unsafe behaviors—unsafe physical behavior (such as horseplay, phone use, and distractions) and unsafe chemical behavior (such as mislabeling or mishandling chemicals).

For unsafe physical behavior, the Chi-square value (χ^2) was 6.841, with 1 degree of freedom ($df = 1$), and the p-value was 0.009. Since the p-value is less than the common significance level of 0.05, it indicates a statistically significant relationship between unsafe physical behaviors and the occurrence of laboratory accidents. This suggests that engaging in unsafe physical behaviors increases the likelihood of accidents in the laboratory setting.

For unsafe chemical behavior, the Chi-square value (χ^2) was 1.152, with 1 degree of freedom ($df = 1$), and the p-value was 0.283. Since the p-value exceeds 0.05, there is no statistically significant relationship between unsafe chemical behaviors and laboratory accident occurrence.

It should be noted that the number of reported chemical-related injuries was limited ($n = 1$). Therefore, statistical inferences regarding the relationship between chemical unsafe behaviors and accident occurrence should be interpreted cautiously. The absence of a statistically significant association may reflect limited incident frequency rather than definitive evidence of no relationship. Future research involving larger multi-institutional samples or longitudinal data collection is recommended to increase statistical power and further validate these findings.

Table. 5 Chi-Square Test Results of Relationship Between Unsafe Behavior and Incidence of Laboratory Accidents.

Unsafe Behavior Type	χ^2	df	p-value	Interpretation
Unsafe Physical Behavior (e.g., horseplay, phone use, distractions)	6.841	1	0.009	Significant Relationship
Unsafe Chemical Behavior (e.g., mislabeling, mishandling chemicals)	1.152	1	0.283	No Significant Relationship

5.4 Compliance with Standard Safety Practices in the Chemistry Laboratory

Compliance with standard safety practices in the chemistry laboratory varied among the students, with certain areas showing strong adherence to safety protocols, while others revealed notable lapses in behavior.

In terms of chemical safety, the majority of students demonstrated strong compliance with essential safety rules. For instance, 81.1% of respondents reported always storing chemicals properly, which reflects good practices in maintaining a safe laboratory environment. Additionally, 96.4% of students avoided using expired chemicals, a key safety measure to prevent accidents

caused by degraded or ineffective substances. These figures suggest that students were generally conscientious about chemical safety and followed critical safety standards related to chemical handling.

However, when it comes to physical safety practices, there were more frequent lapses. While 59.5% of students reported "rarely" wearing personal protective equipment (PPE) during laboratory work, this indicates that a significant portion of students did not consistently adhere to the use of essential protective gear, potentially increasing the risk of physical harm. Additionally, while 68.5% of students "rarely" engaged in horseplay during laboratory work, a concerning 14.4% admitted to engaging in it "sometimes." Such behaviors can cause distractions or accidents in the lab, highlighting the need for better enforcement of safety rules related to physical conduct. Regarding equipment use, 60.4% of students stated they "never" failed to follow the equipment manuals, showing a relatively strong commitment to safe and proper equipment handling. On the whole, only 11.7% of students reported "never reading chemical labels" before use, which suggests that the majority were generally good about reading and understanding labels, contributing to safer chemical handling.

These findings indicate that students tend to comply more consistently with chemical safety standards than with physical safety practices, which may reflect differences in awareness, training, or enforcement of safety protocols. The observed lapses in physical safety, such as inconsistent use of PPE and occasional horseplay, suggest areas where further attention and improvement are needed to ensure comprehensive safety compliance in the laboratory.

5.5 The Role of Strategic Design and Education in Enhancing Laboratory Safety

This study identified strategic design and education as key factors influencing laboratory safety among science students at Chandrakasem Rajabhat University. Using thematic analysis, the research explored recurring themes in students' responses regarding their understanding of safety measures and the perceived effectiveness of safety education and protocols. This qualitative approach allowed for a deeper insight into how physical environments and educational interventions impact students' safety behaviors.

The findings reveal that specific laboratory design elements—such as the organization of workspaces, placement of warning signs, and accessibility of emergency evacuation routes—significantly support safer laboratory practices. Although the study did not comprehensively evaluate every aspect of design, the thematic analysis indicated a clear correlation between students' awareness of safety procedures and their interaction with the physical laboratory environment. Well-organized spaces and visible safety signage were commonly associated with reduced distractions and greater adherence to safety protocols.

During the study period, the readiness and operational condition of laboratory safety equipment were maintained according to institutional laboratory management procedures. Essential infrastructure, including fume hoods, emergency showers, eyewash stations, and fire extinguishers, was routinely inspected prior to laboratory sessions to ensure functional availability. Although

independent calibration assessments were beyond the scope of this study, the laboratories operated under standard institutional maintenance protocols. This ensured that observed unsafe behaviors were not attributable to equipment malfunction, thereby strengthening the internal validity of the findings.

Despite generally strong compliance with chemical safety standards, inconsistencies were evident in physical safety practices. For example, 59.5% of students reported that they "rarely" used personal protective equipment (PPE), highlighting a concerning gap between available safety infrastructure and student behavior. This suggests that while strategic design facilitates a safer environment, it alone is insufficient to ensure full compliance without continuous educational reinforcement.

From a behavioral psychology and learning theory perspective, this gap between knowledge and physical safety compliance can be explained by the distinction between cognitive understanding and habitual behavior formation. According to behavior-based safety principles and social learning theory [11-13], knowledge acquisition does not automatically translate into sustained behavioral change. Chemical safety practices are often procedural and cognitively driven (e.g., reading labels, following chemical handling protocols), whereas physical safety behaviors—such as consistent PPE use and minimizing distractions—require habit formation, environmental reinforcement, and social modeling. Physical behaviors are strongly influenced by peer norms, perceived immediacy of risk, and situational awareness. Without structured reinforcement, supervision, and repeated practice, students may possess adequate chemical knowledge yet fail to consistently apply physical safety behaviors. This explains why effective chemical education does not necessarily guarantee full compliance with physical safety practices.

Education therefore emerged as a crucial component in promoting laboratory safety. Thematic analysis revealed that while students demonstrated awareness of chemical hazards, many lacked consistent application of physical safety behaviors, including regular PPE usage, proper handling of equipment, and avoidance of distractions such as mobile phone use. The findings suggest that safety education requires enhancement through more interactive, practice-oriented methods. Incorporating hands-on demonstrations, scenario-based simulations, routine safety drills, and active learning strategies may strengthen behavioral reinforcement and promote long-term safety habits.

These results are consistent with prior research emphasizing that a well-structured laboratory environment reduces chemical safety risks, whereas sustained improvements in physical safety behavior rely more heavily on behavioral reinforcement and educational strategies. Effective laboratory safety therefore requires an integrated approach in which environmental design supports compliance while educational interventions cultivate behavioral consistency.

To address the identified gaps, several recommendations are proposed. First, education and training programs should expand their focus beyond chemical safety procedures to include consistent reinforcement of physical safety behaviors through experiential learning approaches.

Second, laboratory designs should be further optimized to maintain clutter-free workspaces, enhance visibility of safety signage, and ensure accessible emergency equipment. Third, monitoring and enforcement mechanisms for PPE compliance should be strengthened through structured supervision and accountability systems. Finally, cultivating a proactive safety culture is essential, encouraging peer accountability, mentorship initiatives, and open reporting of unsafe behaviors.

Integrating strategic laboratory design with comprehensive, practice-oriented education and structured behavioral reinforcement mechanisms can significantly enhance student safety behavior. These combined efforts contribute to a safer laboratory environment, reduce accident risk, and promote a sustainable culture of safety awareness within academic institutions.

Although this study was conducted within a single university laboratory context, the behavioral classifications were grounded in established hazard theory and internationally recognized laboratory safety standards. Therefore, the identified patterns distinguishing physical and chemical unsafe behaviors may be applicable to other academic institutions with comparable laboratory environments. Nevertheless, differences in laboratory size, supervision intensity, and institutional safety culture may influence behavioral outcomes. Future multi-institutional studies are recommended to strengthen external validity and broader generalizability.

5.6 Limitations of the Study

This study was conducted within a single university context, which may limit the generalizability of findings to institutions with different laboratory sizes, hazard profiles, or safety cultures. The laboratories examined primarily supported undergraduate teaching activities and may not reflect higher-risk research laboratories involving advanced chemical processes. Additionally, accident data were based partly on self-reported experiences, which may introduce recall bias. Although observational methods were implemented to strengthen reliability, real-time observation may not capture all unsafe behaviors across all sessions. Future research should expand to multiple universities and laboratory types to enhance external validity.

6. Conclusions

This study aimed to assess the safety behavior of science students during chemical laboratory activities, focusing on behaviors contributing to physical and chemical hazards. The results revealed that while students generally demonstrated good compliance with chemical safety practices, physical safety behaviors exhibited more inconsistencies. Specifically, students adhered to chemical safety standards such as proper chemical storage and avoiding expired chemicals, with high compliance rates. However, behaviors such as wearing personal protective equipment (PPE) and avoiding distractions like phone use or horseplay showed notable lapses, indicating that physical safety practices require greater attention.

The study also highlighted the role of strategic design and education in promoting laboratory safety. Effective laboratory design elements, including clear safety signage, organized workspaces, and designated escape routes, contributed positively to safety behaviors, particularly in terms of

chemical safety. However, the findings suggest that these environmental factors alone are not sufficient to fully address physical safety concerns. Education and training emerged as critical components in reducing unsafe behaviors, with a focus on reinforcing the importance of PPE, safe equipment use, and the avoidance of distractions in the laboratory setting.

7. Recommendations

Based on the findings of this study, several strategic recommendations are proposed to enhance laboratory safety management at the institutional level.

7.1 Policy-Level Recommendation

Institutions should consider implementing Digital Safety Monitoring systems or real-time behavioral tracking mechanisms to reduce unsafe physical behaviors such as horseplay, improper equipment handling, and distraction during laboratory operations. Real-time monitoring tools, including digital check-in systems, automated PPE compliance alerts, and sensor-based supervision technologies, may strengthen behavioral accountability and reduce accident risk.

7.2 Design-Level Recommendation (Strategic Design Enhancement)

Laboratory spatial design should incorporate structural enforcement mechanisms, such as designated PPE compliance checkpoints at laboratory entry points and clearly defined mobile phone-restricted zones. Designing transitional buffer areas where students are required to wear appropriate protective equipment before entering operational zones may promote automatic compliance and reduce behavioral lapses.

7.3 Educational and Research Recommendation

Future research should incorporate qualitative methodologies, such as in-depth interviews or focus group discussions, to explore the underlying psychological and contextual factors influencing inconsistent PPE use. Although students may demonstrate adequate chemical knowledge, qualitative inquiry may reveal deeper motivational, social, or cultural factors affecting physical safety compliance.

8. Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to the Faculty of Science at Chandrakasem Rajabhat University for providing access to laboratory facilities and supporting the implementation of this research. Special appreciation is extended to the participating students for their cooperation and valuable contributions during the data collection process. The authors also acknowledge the assistance of academic experts who evaluated the research instruments and provided constructive feedback that enhanced the rigor of the study. Finally, the research team is grateful to the Faculty of Humanities and Social Sciences for their encouragement and administrative support throughout the duration of this project.

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Fatemi, A. Dehdashti, and M. Jannati, "Implementation of chemical health, safety, and environmental risk assessment in laboratories: A case-series study," *Frontiers in Public Health*, vol. 10, Jun. 2022, Art. no. 898826, doi: 10.3389/fpubh.2022.898826.
- [2] W. Wang, Y. Su, H. Cao, and D. Li, "Enhancing chemical laboratory safety with hazards risks mitigation and strategic actions," *Laboratories*, vol. 2, no. 1, Feb. 2025, Art. no. 5, doi: 10.3390/laboratories2010005.
- [3] Z. Li, X. Wang, S. Gong, N. Sun, and R. Tong, "Risk assessment of unsafe behavior in university laboratories using the HFACS-UL and a fuzzy Bayesian network," *Journal of Safety Research*, vol. 82, pp. 13–27, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jsr.2022.04.002.
- [4] K. H. Abdullah and F. S. Abd Aziz, "Safety behaviour in the laboratory among university students," *The Journal of Behavioral Science*, vol. 15, pp. 51–65, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://so06.tci-thaijo.org/index.php/IJBS/article/view/241208>
- [5] R. W. McLeod, "Approaches to understanding human behavior when investigating incidents in academic chemical laboratories," *ACS Chemical Health & Safety*, vol. 29, no. 3, pp. 263–279, Apr. 2022, doi: 10.1021/acs.chas.2c00020.
- [6] R. H. Hill Jr. and D. C. Finster, *Laboratory Safety for Chemistry Students*. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [7] Y. Zhang, K. Wang, and R. Zhang, "Theoretical research on hazards and accident prevention," *Procedia Engineering*, vol. 26, pp. 16–24, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2135.
- [8] P. H. Wald, "Introduction to physical hazards," in *Physical and Biological Hazards of the Workplace*, G.M. Stave and P.H. Waldpp, Eds., NJ, USA: John Wiley & Sons, Dec. 2016, pp. 2–11, doi: 10.1002/9781119276531.ch1.
- [9] A. M. Shariff and N. Norazahar, "At-risk behaviour analysis and improvement study in an academic laboratory," *Safety Science*, vol. 50, no. 1, pp. 29–38, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.ssci.2011.06.008.
- [10] C. Xu et al., "Current challenges of university laboratory: Characteristics of human factors and safety management system deficiencies based on accident statistics," *Journal of Safety Research*, vol. 86, pp. 318–335, 2023, doi: 10.1016/j.jsr.2023.07.010.
- [11] C. G. Hoyos and B. M. Zimolong, *Occupational Safety and Accident Prevention: Behavioral Strategies and Methods*. USA: Elsevier, 2014.
- [12] O. Wirth and S. O. Sigurdsson, "When workplace safety depends on behavior change: Topics for behavioral safety research," *Journal of Safety Research*, vol. 39, no. 6, pp. 589–598, 2008, doi: 10.1016/j.jsr.2008.10.005.

- [13] S. Roberts and E. S. Geller, "Principles of behavior-based safety," in *Handbook of Safety Principles*, N. Moller, S. Ove Hansson, J.-E. Holmberg and C. Rollenhagen, Eds., NJ, USA: John Wiley & Sons, Dec. 2017, pp. 677–710, doi: 10.1002/9781119443070.ch29.
- [14] J. E. Dadoo and H. Al-Samarraie, "Factors leading to unsafe behavior in the twenty first century workplace: A review," *Management Review Quarterly*, vol. 69, no. 4, pp. 391–414, Nov. 2019, doi: 10.1007/s11301-019-00157-6.
- [15] R. Gantt, "Unsafe behavior: Rethinking the concept," *Professional Safety*, vol. 62, no.5, pp. 50–56, May 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/318503222_Unsafe_Behavior_-_Rethinking_the_Concept/link/59760f53458515e26d230824/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbilsInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbH19
- [16] R. Papadopoli, C. G. A. Nobile, A. Trovato, C. Pileggi, and M. Pavia, "Chemical risk and safety awareness, perception, and practices among research laboratories workers in Italy," *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, vol. 15, Jun. 2020, Art. No. 17, doi: 10.1186/s12995-020-00268-x.
- [17] L. J. DiBerardinis, J. S. Baum, M. W. First, G. T. Gatwood, and A. K. Seth, *Guidelines for Laboratory Design: Health, Safety, and Environmental Considerations*. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118633816>
- [18] T. Olewski and M. Snakard, "Challenges in applying process safety management at university laboratories," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 49, pp. 209–214, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jlp.2017.06.013.
- [19] B. L. Foster, *Laboratory Safety and Management: A Handbook for Teaching Assistants*. Morgantown, WV, USA: West Virginia University, 2018. [Online]. Available: https://www.chemistry.wvu.edu/files/d/ea54fbfb-8f3a-4dfa-8d55-26a4d94d3b93/ta-manual-2018.pdf?utm_source
- [20] B.-J. Kim and J.-B. Chung, "Is safety education in the e-learning environment effective? Factors affecting the learning outcomes of online laboratory safety education," *Safety Science*, vol. 168, 2023, Art. no. 106306, doi: 10.1016/j.ssci.2023.106306.
- [21] H. Abedsoltan and M. B. Shiflett, "Mitigation of potential risks in chemical laboratories: A focused review," *ACS Chemical Health & Safety*, vol. 31, no.2, pp. 104–120, 2024, doi: 10.1021/acs.chas.3c00097.
- [22] I. M. Nasrallah, A. K. El Kak, L. A. Ismail, R. R. Nasr, and W. T. Bawab, "Prevalence of accident occurrence among scientific laboratory workers of the public university in Lebanon and the

impact of safety measures,” *Safety and Health at Work*, vol. 13, no. 2, pp. 155–162, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.shaw.2022.02.001.

- [23] K. P. Fivizzani, “Where are we with lab safety education: Who, what, when, where, and how?,” *Journal of Chemical Health & Safety*, vol. 23, no. 5, pp. 18–20, Sep.–Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jchas.2015.11.001.



Published by
NKRAFA Journal of Science and Technology